



# Fundição de processos siderúrgicos



# **Fundição de processos siderúrgicos**

Fábio Tâmega

© 2017 por Editora e Distribuidora Educacional S.A.  
Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida ou transmitida de qualquer modo ou por qualquer outro meio, eletrônico ou mecânico, incluindo fotocópia, gravação ou qualquer outro tipo de sistema de armazenamento e transmissão de informação, sem prévia autorização, por escrito, da Editora e Distribuidora Educacional S.A.

**Presidente**

Rodrigo Galindo

**Vice-Presidente Acadêmico de Graduação**

Mário Ghio Júnior

**Conselho Acadêmico**

Alberto S. Santana  
Ana Lucia Jankovic Barduchi  
Camila Cardoso Rotella  
Cristiane Lisandra Danna  
Danielly Nunes Andrade Noé  
Emanuel Santana  
Grasiele Aparecida Lourenço  
Lidiane Cristina Vivaldini Olo  
Paulo Heraldo Costa do Valle  
Thatiane Cristina dos Santos de Carvalho Ribeiro

**Revisão Técnica**

Éder Cícero Adão Simêncio  
Gustavo Razzante

**Editorial**

Adilson Braga Fontes  
André Augusto de Andrade Ramos  
Cristiane Lisandra Danna  
Diogo Ribeiro Garcia  
Emanuel Santana  
Erick Silva Griep  
Lidiane Cristina Vivaldini Olo

---

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

T157f Tâmega, Fábio  
Fundição de processos siderúrgicos / Fábio Tâmega.  
– Londrina : Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017.  
200 p.

ISBN 978-85-8482-818-0

1. Fundição. 2. Siderurgia. I. Título.

CDD 669.141

---

2017  
Editora e Distribuidora Educacional S.A.  
Avenida Paris, 675 – Parque Residencial João Piza  
CEP: 86041-100 – Londrina – PR  
e-mail: editora.educacional@kroton.com.br  
Homepage: <http://www.kroton.com.br/>

# Sumário

<b>Unidade 1   Introdução aos processos de fundição e siderurgia</b>	<b>7</b>
Seção 1.1 - Siderurgia: importância, vantagens, limitações e perspectivas do processo de fundição no Brasil e no mundo	9
Seção 1.2 - Classificação dos processos de fundição	23
Seção 1.3 - Considerações de projeto de peças fundidas	37
<b>Unidade 2   Equipamentos de fundição</b>	<b>53</b>
Seção 2.1 - Fundição: ferramentas e equipamentos	55
Seção 2.2 - Moldes, injetoras, centrífugas e lingoteiras	69
Seção 2.3 - Fornos utilizados na fusão das ligas metálicas	81
<b>Unidade 3   Solidificação, resfriamento, desmoldagem e acabamento</b>	<b>97</b>
Seção 3.1 - Princípios de solidificação de ligas metálicas	99
Seção 3.2 - Contração, concentração de impurezas, desprendimento de gases	113
Seção 3.3 - Desmoldagem, limpeza e acabamento	127
<b>Unidade 4   Processos de fundição de ligas metálicas</b>	<b>143</b>
Seção 4.1 - Fundição em areia a verde	145
Seção 4.2 - Fundição em areia a seco	161
Seção 4.3 - Fundição em moldes permanentes	177



# Palavras do autor

Olá, aluno. Bem-vindo aos estudos de fundição e processos siderúrgicos. Este livro lhe proporcionará conhecer a importância dos processos de fundição de ligas metálicas que servem de base para a produção industrial de peças, componentes, estruturas e outras partes utilizadas nos mais diversos segmentos. Para o entendimento de como esses processos se desenvolvem, o livro foi organizado em unidades.

A Unidade 1 trata, de uma forma geral, do contexto histórico dos processos siderúrgicos, matérias-primas, perspectivas, importância e como se caracterizam os processos de fundição, tipos de peças obtidas e conceitos acerca de projetos de fundição.

Na Unidade 2 são apresentados as ferramentas e equipamentos principais utilizados nos processos de fundição e siderurgia, mecanização e automatização dos processos, fornos, equipamentos auxiliares para confecção de moldes e matrizes, movimentação e acabamento.

Já a Unidade 3 destaca os princípios e a importância de conhecer a forma como as ligas metálicas se solidificam, das estruturas possíveis de serem formadas, os fenômenos que ocorrem na solidificação, a forma de se evitar a origem de defeitos nas peças fundidas, a limpeza e o acabamento.

Na Unidade 4 abordaremos os diversos processos de fundição e suas características de desenvolvimento de produto, considerando os tipos de ligas metálicas utilizadas, quantidade de peças a serem produzidas, dimensões, tolerâncias, acabamentos e custos do processo.

Para um melhor entendimento e aproveitamento do estudo desta disciplina, este material foi organizado de modo a proporcionar sua participação ativa. Você terá a indicação de materiais complementares e, com eles, poderá aprimorar seus conhecimentos e tornar o aprendizado mais agradável e produtivo, permitindo que, ao final do curso, esteja apto a compreender os conceitos e etapas dos processos de fundição. Bons estudos!



## Introdução aos processos de fundição e siderurgia

### Convite ao estudo

Prezado aluno, seja bem-vindo à disciplina *Fundição e processos siderúrgicos*. Neste livro, você será conduzido pelo fascinante processo da transformação das ligas metálicas em peças das mais diversas formas e aplicações. Você verá que a fundição é, ao mesmo tempo, simples e complexa. Você entenderá a importância de conhecer os processos de fundição e siderurgia, bem como os aspectos mercadológicos e econômicos, sua relação com outros processos de fabricação, as áreas do conhecimento envolvidas, as características a serem consideradas nos projetos de peças fundidas e quais alternativas são as mais viáveis para tomadas de decisão. Você também verá conceitos sobre ligas metálicas, a ocorrência das transformações quando as ligas são submetidas a diversos fenômenos físicos e químicos na passagem para o estado líquido ou de grande plasticidade e na solidificação.

Uma empresa fabricante de peças fundidas e usinadas para as indústrias de automóveis, eletrodomésticos, entre outras está estudando a viabilidade de usar uma liga de aço carbono em vez de outro tipo de material.

Vamos iniciar pensando um pouco sobre um material que é, sem dúvida, o mais utilizado para fabricação de peças e estruturas em várias áreas em nosso dia a dia: o aço.

Como o aço é obtido?

Ele é encontrado na natureza na forma como é utilizado nas indústrias?

Quais são os componentes básicos para a obtenção do aço?

Como ocorre o processo de produção do aço?

Quanto o aço está presente na vida das pessoas?

Você é capaz de imaginar como seria a vida das pessoas sem a presença do aço?

Além do aço, é claro que temos grande parcela de utilização de outras ligas metálicas, o ferro fundido, por exemplo, ferroso como o aço, e também as ligas metálicas não ferrosas, com presença marcante das ligas de alumínio.

# Seção 1.1

## Siderurgia: importância, vantagens, limitações e perspectivas do processo de fundição no Brasil e no mundo

### Diálogo aberto

Você é um engenheiro recém-contratado em uma empresa de fundição de peças metálicas para trabalhar no desenvolvimento de processos.

Você já possui algum conhecimento na área de metalurgia, mas, neste novo trabalho, a empresa fabrica peças fundidas de ligas de aço e ligas de alumínio para indústrias diversas, e você ainda não possui experiência neste processo.

A empresa está desenvolvendo, em conjunto com um cliente, uma liga alternativa ao material utilizado atualmente para a fabricação de uma peça fundida. Você deverá realizar uma análise das possíveis alternativas. Para isso, é necessário avaliar algumas questões. São elas: como o aço é obtido? Quais são as razões para que as indústrias utilizem mais ligas de aço do que outras ligas metálicas em seus produtos? Quanto o aço está presente no dia a dia das pessoas?

Como ele deverá agir? Quais caminhos que ele poderá seguir para indicar essa alternativa?

Figura 1.1 | Vazamento de aço em molde de areia



Fonte: arquivo pessoal do autor.

Nesta unidade, você compreenderá a importância histórica dos processos de fundição para o desenvolvimento da sociedade e conhecerá as principais matérias-primas da produção do ferro e do aço. Você será capaz de interpretar as ligas metálicas utilizadas na fundição e a importância da engenharia combinada aos conceitos de siderurgia e metalurgia.

Mas o que é fundição? O processo de fundição de metais e ligas metálicas é relativamente antigo. Durante muito tempo, o homem utilizou materiais diversos para atender às suas necessidades de fabricar ferramentas, artefatos e utensílios para o dia a dia. Depois, ocorreu a descoberta do uso de alguns metais que possibilitaram ao homem fabricar suas ferramentas de forma mais prática e funcional.

Contudo, antes do uso de metais fundidos, objetos eram fabricados através de alterações em sua forma obtidas a frio ou com aquecimento e golpeadas com algum tipo de massa para promover alteração na geometria. Isso não tinha o caráter de fundição, pois os metais não eram submetidos à temperatura suficiente para serem considerados fundidos. A fundição de metais e ligas metálicas passa a ser conhecida e utilizada por volta de 4000 a.C. Já o ferro tem lugar na forma fundida por volta de 1300 a 1000 a.C.

A Terra possui grandes concentrações de minério de ferro devido às frequentes colisões de objetos na formação do planeta. A fundição de aço já é bem mais recente, e se desenvolveu principalmente num período em que o uso da tecnologia tornou-se necessário para o progresso da Revolução Industrial.

Esta unidade de ensino tem como objetivo:

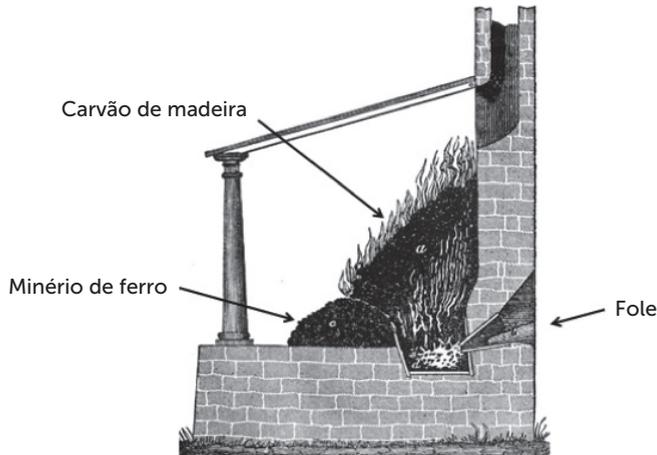
- Compreender a importância histórica dos processos de fundição para o desenvolvimento da sociedade.
- Conhecer as principais matérias-primas da produção do ferro e do aço.
- Interpretar as ligas metálicas utilizadas na fundição e a importância da engenharia combinada aos conceitos de siderurgia e metalurgia.

Fundição é um processo no qual metal fundido, no estado líquido, flui pela força da gravidade, ou por ação de outra força, num molde em que ele solidifica com a forma da cavidade do molde. O termo fundido é aplicado ao componente ou peça obtido por esse processo (GROOVER, 2014). Avançando no tempo, chegamos aos dias atuais, em que encontramos uma quantidade enorme de possibilidades de combinações de ligas metálicas com características apropriadas para cada tipo de aplicação.

## Não pode faltar

Nos primórdios da existência humana na Terra, o homem começou a fazer uso de diversos materiais disponíveis, como pedras, ossos, chifres e peles de animais, madeira, entre outros. Mas, quando passa a utilizar os metais, acontece uma grande mudança do ponto de vista de fabricação e funcionalidade dos objetos e utensílios. Surgem materiais mais resistentes, com maiores possibilidades de utilização e reprodução. É fato que a descoberta destes precursores dos processos siderúrgicos foi responsável pela evolução e avanço tecnológico ao longo da história, mas alguns historiadores relatam também o importante papel na conquista de territórios por meio do uso das primeiras armas produzidas com metais. Um dos primeiros fornos utilizados para fundir o ferro é a forja catalã, representada pela Figura 1.2.

Figura 1.2 | Representação esquemática de forja catalã



Fonte: adaptada de <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/42/PSM\\_V38\\_D175\\_A\\_blomary\\_fire.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/42/PSM_V38_D175_A_blomary_fire.jpg)>. Acesso em: 19 jul. 2016.

Quando o processo de produção do ferro, extraído do minério de ferro, começa a se desenvolver, o calcário passa a ser utilizado como fundente, além do carvão, no processo de obtenção do ferro. Isto possibilita melhorar a qualidade da liga metálica obtida, e também a produtividade.

No princípio da Revolução Industrial, o carvão vegetal é substituído pelo coque e tem início a utilização do alto-forno na Europa. Mais recentemente, por volta dos anos 1850, os processos Bessemer (Figura 1.3), Thomas e Siemens-Martin são implantados para obtenção do aço a partir do ferro-gusa.

Na siderurgia moderna, os altos-fornos e os conversores são equipamentos fundamentais para a produção do ferro e aço. As matérias-primas principais são: minério de ferro, carvão (coque) e fundente (calcário).

Figura 1.3 | Foto de um convertedor Bessemer



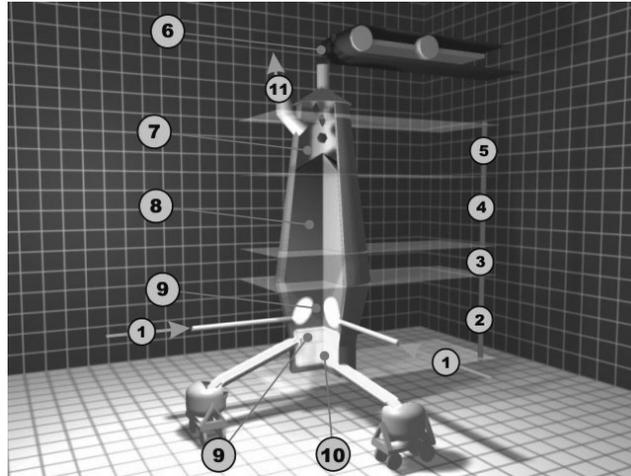
Fonte: <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7c/Bessemer\\_Converter\\_Sheffield.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7c/Bessemer_Converter_Sheffield.jpg)>. Acesso em: 19 jul. 2016.

O minério de ferro que é utilizado no alto-forno passa por processos de beneficiamento antes de ser utilizado como elemento principal da produção do ferro e aço. Esse beneficiamento pode ser um dos seguintes processos: sinterização ou pelotização. O alto-forno (Figura 1.4) é uma estrutura composta por um tipo de forno de cuba, onde é produzido o ferro-gusa a partir da combinação do minério de ferro, carvão mineral (coque) ou vegetal e calcário (fundente), que são alimentados pela parte superior do alto-forno. O ar pré-aquecido é soprado pela parte inferior, originando o processo chamado de redução dos óxidos.

O carvão é o combustível utilizado no alto-forno, e pode ser mineral, transformado em coque ou vegetal (de madeira). A ação do carvão no processo de obtenção do ferro-gusa, além de combustível, é gerar gás redutor para o processo e permitir que o calor circule com facilidade através da carga, além de apresentar alto poder calorífico. O carvão fornece carbono para a redução de óxido de ferro e, indiretamente, carbono como principal elemento de liga do ferro-gusa.

Os combustíveis são muito importantes na fabricação do ferro-gusa, pois precisam ter um alto poder calorífico. Isto quer dizer que esses combustíveis têm que gerar muito calor e não podem contaminar o metal obtido. O minério de manganês, ainda, por sua vez, é usado com função de eliminar os efeitos nocivos do enxofre e também auxilia na desoxidação, eliminando o oxigênio do ferro e do aço.

Figura 1.4 | Representação esquemática de um alto-forno



1. Fornalha Cowper.
2. Zona de derretimento.
3. Zona de redução de óxido ferroso.
4. Zona de redução do óxido férrico.
5. Zona de pré-aquecimento (garganta).
6. Alimentação de minério, pedra calcária e coque siderúrgico.
7. Escapamento de gases.
8. Coluna de minério, coque e pedra calcária.
9. Remoção de escória.
10. Ferro-gusa.
11. Chaminé para escoamento dos gases liberados.

Fonte: <<https://goo.gl/QexfKg>>. Acesso em: 19 jul. 2016.

A seguir, apresentamos algumas vantagens do processo de fundição. As peças obtidas por fundição vão desde dimensões muito pequenas até peças de grandes dimensões usadas em navios, hidrelétricas e outras grandes estruturas, e estão limitadas apenas ao tamanho das instalações físicas onde são produzidas.

Em relação à geometria das peças, possuem formas das mais simples até as mais complexas, o que possibilita uma grande diversidade de produção de peças. No processo, é possível utilizar mecanização e automatização, o que o torna muito produtivo para repetição de peças em série. As tolerâncias dimensionais podem ser mais restritas em alguns tipos de fundição, alcançando grande precisão dimensional. O acabamento das peças fundidas também pode ser muito bom, dispensando, em alguns casos, a usinagem de acabamento posterior.

Também existe a possibilidade de grande economia em peso da peça, o que permite um bom rendimento metálico.

Agora, abordaremos algumas limitações do processo de fundição. Embora a fundição tenha evoluído muito ao longo da história e hoje seja possível produzir

praticamente todo tipo de peça de metal por fundição, existem algumas limitações que, em alguns casos, tornam o processo inviável. Muitas peças necessitam de propriedades de resistência mecânica e estrutural que, para serem obtidas, é mais interessante a opção por um processo de conformação, a quente ou a frio, em lugar da fundição. O forjamento, por exemplo, é uma alternativa mais viável economicamente em alguns casos.

Em geral, as maiores limitações do processo de fundição se restringem ao aspecto de custos de fabricação que, dependendo do tipo de peça, do volume de produção, de exigências dimensionais, de forma e de propriedades, fazem com que esse processo não seja o escolhido.

Os produtos siderúrgicos não são apenas versáteis e viáveis economicamente do ponto de vista prático e funcional. Eles também são o material mais reciclado do mundo. Podem ser continuamente reciclados sem perda de qualidade. Ou seja, é um processo que promove a sustentabilidade. Dados do Instituto Aço Brasil indicam que a maior parte da água usada no processo do aço é continuamente reutilizada, reduzindo drasticamente a necessidade de captação externa. Um mínimo volume da água necessário para a produção do aço é captada em rios.

A siderurgia também possui produção de energia com geração própria. Os gases gerados no processo de produção são utilizados na geração de energia. As escórias de alto-forno e aciaria são utilizadas na fabricação de cimento e pavimentação de vias. Já os pós e lamas coletados nos sistemas de controle de efluentes líquidos e atmosféricos são reciclados no processo, com benefício ambiental adicional, devido à redução do consumo de recursos naturais, como minério de ferro e carvão. Além disso, as áreas de reflorestamento próprio fazem parte dos projetos sustentáveis do parque siderúrgico nacional.



### Refleta

Ferro e aço não são a mesma coisa. Todo aço possui ferro em sua constituição, mas nem todo ferro pode ser considerado aço.

Quais são as diferenças?

Quando a liga metálica é considerada ferro e quando ela é considerada aço?

Quando não se utiliza ferro nem aço na produção de peças com ligas metálicas, quais são os materiais mais comumente utilizados?

O setor siderúrgico onde corre esse processo de transformação do ferro em aço é chamado de aciaria; para que o ferro se transforme em aço, é necessário reduzir os teores de carbono, enxofre e outros elementos. O processo de transformação do

ferro em aço é realizado na aciaria em equipamentos denominados convertedores ou conversores.

Os tipos mais usados são:

- LD (Linz Donawitz) é o mais utilizado →  $O_2$  insuflado com lança na parte superior.
- Thomas e Bessemer → Ar insuflado por baixo.
- Fornos elétricos: Usa sucata como carga.



### Assimile

O minério de ferro encontrado na natureza necessita ser transformado para que possa ser utilizado nas mais diversas formas. Este processo de transformação tem início na redução dos óxidos que ocorre no alto-forno. O produto originado do alto-forno é chamado de ferro-gusa, que ainda possui altos teores de carbono e outros elementos considerados nocivos para as propriedades do ferro e aço. Para que seja utilizado na sua forma mais usual na produção industrial, o ferro-gusa é transportado por meio dos chamados carros-torpedo para um setor siderúrgico, que é a aciaria, onde o ferro-gusa será convertido em aço. Outro produto do alto-forno, mais comumente considerado como um subproduto, é a escória, que se forma da separação dos óxidos e outras impurezas do minério de ferro. A escória é aproveitada em diversas aplicações, como no cimento metalúrgico.

A partir daí, a produção do aço líquido ocorre por meio da oxidação controlada das impurezas presentes no ferro-gusa líquido e na sucata.

Os conversores do tipo LD, conforme visto anteriormente, são os mais utilizados (em torno de 60%), respondendo pela maior parte da produção mundial de aço líquido. Isto passou a ser possível quando o oxigênio tornou-se industrialmente barato.

Um dos processos de fundição do aço é o lingotamento, em que o aço líquido é derramado em fôrmas (lingotes) que vão se solidificando e formando matéria-prima para outros processos de fabricação, como a laminação.

Entre o refino do aço e o lingotamento existe outro processo, que é muito importante para a obtenção de aços com diversas composições e propriedades mecânicas. Esse processo é a chamada metalurgia de panela.

O lingotamento pode ser realizado de três maneiras:

- Aço vazado diretamente na lingoteira.

- Aço vazado em um duto vertical, atingindo a lingoteira pela base.
- Lingotamento contínuo, em que o aço é derramado continuamente em fôrmas refrigeradas à água.

O lingotamento contínuo ainda permite a obtenção de diversas seções, sendo a retangular a mais comum.

Outro processo de obtenção de ferro é por meio da redução direta. Nesse processo, os óxidos de ferro são trabalhados a temperaturas entre 950°C e 1050°C, originando um material poroso, chamado de ferro-esponja, no qual a redução é conduzida no estado sólido. Não se trata do processo mais usual e deve ser utilizado em situações muito específicas como em locais que não possuem carvão e minérios de boa qualidade.

Em relação aos processos siderúrgicos, como o emprego do aço tem maior volume que qualquer outro material no mundo, a siderurgia e a metalurgia do ferro e aço possuem enorme relevância na economia mundial. Com a globalização e o estreitamento dos mercados, a competitividade torna-se cada vez maior.

O Brasil, que é um grande exportador de minério de ferro, importa aço, direta ou indiretamente de países como a China. O mercado brasileiro, embora preparado tecnologicamente, necessita competir com as matérias-primas importadas e ainda enfrenta outros fatores como as altas taxas e impostos (carga tributária), custos elevados de energia elétrica e mão de obra, questões ambientais, margens de lucros e atração para novos investimentos. O que se nota é a dificuldade de se manter competitivo num mercado tão acirrado.

Outro ponto de destaque e que também é um desafio para a indústria siderúrgica nacional é que, por se tratar de indústria de base, os investimentos iniciais são muito altos e, na maioria das vezes, é o Estado que arca com estes custos que, quando amortizados, são passados ao mercado e a gestores privados. Por isso, as privatizações neste setor ocorreram em praticamente todo o mundo.

Nesse setor, o Brasil também possui vários pontos positivos, como a qualificação da mão de obra, a disponibilidade do minério de ferro e as localizações geográficas entre usinas siderúrgicas, portos e mercado consumidor. Também se considera que a gestão no setor siderúrgico é ágil, flexível e tem bom desempenho operacional.

Muitas ações são necessárias e estão sendo colocadas em prática no setor siderúrgico brasileiro, mas ainda há um longo caminho a seguir para que se possa alcançar os níveis desejados de lucratividade, bem como atrair investimentos. Não se pode negar que se trata de um setor de extrema importância na produção de bens em uma economia que depende em grande parte da produção industrial.

## Sem medo de errar

Você, engenheiro recém-contratado para atuar no desenvolvimento de processos de uma empresa de fundição de peças metálicas, aprendeu que o aço é uma liga metálica obtida a partir do minério de ferro (hematita –  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) que, combinado com carvão e um fundente (calcário, por exemplo), ocorre a redução de óxidos, gerando o ferro-gusa, que será a matéria-prima do aço. O ferro-gusa é convertido em aço em um setor siderúrgico denominado aciaria, e este processo utiliza a redução dos teores de carbono e outros elementos presentes em grande quantidade no ferro-gusa. Como existem tipos de aço com diversas características e aplicações, no processo de obtenção do aço também são considerados os elementos de liga que vão proporcionar as diferentes propriedades para cada necessidade.

Quanto o aço está presente na vida das pessoas? Você é capaz de imaginar como seria a vida das pessoas sem a presença do aço?

O aço é mais empregado que qualquer outro tipo de liga metálica nos processos industriais devido à sua versatilidade, grande possibilidade de aplicações, custo inferior ao de outras ligas e ao fato de que consegue combinar resistência mecânica e plasticidade. Além disso, permite excelentes acabamentos superficiais, atendendo, assim, a uma vasta gama de produtos nos mais variados setores.

Em razão disso tudo, o aço está muito presente em nosso dia a dia. Isto se mostra em praticamente tudo com o que temos contato em nossa rotina diária. Por exemplo, a quantidade de aço utilizada em automóveis, caminhões, ônibus e outros veículos. Em eletrodomésticos, o aço representa mais de 50% de massa. As aplicações do aço vão desde utilidades do lar, itens de lazer, como bicicletas e barracas de camping, ferramentas de uso geral, até nos aviões, nas embarcações, nos trens e nas estruturas da construção civil. Em um automóvel, por exemplo, aproximadamente 56% na massa é aço. Já em um refrigerador, em torno de 55% é feito de aço. Em um fogão, mais de 75% é produzido de aço. Como é possível notar, o emprego do aço em nossas vidas é de grande importância. A engenharia deve concentrar esforços para melhorar a transformação do aço a cada dia, em termos de custos, produtividade e qualidade dos materiais empregados.

Graças às pesquisas e à evolução dos materiais, existem outras tantas ligas metálicas capazes de atender a outras necessidades, sejam elas relacionadas à redução de peso combinada com resistência mecânica, tenacidade, funcionalidade, sustentabilidade, entre outros. Todas essas ligas metálicas originam-se nos processos de fundição. Por exemplo, as ligas metálicas não ferrosas, como o alumínio, também são muito utilizadas na fabricação de peças, componentes e estruturas diversas, e podem passar por processos de fundição.



## Exemplificando

Imagine como seria o mundo em que vivemos se não fossem os processos de evolução que ocorrem desde muito tempo. Atualmente, ocorrem avanços na descoberta dos materiais, que surgem de acordo com as necessidades das pessoas, com o desenvolvimento das tecnologias e também por conta de questões econômicas e ambientais. Há possibilidades de processamentos diversos para a transformação dos materiais em partes de uso funcional em vários segmentos. Mais especificamente, os processos siderúrgicos, permitiram-se grandes combinações de elementos de liga aos aços, para que sejam utilizados conforme as aplicações que se requerem. Hoje, há processos de fundição com uma vasta gama de possibilidades, que permitem produzir peças que vão desde as mais simples, com pouca exigência dimensional, até peças de alta complexidade geométrica e funcional. A fundição é responsável pela criação de peças que vão de muito pequenas, como adornos, até partes de grandes dimensões, como peças de navios.

Assim como a descoberta e o desenvolvimento de novos materiais, o processo de fundição continua sendo de extrema importância na obtenção de peças das mais variadas formas e de ligas metálicas das mais variadas dimensões e exigências. Mesmo tendo sido descoberta e aplicada desde tempos muito remotos, a fundição se mantém atual e vem acompanhando os desenvolvimentos tecnológicos.

As ligas metálicas não ferrosas podem ser classificadas como: **ligas leves** → alumínio (Al), magnésio (Mg), titânio (Ti) e berílio (Be); **ligas de cobre** (Cu) → latões, cobre-níquel e bronze; **ligas para alta temperatura**: níquel (Ni); **ligas de baixo ponto de fusão**: chumbo (Pb), estanho (Sn) e zinco (Zn); **ligas refratárias**: molibdênio (Mo), tântalo (Ta), tungstênio (W) e nióbio (Nb).

Quanto ao uso, em geral, as ligas metálicas não ferrosas são resistentes à corrosão e ao desgaste, possuem boa condutividade elétrica, têm peso reduzido (algumas), boa resistência a altas temperaturas (outras) e rigidez específicas.

A seguir, destacamos algumas ligas metálicas não ferrosas e suas aplicações:

**Alumínio** → construção civil e arquitetura; embalagens e contentores; aeronáutica e aeroespacial; indústrias de automóvel, ferroviária e naval; condutores elétricos de alta voltagem; utensílios de cozinha; ferramentas portáteis, entre outras.

**Magnésio** → 50% como elemento de liga no alumínio; 12% dessulfurante e desoxidante; blocos de motor, volantes, apoios de assento, coluna de direção; raquetes, patins, tacos de golfe, bastões de beisebol, bicicletas; componentes diversos de aviação; ânodo de sacrifício de navios.

**Titânio** → aeronáutica e aeroespacial; motores a jato; pás e discos de turbinas; processamento químico; implantes biomédicos; permutadores de calor.

Como podemos observar, as ligas metálicas não ferrosas também são largamente empregadas em diversos setores e aplicações e passam por processos de fundição.



### Pesquise mais

Agora, que tal aprender um pouco mais sobre a história da siderurgia no Brasil e no mundo? Então, acesse o link a seguir: História do Aço no Brasil e no Mundo.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Disponível em: <[http://www.acobrasil.org.br/site2015/introducao\\_historia.html](http://www.acobrasil.org.br/site2015/introducao_historia.html)>. Acesso em: 18 jul. 2016.

Este conteúdo mostra a importância do aço e o quanto ele está presente no dia a dia das pessoas, apresentando a versatilidade do aço, as inúmeras possibilidades de utilização e a evolução histórica da sua produção. Ressalta, também, os avanços obtidos com a Revolução Industrial até os dias atuais.

## Avançando na prática

### Evoluindo na fundição

#### Descrição da situação-problema

Como vimos, as ligas de aço correspondem a uma grande parcela da produção industrial de peças e componentes para diversos segmentos. Estima-se que as ligas de aço respondam por mais de 70% de todas as ligas metálicas utilizadas. Contudo, sabemos que não existe um material que atenda a todas as solicitações. A evolução tecnológica, as exigências dos mercados consumidores e as questões econômicas e ambientais fazem com que se reflita constantemente sobre soluções mais viáveis desses diversos aspectos. Neste contexto, um cliente da TF Total Foundry, que produz motores à combustão para automóveis, solicitou que a empresa desenvolva em conjunto com ele um motor com partes produzidas com um material alternativo, mais leve do que o ferro fundido, hoje utilizado nos blocos e carcaças. Você, na função de engenheiro de desenvolvimento de processos, está participando da equipe nesse projeto e tem que realizar um levantamento sobre esse material alternativo que mantenha as características do material original. Qual liga metálica você indicaria? Quais as vantagens em se utilizar esta liga?

## Resolução da situação-problema

Já faz algum tempo que as ligas de alumínio, com teores de Fe, Mg, Cu, Mn, Ni e outras, são utilizadas na produção de blocos, cabeçotes e carcaças para motores à combustão para automóveis. Isto se deve à leveza do alumínio quando comparado ao ferro fundido, proporcionando menor consumo de combustível dos automóveis, por exemplo. Tal mudança também se faz necessária para manter as empresas competitivas no mercado cada vez mais acirrado.



### Faça você mesmo

Como vemos, os processos siderúrgicos e a fundição são práticas muito antigas e evoluíram muito no decorrer dos desenvolvimentos e evolução tecnológica. Realize uma pesquisa sobre a evolução dos processos de fundição ao longo da história, bem como suas perspectivas em relação aos novos desenvolvimentos no setor siderúrgico, no Brasil e no mundo. Analise a participação das empresas siderúrgicas e dos setores de fundição das diversas ligas metálicas utilizadas industrialmente.



### Vocabulário

**Foundry:** palavra da língua inglesa que significa fundição.

**Escória:** subproduto do processo de redução dos óxidos do minério na fundição formado por uma mistura de óxidos não reduzidos.

**Carro-torpedo:** equipamento fabricado em aço estrutural e revestido internamente com material refratário, usado para o transporte de ferro-gusa do alto-forno para a aciaria.

Fonte: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/aco/processo-introducao.asp>>. Acesso em: 5 set. 2016.

## Faça valer a pena

**1.** O aço representa o maior volume de produção de peças metálicas. Para a produção do aço em larga escala, foram desenvolvidas tecnologias a partir da Revolução Industrial. O aço bruto é produzido a partir do ferro-gusa em uma instalação das siderúrgicas conhecida como aciaria.

De acordo com o que foi estudado até aqui, as matérias-primas básicas para a produção do ferro-gusa no alto-forno são:

a) Chumbo, estanho e cobre.

- b) Minério de ferro, carvão mineral ou vegetal e calcário.
- c) Magnésio, silício e minério de ferro.
- d) Bauxita, minério de ferro e gás carbônico.
- e) Fósforo, nitrogênio e minério de manganês.

**2.** Estudamos a importância dos processos siderúrgicos e fundição de ligas metálicas. Vimos que esses processos estão presentes em nossa rotina diária e quase passam despercebidos. Mas é fato que as ligas de ferro e aço (ferrosas) e as ligas não ferrosas são empregadas em grandes quantidades na fabricação industrial e necessárias para os projetos em diversos setores da economia.

Das ligas metálicas utilizadas em processos de fundição que se tornam peças para diversas aplicações, assinale a alternativa que melhor representa as ligas mais utilizadas em termos de volume.

- a) Ligas leves em geral.
- b) Ligas de cobre, tais como o latão e o bronze.
- c) Ligas para alta temperatura, como o níquel.
- d) Ligas ferrosas — aço e ferro fundido.
- e) Ligas refratárias.

**3.** Após muitos anos de utilização do ferro em diversas aplicações, com a evolução do conhecimento do homem ao fundir o minério de ferro, a produção de aço teve início com a Revolução Industrial. As inovações desenvolvidas na época permitiram separar as impurezas do ferro e produzir aço em grandes volumes e excelente qualidade.

Um dos grandes desenvolvimentos que ocorreu na época, possibilitando a produção do aço em larga escala, foi um tipo de processamento. Assinale a alternativa a seguir que corresponde a este processo.

- a) Forja catalã.
- b) Forno cubilô.
- c) Bessemer.
- d) Forjamento a quente.
- e) Sinterização.



## Seção 1.2

### Classificação dos processos de fundição

#### Diálogo aberto

Olá, aluno. Neste momento você está avançando em sua jornada na área de desenvolvimento de processos da TF Total Foundry. Em seus primeiros dias na empresa, foi solicitado que você realizasse um levantamento sobre material alternativo para fundição de blocos e carcaças de motores.

Você já aprendeu que as ligas de alumínio, com teores de Fe, Mg, Cu, Mn, Ni e outras, são utilizadas na produção de blocos, cabeçotes e carcaças para motores à combustão para automóveis, e que isso se deve à leveza do alumínio quando comparado ao ferro fundido, proporcionando menor consumo de combustível dos automóveis, além da necessidade de manter as empresas competitivas no mercado cada vez mais acirrado.

Foi abordado anteriormente, também, a importância histórica da evolução da fundição e o uso de ligas metálicas com diversas combinações de elementos para melhorar as propriedades físicas dos produtos obtidos.

Agora, a TF Total Foundry está desenvolvendo uma peça que deverá ser fundida. A peça será produzida sob demanda e possui como características massa igual a 1,75 kg, de geometria relativamente simples e com liga de aço de baixo teor de carbono com propriedades mecânicas de 410 MPa de limite de resistência à tração, 250 MPa de limite de escoamento e alongamento de 34%. Qual processo de fundição você indica para esta situação? Esse é o processo mais adequado?

No decorrer desta unidade, você aprenderá mais características dos processos de fundição, tais como as possibilidades de peças a serem produzidas, o uso de ligas ferrosas e não ferrosas, além dos tipos de molde de fundição apropriados para cada situação.

Figura 1.5 | Vazamento de liga metálica em molde de areia



Fonte: arquivo pessoal do autor.

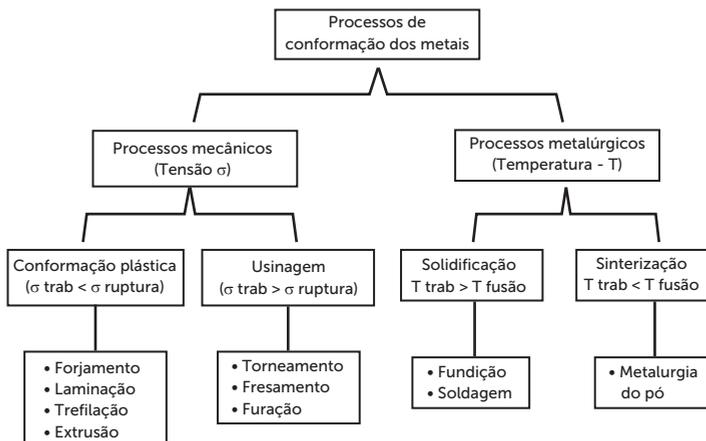
## Não pode faltar

### Processos mecânicos e processos metalúrgicos

Aqui faremos uma breve distinção entre processos de fabricação de peças metálicas, separando-os em processos mecânicos, os quais deformam e conformam os materiais por meio de tensões para obter as peças desejadas; e em processos metalúrgicos, que transformam o material metalurgicamente, a partir de aquecimento, levando o material ao estado líquido ou semissólidos.

Para os processos de fabricação mecânica, também fazemos uma subdivisão em processos de conformação, como laminação, forjamento e extrusão, e processos de remoção de material, como os processos de usinagem.

Figura 1.6 | Esquema de classificação dos processos de conformação dos metais



Fonte: Groover (2014).

Como apresentado na Figura 1.6, nota-se que os processos de fundição estão classificados como processos metalúrgicos na categoria solidificação.

Embora em alguns tipos de soldagem seja possível que a união ocorra sem que a temperatura tenha ultrapassado a fusão, principalmente por meio do emprego da pressão associada, os processos de soldagem são também considerados, em geral, processos metalúrgicos, sendo necessário que a temperatura das ligas metálicas envolvidas esteja acima da temperatura de fusão.

### Possibilidades de peças obtidas por fundição

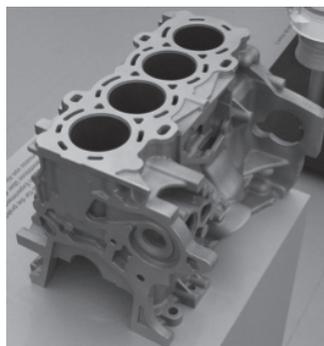
A fundição é um processo de fabricação no qual se consegue obter praticamente qualquer tipo de peça metálica. Podem ser obtidas peças muito pequenas, de alguns gramas, para adornos e objetos de decoração e arte, passando por peças pequenas e médias, usadas em eletrodomésticos (Figura 1.7), até peças médias e grandes, como blocos de motor (Figura 1.8) e cabeçotes de motor, chegando a peças e estruturas como turbinas para hidrelétricas e peças de navios. Isto se deve ao fato de a fundição ser um processo de fabricação muito versátil e possuir diversos processos que podem ser adequados aos variados tipos de ligas metálicas, e também aos requisitos dimensionais, geométricos, de acabamento superficial, produtividade e tamanho das peças fundidas.

Figura 1.7 | Peças para eletrodomésticos produzidas através da fundição.



Fonte: <<http://fundicaoemaluminio.com.br/imagens/fundicao-pressao01.jpg>>. Acesso em: 6 dez. 2016.

Figura 1.8 | Bloco de motor fundido



Fonte: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Bloco\\_do\\_motor](https://pt.wikipedia.org/wiki/Bloco_do_motor)>. Acesso em: 28 jul. 2016.

### Ligas metálicas ferrosas e ligas metálicas não ferrosas

Os metais são os materiais mais utilizados na construção mecânica devido às suas propriedades e desempenho quando submetidos aos mais diversos tipos de solicitações.

Como você já deve saber, alguns metais são encontrados em sua forma pura na natureza, mas a maior parte dos metais utilizados para fins industriais e na produção mecânica é obtida a partir de seus respectivos minerais.

Para fins de processos de fundição e siderurgia, classificamos as ligas metálicas usadas para essa finalidade como metais ferrosos e metais não ferrosos.

As ligas metálicas ferrosas são caracterizadas por possuírem principalmente ferro em sua composição como elemento base. Assim, as ligas de ferro fundido, aços carbono, aços ligados e inoxidáveis são ligas metálicas ferrosas.

Nas ligas metálicas não ferrosas há ausência do elemento ferro ou, em alguns casos, a quantidade de ferro é muito pequena, o que não a caracteriza como uma liga ferrosa. Elas possuem características de usos, em geral, de boa resistência à corrosão, resistência ao desgaste, condutividade elétrica, peso reduzido em algumas ligas, boa resistência mecânica e rigidez específica. Em algumas ligas de cobre, como o bronze, a propriedade de resistência ao desgaste por atrito está presente. Outros materiais, como o latão (liga cobre e zinco), podem ser utilizados para a fabricação de adornos, objetos de uso doméstico e decoração.

As ligas de alumínio são vastamente utilizadas em fabricação metalúrgica para as mais variadas aplicações e possuem, entre outras propriedades, boa ductilidade, excelente resistência à corrosão, boa resistência à tração, excelente usinabilidade e boa soldabilidade.

Outras ligas metálicas não ferrosas, como as ligas de titânio, podem suportar temperaturas muito elevadas e são utilizadas na fabricação aeronáutica, automobilística e em implantes ortopédicos.



### Assimile

Embora existam outros tantos materiais para uso na engenharia e o desenvolvimento tecnológico permita a obtenção de novos materiais, os metais e suas ligas ainda são os materiais mais empregados na fabricação de produtos para aplicações diversas, podendo ser utilizados combinados, inclusive com outros materiais não metálicos.

### Moldes para fundição

Na fabricação de peças de metal por meio dos processos de fundição e solidificação, é necessário formar a peça utilizando-se um molde no qual o metal líquido é derramado, solidificando-o e fazendo com que a peça tome a forma do molde.

Ainda existe outro elemento necessário para a confecção dos moldes, principalmente os de areia, que são os chamados modelos.

Porém, neste momento, concentraremos apenas em algumas características dos moldes, pois o tema será retomado com mais detalhes na Unidade 4.

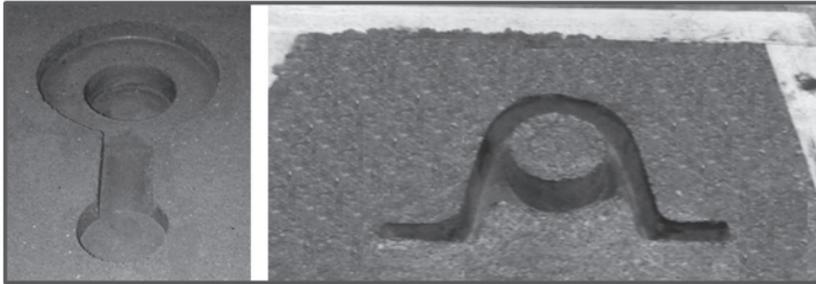
## Fundição em moldes refratários

Um importante elemento para a fabricação de peças por meio da fundição é o molde ou fôrma (Figura 1.9), onde o metal líquido é vazado para que ele copie a forma geométrica do molde e, após a solidificação da liga metálica, a peça resultante seja fiel em forma e dimensão ao projetado.

Existem muitas maneiras de se produzir um molde de fundição. Os moldes, em geral, são constituídos de um material capaz de suportar as altas temperaturas de fusão das ligas metálicas. As areias são os mais utilizados. São os chamados moldes refratários.

Após a solidificação da peça fundida, esses moldes são destruídos para a retirada da peça.

Figura 1.9 | Cavidades de molde de areia a verde para fundição



Fonte: arquivo pessoal do autor.

Os processos de fundição em moldes refratários constituídos de areia de base, elementos ligantes e aglomerantes são divididos em:

1) Areia a verde (Figura 1.10): a umidade do molde não é retirada por aquecimento ou outros meios, sendo que a areia é utilizada em temperatura ambiente, após a confecção do molde.

2) Areia seca: o molde é levado à secagem por meio de processos de aquecimento (estufagem) ou outros processos de cura, como a injeção de  $\text{CO}_2$ .

No Quadro 1.1 apresentamos algumas vantagens e desvantagens da fundição por moldagem em areia a verde.

Quadro 1.1 | Vantagens e desvantagens da fundição por moldagem em areia a verde

Vantagens	Desvantagens
Menor custo de fabricação.	Necessidade de controlar a areia é maior do que nos demais métodos que usam areia.
Menor tendência de distorcer a fôrma quando comparado ao uso de areia seca.	Mais chance de surgimento de erosão para peças fundidas maiores.
Rapidez para reutilizar as caixas de moldagem.	Acabamento superficial inferior em peças de maiores.
Melhor manutenção dimensional.	Dificuldade de manter o dimensional em peças maiores.
Menor incidência de trincas.	

Fonte: adaptado de Chiaverini (1986).

Na moldagem em areia seca, os moldes são construídos com areia silicosa, contendo aditivos orgânicos e outros elementos ligantes e aglomerantes para posterior secagem em estufa.

Entre as vantagens de moldagem em areia seca, temos:

- Maior resistência para suportar a pressão do metal líquido.
- Maior estabilidade dimensional.
- Maior dureza.
- Melhor permeabilidade.
- Melhor acabamento superficial.

Figura 1.10 | Imagem de um molde de areia a verde



Fonte: arquivo pessoal do autor.

A seguir, estão listados alguns processos de fundição que utilizam moldes de areia.

- Moldagem em areia a verde.
- Processo de fundição em casca ou *shell molding*.
- Fundição em cera perdida.

- Processo de fundição  $\text{CO}_2$  / silicato de sódio.
- Cura a frio e cura a quente.
- Caixa fria (*cold box*).
- Caixa quente (*hot box*).

Nos casos dos moldes em que é necessária a secagem para que ocorra a cura e o enrijecimento, alguns processos utilizam secagem em estufas e, em outros, a cura dos moldes ocorre sem a necessidade de aquecimento.



### Exemplificando

Um exemplo de fundição em que o molde não é submetido à estufagem para realizar a secagem é o processo de fundição  $\text{CO}_2$  / silicato de sódio. Nesse processo, a secagem do molde ocorre pela reação do  $\text{CO}_2$  injetado no molde que foi preparado com areia aglomerada com o silicato de sódio, resultando no endurecimento do molde.

É importante que a areia de fundição apresente algumas propriedades para que o processo ocorra nas melhores condições e as peças obtidas atendam aos requisitos especificados no projeto. A seguir, estão em destaque as principais características para que a areia usada na confecção dos moldes de fundição estejam adequadas para um melhor resultado do processo:

- Refratariedade para suportar altas temperaturas da liga metálica no estado líquido.
- Permeabilidade para favorecer a saída de gases do molde.
- Resistência à pressão do metal líquido vazado no molde.
- Resistência ao efeito erosivo do metal líquido quando atinge as paredes do molde com velocidade.
- Plasticidade para permitir uma melhor moldagem.
- Granulometria, caracterizada pelo tamanho dos grãos que vão determinar as condições de aplicação.

Nos moldes confeccionados em areia, o vazamento do metal líquido e o preenchimento do molde ocorrem normalmente pela ação da gravidade.



### Faça você mesmo

Você deve ter notado que a fundição é uma atividade de fabricar peças que possui uma vasta gama de possibilidades. Então o convidamos a pesquisar sobre diferentes tipos de peças obtidas por esse processo metalúrgico, considerando as variáveis estudadas até aqui, como: temperatura de fusão da liga metálica, características de forma geométrica e dimensões, exigência de acabamento superficial, volumes de produção e custos.

### Fundição em moldes metálicos permanentes

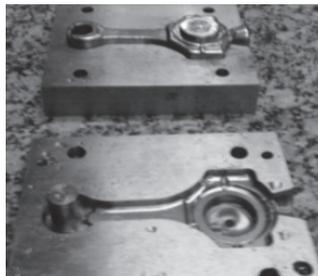
Outros tipos de processos de fundição utilizam moldes ou matrizes (Figura 1.11), que são preservados para que sejam fundidas outras peças no mesmo molde.

Esses moldes são construídos de material metálico. Basicamente, ferro e aço tratado.

A seguir, estão listados alguns processos de fundição que utilizam moldes metálicos permanentes:

- Lingotamento contínuo.
- Fundição em coquilha.
- Fundição por injeção (sob pressão) em câmara quente.
- Fundição por injeção (sob pressão) em câmara fria.
- Fundição por centrifugação para produção de tubos e outras peças circulares.

Figura 1.11 | Imagem de um molde (matriz) de aço para fundição



Fonte: arquivo pessoal do autor.



### Pesquise mais

Agora que você está compreendendo algumas características dos processos de fundição, aprenda um pouco mais lendo o artigo indicado.

Ele trata da qualidade superficial de peças de alumínio fundidas em molde de areia. RUBIO, J. C. C.; PANZERA, T. H.; NOGUEIRA, W. A. Qualidade superficial de peças de alumínio fundidas em molde de areia. **Revista Matéria**, v. 11, n. 2, p. 125-137, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rmat/v11n2/a06v11n2.pdf>>. Acesso em: 2 ago. 2016.

A temperatura de fusão das ligas utilizadas nos processos de fundição em moldes de metal deve ser considerada, pois nos casos das ligas com ponto de fusão mais elevado, como ferro e aço, a temperatura do metal líquido pode prejudicar o metal do molde.

É por essa razão que as peças produzidas no processo de fundição sob pressão em moldes metálicos permanentes utilizam algumas ligas metálicas não ferrosas que possuem temperaturas de fusão abaixo dos pontos de fusão dos ferros e aços. Em geral, somente se utiliza ligas com ponto de fusão menor ou igual ao das ligas de cobre.

Outras limitações da fundição por injeção ou sob pressão são: dimensões limitadas das peças que em geral possuem massa inferior a 5 kg; equipamentos e acessórios mais caros, implicando grandes volumes de produção; dificuldade de saída de ar retido nos moldes.



### Refleta

Os moldes metálicos permanentes utilizados na fundição são totalmente permanentes? É claro que quando comparamos um molde de areia que é destruído logo após a solidificação da peça para possibilitar a sua retirada e um molde de aço utilizado, por exemplo, na fundição por injeção, podemos dizer que o segundo é realmente permanente. Contudo, o molde metálico também possui uma vida útil, que dependerá das condições a que será submetido. Existem moldes de fundição por injeção que são descartados ou recuperados após a fundição de cerca de 200 mil peças.

### Sem medo de errar

Agora que você já está se familiarizando com os processos da TF Total Foundry e conhecendo mais sobre os processos de fundição e siderurgia, você é convidado a participar mais intensivamente do desenvolvimento dos processos de fabricação metalúrgica da empresa. A decisão sobre qual processo de fundição mais adequado para a produção de uma peça sob demanda, de massa igual a 1,75 kg, de geometria relativamente simples e com liga de aço de baixo teor de carbono com 410 MPa de limite de resistência à tração, 250 MPa de limite de escoamento e alongamento de 34% com propriedades mecânicas ficou mais fácil, não é mesmo? Reflita: se a liga a ser fundida é um aço carbono, é possível que na fundição em matrizes metálicas

ocorram danos ao material das matrizes e, portanto, não é recomendada a escolha de um processo de fundição que utilize moldes permanentes. É mais apropriado um processo de moldagem em areia em razão da refratariedade.

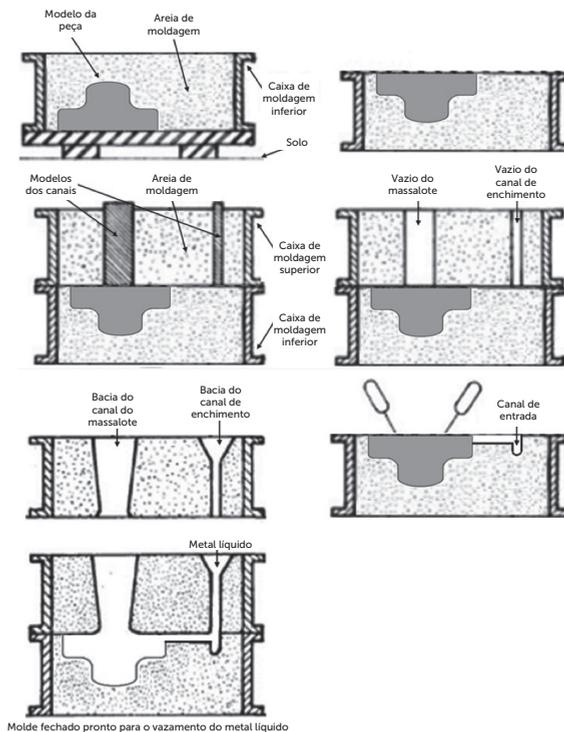
Dos processos de fundição que utilizam areia de moldagem, temos várias opções. Vamos analisar, agora, as características de tamanho e forma da peça e também o volume de produção. Como se trata de uma peça de massa igual a 1,75 kg, de forma geométrica simples e produção sob demanda, o processo de fundição escolhido pode ser o de moldagem em areia a verde, pois ele tende a representar o menor custo entre as opções existentes e é viável do ponto de vista técnico. A Figura 1.12, a seguir, mostra de forma esquemática a sequência de moldagem.



### Atenção

É importante destacar que muitas peças podem ser produzidas por mais de um tipo de processo de fundição, além de outros processos, como mencionamos em processos mecânicos e processos metalúrgicos. A escolha deve sempre levar em consideração as características da peça e a viabilidade técnica e econômica.

Figura 1.12 | Representação da sequência de moldagem para fundição em areia



Fonte: adaptado de Chiaverini (1986).

## Avançando na prática

### Novos desafios na fundição

#### Descrição da situação-problema

Agora que você já indicou o processo de fundição mais adequado do ponto de vista técnico e econômico, passa a buscar novos desafios relacionados à fabricação metalúrgica.

Realizando uma observação nos processos de fundição da TF Total Foundry, você se deparou com um problema de acabamento superficial em peças de alumínio fundidas em moldes de areia a verde. Com o que você estudou até aqui, qual a sua indicação para avaliar o que está causando o efeito indesejado no acabamento das peças?

Figura 1.13 | Peça com mal acabamento devido à qualidade da areia de moldagem



Fonte: arquivo pessoal do autor.

#### Resolução da situação-problema

Como foi estudado até o momento, as areias de fundição devem possuir algumas propriedades para que o resultado desejado seja alcançado.

No caso do acabamento superficial de uma peça fundida, a qualidade da areia no aspecto de granulometria é um fator primordial, pois a cavidade do molde de areia que está em contato com o metal líquido tende a reproduzir na peça o acabamento característico da areia. Neste caso, uma areia de granulometria grosseira produzirá uma peça com aspecto superficial pior do que uma areia de granulometria fina.

Uma alternativa viável para esta situação seria utilizar a areia de granulometria mais fina para o contato com a peça (chamada de areia de faceamento) e areia com granulometria mais grosseira para o enchimento da caixa de moldagem (chamada areia de enchimento).

**Faça valer a pena**

**1.** Quando a fundição utiliza moldes constituídos de areia de base, elementos ligantes e aglomerantes, podem ser utilizados métodos nos quais a umidade do molde não é retirada por aquecimento ou outros meios e também métodos em que o molde é levado à secagem para a cura.

Assinale a alternativa que apresenta uma desvantagem da fundição por moldagem em areia a verde.

- a) Pior acabamento superficial em peças de maiores.
- b) Manutenção dimensional.
- c) Maior custo de fabricação.
- d) Maior alteração de formato do que os métodos que usam areia seca.
- e) Dificuldade de reutilização das caixas de moldagem.

**2.** Na moldagem em areia seca, os moldes são construídos com areia de base silicosa contendo aditivos orgânicos e outros elementos ligantes e aglomerantes que, após a formação do molde, são levados à secagem em estufa para que o molde adquira enrijecimento.

Analise as afirmações a seguir no que diz respeito às vantagens da moldagem em areia seca em relação à areia a verde.

- I. Maior resistência à pressão do metal líquido.
- II. Maior estabilidade dimensional.
- III. Menor dureza.
- IV. Menor permeabilidade.

É correto o que se afirma em:

- a) II, III e IV.
- b) III e IV.
- c) I e IV.
- d) I e II.
- e) I, II, III e IV.

**3.** Dos tipos de moldes utilizados na fundição, os que são fabricados de ferro e aço tratado são indicados para aplicações específicas e ligas de ponto de fusão mais baixo que o cobre. Quando se trata de forçar o metal líquido a entrar na cavidade das matrizes, dizemos que a fundição é sob pressão, ou seja, por injeção.

Das afirmações a seguir, quais se referem a vantagens deste tipo de fundição?

I. Possibilidade de produção de peças com fôrmas mais complexas.

II. Alta capacidade de produção.

III. Alta durabilidade das matrizes (moldes).

IV. Tolerâncias dimensionais mais precisas.

É correto o que se afirma apenas em:

a) I e II.

b) II e III.

c) I, III e IV.

d) III e IV.

e) I, II, III e IV.



## Seção 1.3

### Considerações de projeto de peças fundidas

#### Diálogo aberto

Olá, aluno. Nesta seção, serão apresentados aspectos básicos relacionados ao projeto de fundição e que são fundamentais para que os resultados desejados em relação aos custos, qualidade e prazos de entrega sejam alcançados. Ou seja, serão abordadas características técnicas e econômicas do processo.

Em suas atividades iniciais na empresa TF Total Foundry, você teve a oportunidade de conhecer melhor como escolher o processo de fundição mais adequado para determinada situação. Você também participou de uma proposta de solução para um problema de acabamento em uma peça fundida.

Agora, foi solicitado a você que estabelecesse um fluxograma para o processo de fundição da peça que será produzida sob demanda. A peça em questão possui massa igual a 1,75 kg, geometria relativamente simples, e será fabricada a partir de uma liga de aço de baixo teor de carbono com propriedades mecânicas de 410 MPa de limite de resistência à tração, 250 MPa de limite de escoamento e 34% de alongamento.

Nesta seção, você compreenderá os aspectos relacionados ao fluxo de um processo de fundição, considerando regras básicas para o projeto de peças fundidas; condições de custo, qualidade e prazo para elaboração de um projeto de fundição; estabelecimento do tipo de processo e moldagem; forma de vazamento; liga metálica utilizada; sistema de acabamento e rebarbação e controles necessários; e adaptação dos detalhes técnicos, tais como: plano de divisão, raios de arredondamento, ângulos de saída, furos, seções mínimas, acréscimo de contração, localização dos machos e projeto do sistema de alimentação.

#### Não pode faltar

Para a realização de um processo de fundição, muitos aspectos devem ser levados em consideração para que os resultados sejam alcançados.

Vamos tratar agora da fundição por moldagem em areia. A moldagem em areia, como já vimos na seção anterior, pode ser realizada de diversas maneiras, sendo a mais usual a moldagem em areia a verde.

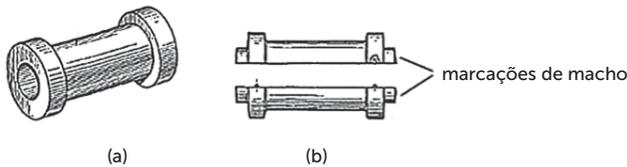
Antes da confecção do molde de areia, é necessário ter a especificação da peça que se deseja obter por meio da fundição.

Essa especificação precisa conter desde a liga metálica que será utilizada até os detalhes de forma e dimensões.

A partir daí, é confeccionado um modelo que representará a peça a ser fundida e que servirá de base para a moldagem em areia.

A Figura 1.14, a seguir, mostra uma representação esquemática de um modelo bipartido para a moldagem em areia a verde.

Figura 1.14 | Imagem de uma peça (a) e respectivo modelo (b) para moldagem em areia a verde



Fonte: Titov e Stepanov (1981 apud BALDAN, 2013).

A peça do exemplo apresentado na Figura 1.14 possui um furo passante e detalhes geométricos que exigem que a moldagem seja feita em duas partes. Além disso, para formar o furo no fundido, é necessário outro recurso da fundição em areia, conhecido como "macho", representado pela Figura 1.15, a seguir. Este elemento será montado no molde de maneira que o metal líquido não preencha o espaço ocupado, dando origem aos furos, reentrâncias e outros detalhes na peça fundida.

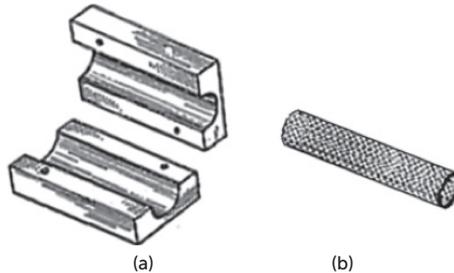


### Refleta

Uma das considerações sobre um projeto de peça fundida leva em consideração os efeitos da contração do metal quando está no estado líquido, na solidificação e no estado sólido. Conhecendo isso, explique o que deve ser previsto no modelo da peça fundida para compensar os efeitos da contração.

Neste caso, o modelo deve contar com um complemento chamado de "marcação de macho", indicado na Figura 1.14 (b), e que servirá para formar no molde um apoio para a sustentação do macho.

Figura 1.15 | Imagem de caixa de macho (a) e macho pronto para ser montado no molde de areia (b)

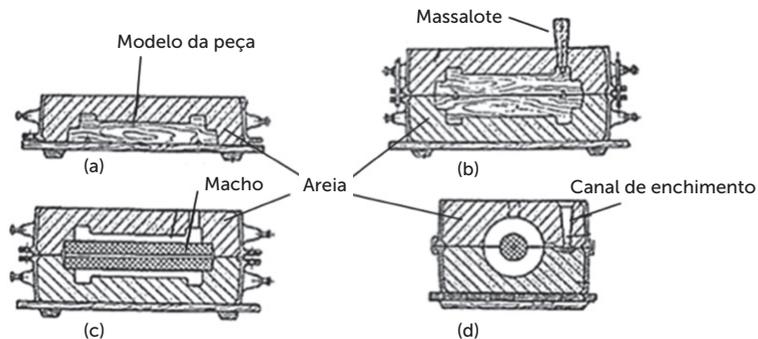


Fonte: Titov e Stepanov (1981 apud BALDAN, 2013).

Com o modelo e o macho prontos, é possível executar a moldagem em areia. A areia básica para fundição é constituída de areia, geralmente, de base silicosa, argila e água.

A próxima etapa é a moldagem, que é realizada em caixas de moldar, onde os modelos são fixados e a areia é compactada de forma manual ou automatizada. A Figura 1.16 mostra as caixas de moldar com os modelos montados.

Figura 1.16 | Caixa de moldar com parte do modelo bipartido (a); caixa de moldar com as duas partes do modelo bipartido e modelo do canal para saída de gases e massalote (b); duas partes da caixa de moldar sem os modelos e com macho posicionado (c) e vista lateral da caixa de moldar mostrando o canal de enchimento (d)



Fonte: Titov e Stepanov (1981 apud BALDAN, 2013).

As dimensões e formas dos modelos e dos machos para um molde de fundição devem considerar as adequações em relação ao projeto original da peça a fim de adaptá-la ao processo de fundição. São considerados aspectos como espessura de usinagem, ângulos de saída que facilitam a retirada dos modelos do molde, acréscimos para compensar a contração linear, cantos arredondados e marcações de macho.

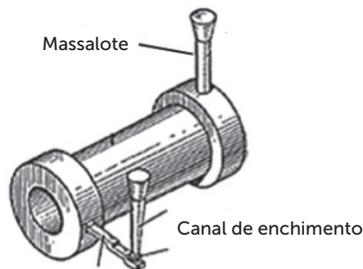
Os modelos e caixas de macho podem ser confeccionados de diversos materiais, sendo muito comum o uso de madeira, metais como aço, alumínio e resina. Por isso, a durabilidade destes elementos varia de acordo com o tipo de material empregado e os tipos de moldagem.

Após o vazamento do metal líquido no molde, é necessário aguardar a temperatura cair até estar próxima da temperatura ambiente, bem como toda a massa se solidificar, para que seja realizada a desmoldagem.

Como já vimos nas seções anteriores, é preciso desfazer o molde para a retirada da peça fundida de um molde de areia.

A Figura 1.17 mostra de forma esquemática a peça obtida pelo processo de fundição em areia a verde conforme as figuras anteriores.

Figura 1.17 | Peça fundida ainda com os canais de enchimento e massalote



Fonte: Titov e Stepanov (1981 apud BALDAN, 2013).



### Assimile

É importante destacar que os modelos utilizados para moldagem em areia para fundição de peças metálicas podem ser construídos de diversos materiais, incluindo metais de fácil usinagem, como aço, alumínio, isopor, madeira e resina.

Também, a caixa de macho, representada pela Figura 1.15 (a), que serve para moldar o macho de areia, pode ser confeccionada dos mesmos materiais do modelo.

Para um melhor resultado na fundição de peças metálicas, algumas condições devem ser consideradas no projeto. A seguir, temos as questões mais básicas e importantes para um bom projeto de fundição.

- Considerar os efeitos da contração de volume do material.
- Evitar fazer mudanças bruscas nas seções e cantos vivos.

- Uniformizar as espessuras tanto quanto possível.
- Evitar a presença de ressaltos e saliências nas peças.
- Usar reforços e nervuras.
- Prever sobre metal para usinagem e para compensar a contração no estado sólido.
- Evitar concentração de massa em pontos da peça. Neste caso, o projeto deve levar em consideração furos para alívio de massa em pontos críticos que eventualmente não fazem parte do desenho inicial de peça.

Outros pontos que devem ser considerados são:

- Esforços mecânicos aos quais as peças serão submetidas.
- Os materiais apropriados para a construção da peça.
- Formas, dimensões, localização das marcações de macho, saída de gases do molde.
- O processo de fundição mais adequado do ponto de vista técnico e econômico.
- Outros processos de fabricação a que as peças serão submetidas.
- Tratamentos de superfície e tratamentos térmicos que serão necessários.
- Como será o método de enchimento e de alimentação a ser utilizado.



### Pesquise mais

Que tal saber mais sobre o processo de fundição em areia? Leia o artigo indicado. Ele trata da influência da areia de cura a frio reutilizada nas propriedades mecânicas e das características superficiais de moldes empregados em fundição.

SILVA, C. E. da et al. Influência da areia de cura a frio reutilizada nas propriedades mecânicas e características superficiais de moldes empregados em fundição. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, n. 65, p. 73-78, jan./mar. 2012. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rem/v65n1/a10v65n1.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2016.

Em relação à construção do modelo da peça que será fundida, há necessidade de se utilizar dimensões do modelo maiores que as dimensões finais da peça fundida, principalmente por duas razões:

- 1) Compensar os efeitos da contração da liga metálica na solidificação.
- 2) Deixar material sobressalente (sobre metal) para usinagem posterior.

Em relação aos efeitos da contração volumétrica e linear da liga metálica nos pontos em que a liga se encontra no estado líquido, na solidificação e no estado sólido, é possível estimar os percentuais a serem acrescentados aos modelos das peças de acordo com cada tipo de liga. Estudaremos mais detalhes desta característica do processo na Unidade 3, Seção 3.2.

Existem recomendações de sobremetal para usinagem de acordo com o tipo de liga metálica utilizada e com as dimensões da peça, conforme o Quadro 1.2.

Quadro 1.2 | Recomendação de margens dimensionais para usinagem de peças fundidas

Liga	Dimensões do modelo (cm)	Margens (mm)	
		Orifício	Superfície
Ferro fundido	Até 15,2	3,175	2,38
	De 15,3 a 30,5	3,175	3,175
	De 30,6 a 50,8	4,76	4,0
	De 50,9 a 91,4	6,35	4,76
	De 91,5 a 152,4	7,94	4,76
Aço fundido	Até 15,2	3,175	3,175
	De 15,3 a 30,5	6,35	4,76
	De 30,6 a 50,8	6,35	6,35
	De 50,9 a 91,4	7,14	6,35
	De 91,5 a 152,4	7,94	6,35
Não ferrosos	Até 7,6	1,59	1,59
	De 7,7 a 20,3	2,38	2,38
	De 20,4 a 30,5	2,38	3,175
	De 30,6 a 50,8	3,175	3,175
	De 50,9 a 91,4	3,175	4,0
	De 91,5 a 152,4	4,0	4,76

Fonte: adaptado de Chiaverini (1986).

Vale lembrar que para o projeto de peças fundidas, as questões mais importantes estão relacionadas à qualidade, desempenho, custo e prazo de entrega. Portanto, os volumes que serão produzidos, os tipos de exigências que serão necessárias, tais como acabamento, precisão dimensional, possibilidade de automatização dos processos, consumo de energia e impacto ambiental também são considerados para que os melhores resultados sejam obtidos.



### Assimile

Outra característica do projeto de fundição em areia está ligada ao modo como será efetuada a limpeza das peças, remoção da areia de partes de difícil acesso como furos, reentrâncias e saliências.

Como as peças obtidas na fundição serão produzidas?

Qual tipo de moldagem será utilizado?

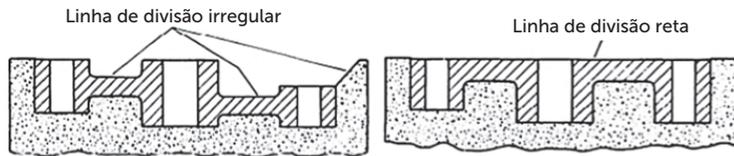
Será necessário o uso de machos no molde?

Para as características do processo escolhido, considerando os aspectos técnicos e econômicos, deve se escolher o tipo de forno onde a liga metálica será fundida. A forma de vazamento do metal no molde será por gravidade ou o processo exige que se utilize pressão?

Quais controles devem ser previstos para assegurar a qualidade das peças e a viabilidade econômica do processo?

Em relação aos detalhes técnicos, uma característica de peças fundidas é o plano de divisão, representado pela Figura 1.18. Esta condição é necessária quando o molde apresenta maior complexidade e exige a divisão em partes, visando sempre à funcionalidade, economia e praticidade.

Figura 1.18 | Linha de divisão num projeto de fundição



Fonte: Baldan e Vieira (2013).



### Exemplificando

Peças fundidas que serão submetidas ao processo de usinagem devem ter dimensões maiores, correspondentes ao desenho da peça acabada. O chamado sobremetal. Em alguns casos, apenas parte da peça será usinado posteriormente.

Outro ponto a ser considerado diz respeito aos cantos vivos, que devem ser evitados, pois podem representar diversos problemas em relação aos resultados do processo de fundição, tais como:

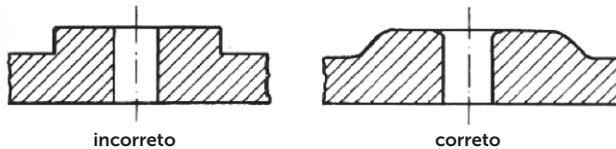
- Na retirada do modelo do molde, os cantos vivos podem acarretar em quebra da areia, descaracterizando a forma da cavidade do molde.
- Presença de trincas por concentrações de tensão nos cantos.
- Surgimento de rebarbas.
- Cantos duros e quebradiços, que dificultam o processo de usinagem das peças.

- Erosão da areia enquanto o metal preenche a cavidade do molde.
- Rechupe por concentração de calor originado nos cantos.

As especificações para os raios de canto nas peças fundidas também é importante para outras características, como a concentração de massa em regiões de encontro entre seções de raios muito acentuados.

Além dos raios de canto, as alterações bruscas de seção devem ser evitadas, possibilitando mudança gradual nas seções das peças fundidas, como vemos na Figura 1.19.

Figura 1.19 | Exemplo de otimização no projeto de uma peça fundida em relação aos raios de canto



Fonte: Chiaverini (1986).



### Faça você mesmo

Existem regras para se especificar os raios de canto que levam em consideração as espessuras de parede das seções que formam esses cantos. Realize uma pesquisa sobre a determinação de raios de canto nas peças fundidas, considerando as diversas possibilidades de dimensões e formas geométricas das peças. Pesquise também sobre os raios de concordância, seções mínimas e ângulos de inclinação mais indicados para cada situação.

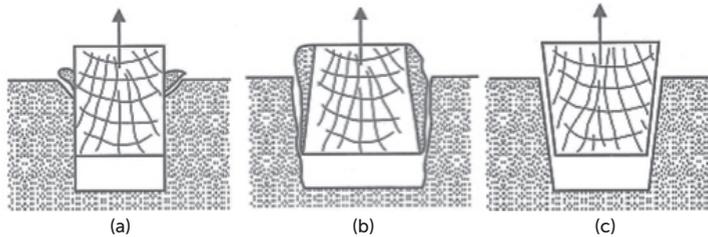
Furos em peças fundidas podem ser obtidos diretamente na fundição, desde que se respeitem as condições mínimas de espessuras de parede e também as ligas metálicas envolvidas.

Em casos em que não é possível obter o furo diretamente por meio da fundição, o mais indicado é deixar o furo para a usinagem posterior.

Alguns tipos de peça fundida ainda podem ter o furo originado na fundição, mas o acabamento e o posicionamento preciso são realizados na usinagem.

Os ângulos de saída também são importantes para facilitar a extração dos modelos do molde, como observamos na Figura 1.20.

Figura 1.20 | Extração do modelo dos moldes: (a) modelo sem ângulo de saída; (b) modelo com contrassaída; e (c) modelo com saída adequada



Fonte: Senai (1987a apud BALDAN, 2013).

Os sistemas de acabamento e rebarbação, bem como os controles necessários, devem ser adequados aos tipos de fundição e aos resultados desejados para as peças fundidas. Estudaremos na Unidade 3, Seção 3.3, aspectos como remoção dos canais e alimentadores, remoção mecânica de rebarbas e acabamento por usinagem e também tipos de defeitos e controle da qualidade das peças fundidas.



### Vocabulário

**Massalote:** também conhecido como alimentador ou montante, é um elemento muito utilizado em processos de fundição e que provém uma reserva de metal líquido, adjacente à peça, compensando os efeitos indesejados da contração no estado líquido e na solidificação, evitando a presença de vazios ou rechupes.

**Rechupe:** tipo de defeito em peças obtidas por fundição, caracterizado pela falta de material em determinada região, provocado, principalmente, pela contração da liga metálica durante a solidificação, causando heterogeneidade estrutural e dimensional.

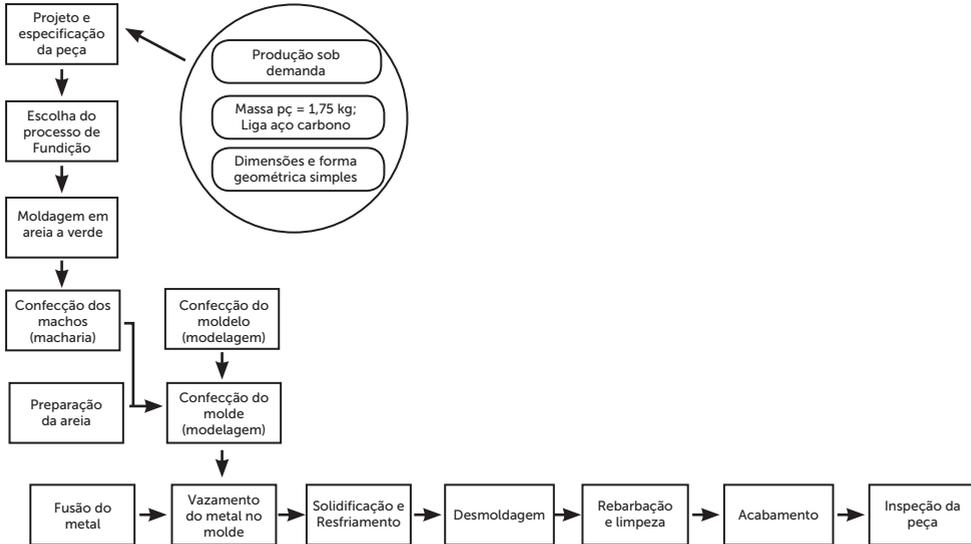
### Sem medo de errar

Após a conclusão de mais essa etapa em suas atividades como engenheiro de desenvolvimento de processos na empresa TF Total Foundry, você resolveu questões relacionadas ao processo mais indicado para uma situação de fundição, e lhe foi solicitado estabelecer um fluxograma do processo de fundição para determinada peça, considerando as etapas do processo segundo as melhores opções de custo, qualidade e prazo.

Agora, você já deve ter compreendido alguns aspectos importantes do processo e está apto a identificar um fluxo de trabalho para uma peça fundida.

Uma forma de representar o fluxograma do processo de uma peça fundida a partir de uma liga de aço de carbono, com massa de 1,75 kg, de forma geométrica relativamente simples e que será produzida sob demanda pode ser conforme a Figura 1.21, a seguir.

Figura 1.21 | Fluxograma de um processo de fundição



Fonte: Groover (2014).



### Atenção

Devido à versatilidade do processo de fundição e às diversas formas de se aplicar diferentes processos em uma mesma peça, existem outras possibilidades de escolha para a peça hipotética em questão. Neste caso, com as mínimas informações fornecidas, a opção pela fundição por moldagem em areia a verde nos parece ser a mais viável.

## Avançando na prática

### Ajustando o processo de fundição em areia

#### Descrição da situação-problema

Como engenheiro de desenvolvimento de processos, você foi convocado a participar de uma reunião em que um cliente da TF Total Foundry apresentou um problema observado em uma peça fundida fornecida pela empresa. No momento da

usinagem por fresamento realizada por este cliente, foi detectado que na superfície da peça surgiram pequenos furos ou vazios, prejudicando o acabamento da peça e causando preocupação em relação à qualidade.

Como você avalia tal problema?

Quais as possíveis origens desse defeito?

O que você sugere para que o processo de fundição garanta que as peças não apresentem tais defeitos?

### Resolução da situação-problema

Na fundição por moldagem em areia a verde, é muito comum que ocorram defeitos em peças fundidas caracterizados por vazios em partes da peça que deveriam possuir massa metálica, defeito também conhecido como porosidade. Isto ocorre principalmente pela ausência de canais de saída de gases e baixa permeabilidade da areia de fundição, o que provoca retenção de ar na cavidade do molde, originando pequenas bolhas de ar, impedindo um perfeito preenchimento que, muitas vezes, só é notado quando a peça é submetida ao processo de usinagem de acabamento.

Ao investigar as causas do problema, você descobriu que os moldes da peça em questão não possuíam canais de saída de gases, que o controle da areia falhou e que o massalote não foi projetado corretamente.

Neste caso, o uso de uma boa areia de moldagem, com as propriedades adequadas, incluindo a permeabilidade, a utilização de canais para facilitar a saída de gases e também o uso de alimentadores (massalote) no projeto do molde devem evitar esses defeitos.

### Faça valer a pena

**1.** Para que uma peça fundida atenda aos mais diversos requisitos, tais como: dimensionais, de acabamento, de propriedades mecânicas, de volume de produção, de custo e de prazo, é necessário seguir algumas regras, que são consideradas fundamentais para o projeto de peças fundidas.

Com relação às regras básicas de um projeto de fundição, analise as afirmações a seguir.

- I. É preciso maior número de seções para formar junções.
- II. É necessário eliminar cantos vivos.

III. Deve-se considerar contrações e sobremetal para usinagem nas tolerâncias dimensionais.

IV. É importante usar saliências e ressaltos tanto quanto possível.

V. É fundamental utilizar reforços e nervuras para melhor eficiência do fundido.

É correto o que se afirma em:

a) I, II e IV.

b) I e IV.

c) II, III e V.

d) I, III e IV

e) Todas as afirmações.

**2.** Para adaptar os projetos das peças aos processos de fundição, vários fatores são importantes e devem ser levadas em consideração questões relacionadas aos aspectos técnicos, econômicos e ambientais. Quando se desenvolve um projeto de uma peça fundida, custo, qualidade e prazo são fundamentais.

Diante do exposto, analise as afirmações a seguir com relação ao que se deve considerar no que diz respeito a custo, qualidade e prazo.

I. Esforços mecânicos a que a peça fundida será submetida.

II. Outros processos de fabricação necessários após a fundição.

III. Uso de tratamentos de superfície na peça após a fundição.

IV. Partes da peça que serão usinadas.

É correto o que se afirma em:

a) I e II.

b) III e IV.

c) I e III.

d) II e IV.

e) Todas as afirmações.

**3.** Quando o projeto de uma peça fundida e a construção de um ferramental de fundição apresenta certa complexidade geométrica, é necessário que o molde seja dividido em partes. O chamado "plano de divisão" considera as especificações da peça e sua importância para que seja definido.

Analisando as figuras a seguir, quais são, respectivamente, as melhores

condições de plano de divisão, raios de arredondamento e ângulos de saída?

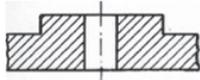


Figura (1)

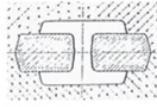


Figura (2)

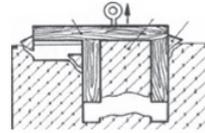


Figura (3)

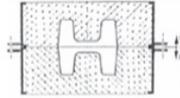


Figura (4)



Figura (5)



Figura (6)

- a) 4, 5 e 6.
- b) 1, 2 e 3.
- c) 3, 5 e 6.
- d) 2, 3 e 5
- e) 3, 2 e 1.



# Referências

BALDAM, Roquemar de Lima; VIEIRA, Estéfano Aparecido. **Fundição**: processos e tecnologias correlatas. São Paulo: Érica, 2013.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica**: processos de fabricação e tratamento. 3. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

GROOVER, Mikell P. **Introdução aos processos de fabricação**. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Aço e sustentabilidade**. Disponível em: <[http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/Folder\\_Sustentabilidade\\_AcoBrasil\\_2016.pdf](http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/Folder_Sustentabilidade_AcoBrasil_2016.pdf)>. Acesso em: 18 jul. 2016.

\_\_\_\_\_. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/aco/introducao.asp>>. Acesso em: 18 jul. 2016.

\_\_\_\_\_. O Aço. Disponível em: <[http://www.acobrasil.org.br/site2015/introducao\\_historia.html](http://www.acobrasil.org.br/site2015/introducao_historia.html)>. Acesso em: 18 jul. 2016.

RUBIO, J. C. C.; PANZERA, T. H.; NOGUEIRA, W. A. Qualidade superficial de peças de alumínio fundidas em molde de areia. **Revista Matéria**, v. 11, n. 2, p. 125-137, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rmat/v11n2/a06v11n2.pdf>>. Acesso em: 2 ago. 2016.

SILVA, C. E. da et al. Influência da areia de cura a frio reutilizada nas propriedades mecânicas e características superficiais de moldes empregados em fundição. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, n. 65, p. 73-78, jan./mar. 2012. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rem/v65n1/a10v65n1.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2016.

WIKIPÉDIA. **Bloco de motor**. Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Bloco\\_do\\_motor](https://pt.wikipedia.org/wiki/Bloco_do_motor)>. Acesso em: 28 jul. 2016.

\_\_\_\_\_. **Bloomery**. Disponível em: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Bloomery>>. Acesso em: 19 jul. 2016.

\_\_\_\_\_. **Blast furnace**. Disponível em: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Blast\\_furnace](https://en.wikipedia.org/wiki/Blast_furnace)>. Acesso em: 19 jul. 2016.

\_\_\_\_\_. **Processos de Bessemer**. Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Processo\\_de\\_Bessemer](https://pt.wikipedia.org/wiki/Processo_de_Bessemer)>. Acesso em: 19 jul. 2016.



# Equipamentos de fundição

### Convite ao estudo

Olá, aluno!

Iniciamos agora a Unidade 2 da disciplina Fundição e processos siderúrgicos. Na Unidade 1, você foi capaz de compreender o que é a fundição, conhecer a importância dos processos de fundição e siderurgia, aspectos mercadológicos e econômicos, a relação com outros processos de fabricação, as áreas do conhecimento envolvidas, algumas características sobre projetos de peças fundidas e quais são as alternativas mais viáveis para tomadas de decisão para a fabricação.

Nesta etapa, vamos tratar dos equipamentos utilizados nos diferentes processos de fundição. Este conhecimento é muito importante para a compreensão de sua aplicação.

A TF Total Foundry é uma empresa que está desenvolvendo um produto a partir de uma liga de aço para uso em eletrodomésticos. Neste momento, você está sendo convidado a participar da elaboração do planejamento do fluxo de material ao longo do processo.

Você deve preparar um sistema de movimentação de materiais, considerando a fundição por moldagem em areia a verde, desenvolvida para peças de geometria relativamente simples, de liga de aço de baixo teor de carbono, com propriedades mecânicas de 410 MPa de limite de resistência à tração, 250 MPa de limite de escoamento, alongamento de 34% e massa igual a 1,75 kg. Contudo, a produção será em maiores volumes, na ordem de 5 mil peças por mês.



## Seção 2.1

### Fundição: ferramentas e equipamentos

#### Diálogo aberto

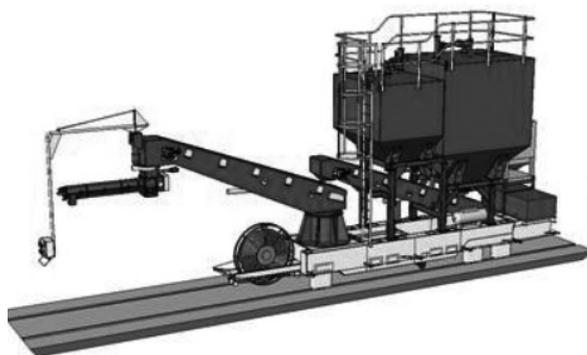
Você está em progresso com suas atividades como engenheiro de desenvolvimento de processos em uma empresa de fundição de peças metálicas, a TF Total Foundry.

Como você já teve a oportunidade de compreender algumas situações do processo de fundição e as suas características, é o momento de conhecer quais são os equipamentos envolvidos na fundição e propor novas soluções.

A TF Total Foundry está desenvolvendo um produto a partir de uma liga de aço para uso em eletrodomésticos. Neste momento, você está sendo convidado a participar da elaboração do planejamento do fluxo de material ao longo do processo.

Você deve preparar um sistema de movimentação de materiais, considerando a fundição por moldagem em areia a verde, desenvolvida para peças de geometria relativamente simples, de liga de aço de baixo teor de carbono, com propriedades mecânicas de 410 MPa de limite de resistência à tração, 250 MPa de limite de escoamento, alongamento de 34% e massa igual a 1,75 kg. Contudo, a produção será em maiores volumes, na ordem de 5 mil peças por mês.

Figura 2.1 | Misturador móvel de areia de fundição



<<http://www.fmslimited.co.uk/documents/sandmixers.pdf>>. p. 8. Acesso em: 26 ago. 2016.

## Não pode faltar

O processo de fundição permite mecanizar e automatizar muitas de suas etapas tornando a fundição mais ágil e produtiva. Os diversos equipamentos utilizados nos processos de fundição têm tamanhos e funções variados, facilitando os projetos com o uso de softwares para desenho, engenharia, manufatura e simulação, os fornos de fusão das ligas metálicas, a movimentação de materiais, máquinas ferramenta para usinagem de modelos e moldes, entre outros. A simulação computadorizada dos processos de fundição envolve desde os aspectos de forma das peças, resistência aos esforços a que serão submetidas, possíveis defeitos que podem surgir, controle de temperatura em vários momentos desde o vazamento do metal líquido até a solidificação, projeto de sistema de canais de enchimento, até estudo de fatores como pressão do metal líquido no molde, dimensionamento dos moldes e utilização de alimentadores e resfriadores, volume de metal que será utilizado no projeto da peça, melhores condições de acabamento, tratamento térmico posterior, sempre com o objetivo de reduzir custos, otimizar o processo e melhorar a qualidade das peças fundidas.

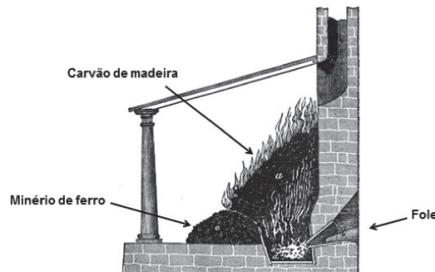


### Exemplificando

Na mineração, a extração é realizada por meio de equipamentos apropriados. Para o transporte dos minérios, são utilizadas esteiras transportadoras. No alto-forno, que é um dos equipamentos de grande porte utilizados na siderurgia, minério de ferro, coque e fundente são carregados até a parte superior por transportadores mecanizados.

Na fundição por gravidade, o metal no estado líquido é derramado no molde apenas pela ação da gravidade, sendo que a cavidade do molde deve ser totalmente preenchida. Para que isso seja possível nos processos de fundição em que existe pressão forçada para empurrar o metal para dentro do molde, os projetos devem considerar as condições de trabalho, como altura do canal de enchimento, geometria da peça a ser fundida, características do material do molde, liga metálica utilizada e vazão do metal líquido. A fundição por gravidade pode ser empregada para os processos de fundição em areia a verde, *shell molding*, cera perdida, moldes metálicos (coquilha) e outros. No processo *shell molding*, a moldagem é feita por uma placa modelo metálica, que representa a geometria da peça a ser fundida e, normalmente, consiste de duas partes, conforme Figura 2.2.

Figura 2.2 | Placa modelo para moldagem *shell*



Fonte: <<http://www.indiamart.com/proddetail/shell-molding-pattern-11575905755.html>>. Acesso em: 30 ago. 2016.

Após a confecção dos modelos, é montada a caixa de moldagem, onde a areia, preparada com aglomerantes e ligantes, é colocada com os modelos preaquecidos. Após a confecção dos modelos, é montada. A areia, ao entrar em contato com o modelo, sinteriza, formando o contorno da peça a ser fundida. A caixa é virada a 180°, e a areia não sinterizada é recolhida para ser utilizada em outra moldagem. Com as duas meias moldagens formadas, as cascas (*shell*) são levadas a um forno para cura do molde. O molde é endurecido pela reação dos elementos da areia provocada pelo aquecimento, conforme Figuras 2.3 e 2.4.

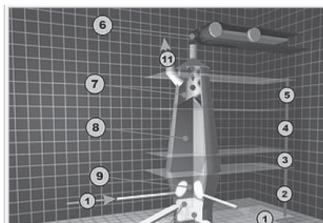
Figura 2.3 | Preenchimento das caixas de moldagem com areia preparada



Fonte: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Shell\\_molding](https://en.wikipedia.org/wiki/Shell_molding)>. Acesso em: 30 ago. 2016.

Com os moldes prontos, é possível vaziar o metal líquido para obtenção das peças fundidas por *shell molding*.

Figura 2.4 | Enchimento do molde com o metal líquido



Fonte: <[https://www.sfsa.org/tutorials/ice\\_cleat/iccleat\\_013.htm](https://www.sfsa.org/tutorials/ice_cleat/iccleat_013.htm)>. Acesso em: 30 ago. 2016.

Outro processo que utiliza o enchimento dos moldes pela ação da gravidade é o processo de fundição em moldagem por cera perdida. Nele, os modelos são obtidos a partir da prensagem da cera em matrizes metálicas, conforme Figura 2.5. Com isso, os modelos apresentam maior precisão dimensional e de forma, podendo obter peças com detalhes muito pequenos e excelente acabamento superficial.

Figura 2.5 | Preparação dos modelos de cera



Fonte: <[http://www.rioinox.com/index\\_arquivos/microfusao.htm](http://www.rioinox.com/index_arquivos/microfusao.htm)>. Acesso em: 30 ago. 2016.

O processo consiste em montar os modelos de cera em uma “árvore de modelos”, conforme Figura 2.6, que será envolvida com uma areia preparada, conhecida como lama refratária, resultando em um molde que, após seguidas operações de imersão nessa lama refratária, é levado ao forno para cura.

Figura 2.6 | Montagem da árvore de modelos



Fonte: <[http://www.rioinox.com/index\\_arquivos/microfusao.htm](http://www.rioinox.com/index_arquivos/microfusao.htm)>. Acesso em: 30 ago. 2016.

Como os modelos de cera estão fixados no interior do molde, o aquecimento faz com que a cera derreta e libere os espaços para receber o metal líquido, daí o termo “cera perdida” (conforme Figura 2.7).

Figura 2.7 | Aquecimento do molde para cura e derretimento da cera



Fonte: <[http://www.rioinox.com/index\\_arquivos/microfusao.htm](http://www.rioinox.com/index_arquivos/microfusao.htm)>. Acesso em: 30 ago. 2016.

Com os moldes prontos, é realizado o vazamento do metal líquido no molde para a obtenção da peça fundida (conforme Figura 2.8).

Figura 2.8 | Vazamento do metal líquido no molde



Fonte: <[http://www.rioinox.com/index\\_arquivos/microfusao.htm](http://www.rioinox.com/index_arquivos/microfusao.htm)>. Acesso em: 30 ago. 2016.

A automatização é utilizada para a confecção dos modelos das peças na fundição, sendo que o desenho deste modelo já é feito pelo computador, com softwares apropriados e, em seguida, obtém-se um programa que considera a sequência de operações e coordena os movimentos das ferramentas nas máquinas de usinagem que irão formar a geometria do modelo conforme ilustra a Figura 2.9.

Figura 2.9 | Usinagem de modelo para fundição



Fonte: <<https://www.youtube.com/watch?v=2sYWxNC3928>>. Acesso em: 2 set. 2016.

Já para a fundição por moldagem em casca, também conhecida como "*shell molding*", a elaboração do modelo ocorre a partir da usinagem de uma placa de aço, normalmente em duas partes, que usa também os recursos de mecanização e automatização, pois os desenhos dos modelos podem ser obtidos por softwares, sendo que a usinagem é feita por equipamentos correspondentes, como as fresadoras e tornos.



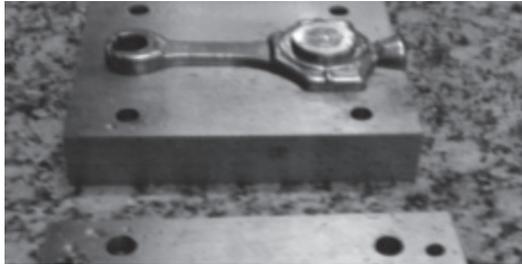
### Assimile

As placas modelo para o processo de fundição *shell molding* devem ser construídas de metal, no caso mais comum, de aço, pois, neste tipo de fundição, a areia entra em contato com o modelo de metal previamente aquecido e sinteriza para formar um contorno que dá origem ao termo "casca". É por isso que a obtenção dos modelos na fundição *shell molding* considera a usinagem por meio de máquinas ferramenta.

O processo de fundição em cera perdida é um dos tipos de fundição em que a confecção dos modelos utiliza diversos equipamentos, tais como máquinas de usinagem para as matrizes metálicas e prensas para a compactação dos modelos de cera nas matrizes. Trata-se da obtenção dos modelos por prensagem da cera em moldes metálicos, que são construídos utilizando os recursos semelhantes aos do processo *shell molding*, ou seja, projetos, desenhos e manufatura auxiliados por computador e usinagem em máquinas ferramenta, além das prensas. Outro tipo de processo de fundição que utiliza recursos como softwares para os projetos, desenhos e máquinas de usinagem para as matrizes é a fundição em moldes metálicos, também conhecida como fundição em moldes permanentes.

Nesta variação dos processos de fundição, os moldes, que normalmente são construídos de aço, podem ser obtidos a partir de uma sequência de operações que inclui o projeto por computador, o desenho e a usinagem nas máquinas-ferramenta, conforme Figuras 2.10 e 2.11.

Figura 2.10 | Simulação 3D do processo de fundição



Fonte: <[http://www.magmaflow.com.br/pt\\_BR/solutions/castingdesign.html](http://www.magmaflow.com.br/pt_BR/solutions/castingdesign.html)>. Acesso em: 2 set. 2016.

Figura 2.11 | Usinagem de matrizes para fundição



Fonte: <<http://www.almater.com.br/usinagem.html>>. Acesso em: 2 set. 2016.



### Pesquise mais

Leia o artigo a seguir:

FERNANDES, F. C. F.; LEITE, R. B. Automação industrial e sistemas informatizados de gestão da produção em fundições de mercado. **Gestão & Produção**, v. 9, n. 3, p. 313-344, dez. 2002. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/gp/v9n3/14572.pdf>>. Acesso em: 2 set. 2016

Em seguida, abordaremos a confecção dos moldes de fundição. No caso dos moldes em areia, é necessário que a mistura seja preparada e homogeneizada antes da moldagem. Já vimos que as areias utilizadas na fundição necessitam ter propriedades características que determinam a qualidade do processo, entre elas, destacamos a resistência para suportar o fluxo da liga metálica líquida e, também, a permeabilidade. Para misturar os componentes da areia de fundição, a mecanização também se faz presente, como ilustra a Figura 2.12, a seguir.

Figura 2.12 | Misturador de areia de alta intensidade



Fonte: <<http://www.ftfoundryequipment.co.uk/green-sand-mixing-and-processing.html>>. Acesso em: 26 ago. 2016

Após a preparação e a mistura da areia de fundição, já é possível iniciar a moldagem. Mas por que a areia de fundição deve ser compactada nos moldes? A compactação é necessária para que resulte em um molde com o máximo de homogeneidade e represente a forma e as dimensões da peça com maior precisão na cavidade do molde. Para a compactação da areia sobre os modelos nas caixas de moldagem, os processos mais usuais são: compressão, impacto e a combinação da compressão com o impacto, que são realizados por prensas, conforme a Figura 2.13.

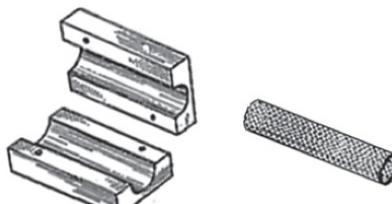
Figura 2.13 | Prensa para compactação de areia em moldes de fundição



Fonte: <[http://www.disagroup.com/pt/sites/disa/content/equipment/molding\\_solutions/jolt\\_squeeze\\_lines.aspx](http://www.disagroup.com/pt/sites/disa/content/equipment/molding_solutions/jolt_squeeze_lines.aspx)>. Acesso em: 29 ago. 2016

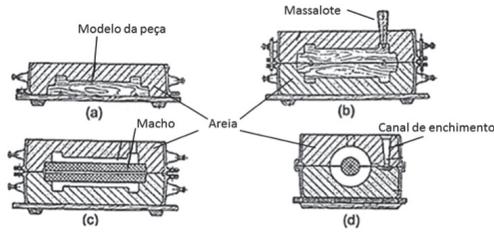
É comum, também, o uso de meias moldagens (moldagem em separado das caixas superiores e inferiores). Neste caso, a compactação pode ser realizada por dois equipamentos simultâneos. A moldagem mecanizada está ilustrada nas Figuras 2.14 e 2.15.

Figura 2.14 | Esquema de ciclo rápido de moldagem em areia a verde



Fonte: <<http://www.ofml.net/category/fast-loop>>. Acesso em: 26 ago. 2016.

Figura 2.15 | Linha de moldagem mecanizada



Fonte: <<http://www.hansberg.com/application/green-sand-molding-automotive-castings>>. Acesso em: 26 ago. 2016.



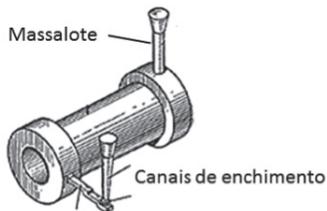
### Refleta

Para o planejamento do processo de fundição, a utilização de equipamentos e ferramentas diversas contribui muito para a rapidez, a produtividade e a qualidade das peças fundidas. Em todos os processos de fundição são necessários usar os recursos mais avançados em tecnologia disponíveis?

Quando se desenvolve um processo de fabricação por meio da fundição de ligas metálicas, qual é a importância de se analisar a viabilidade técnica e econômica?

Já para o vazamento do metal no molde, temos os equipamentos de movimentação e transporte, nos quais o molde é levado por uma esteira transportadora até o setor em que será preenchido com metal líquido. Nesse setor, existem cadinhos que carregam o metal líquido desde o forno de fusão. A automação e a mecanização, neste caso, têm, além do aspecto da produtividade, a questão de segurança, pois elimina ao máximo o contato do homem com os materiais em altas temperaturas, bem como o transporte manual cargas.

Figura 2.16 | Ilustração esquemática de um braço mecânico para vazamento do metal líquido



Fonte <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABUn8AI/pf-automatizacao?part=2>>. Acesso em: 26 ago. 2016

Nas diversas etapas do processo de fundição, materiais, ferramentas, utensílios, acessórios e peças são transportados, movimentados e armazenados, utilizando equipamentos próprios para estas finalidades.

É possível usar a mecanização e a automatização no processo de fundição, desde o recebimento das ligas metálicas (matérias-primas), passando pela fusão, vazamento do metal líquido nos moldes, desmoldagem, rebarbação e limpeza e inspeção. Para a desmoldagem, é muito utilizada a esteira vibratória, que facilita o processo, quebrando o molde de areia e transportando as peças fundidas para a área de limpeza e rebarbação. A areia que vai se soltando da peça fundida é coletada para dutos de recirculação para posterior separação e destinação apropriada.



### Vocabulário

**Automatização:** é a conversão das tarefas manuais em automáticas, pela adoção de um sistema inteligente em que ocorra a interação entre máquinas e homens.

**Mecanização:** é a substituição do trabalho do homem pelo uso de ferramentas ou máquinas, deixando de realizar manualmente algumas tarefas.

**Software:** é um programa de computador fundamentado em componentes lógicos capazes de controlar e comandar o funcionamento e estabelecer rotinas em máquinas por meio de uma sequência de instruções.

**Shell Molding:** é o processo de fundição de ligas metálicas que utiliza um molde que representa apenas o contorno do modelo e se assemelha a uma casca, também conhecido como moldagem em casca.

**Sinterização:** é o processo de aglutinação de partículas sólidas por aquecimento em temperaturas abaixo da temperatura de fusão.

Fonte: <<http://www.cimm.com.br/portal/verbetes/exibir/1641-sinterizacao>>. Acesso em: 7 out. 2016.

### Sem medo de errar

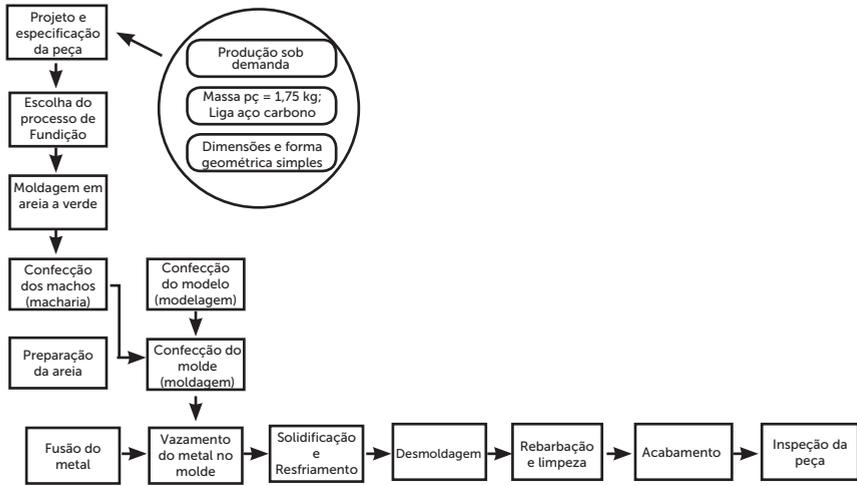
Nesta seção, buscamos explorar algumas das diversas ferramentas e equipamentos utilizados em fundição e suas características de aplicação. Lembrando que você é um engenheiro que está em plena evolução em sua atuação no setor de desenvolvimento de processos da empresa de fundição de peças metálicas e que já teve a oportunidade de participar de algumas situações relacionadas a isso, você está sendo convidado agora a atuar no planejamento de um sistema de movimentação das peças ao longo do processo, considerando a fundição para as

peças de aço carbono, com massa de 1,75 kg, geometria relativamente simples, com propriedades mecânicas de 410 MPa de limite de resistência à tração, 250 MPa de limite de escoamento e alongamento de 34%, que agora serão produzidas em maior escala, na ordem de 5 mil peças por mês. Quais etapas do processo serão abrangidas pelo sistema de movimentação? Quais são as formas de movimentação escolhidas? Que tipos de equipamentos serão utilizados?

De acordo com as informações fornecidas e recorrendo ao fluxo do processo elaborado na seção anterior, conforme a Figura 2.17, a seguir, é possível estabelecer o seguinte planejamento de uso de sistemas de movimentação:

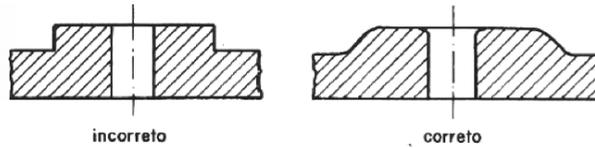
- O recebimento da matéria-prima deve ocorrer em uma área com espaço adequado para a circulação dos veículos de transporte do material e o descarregamento pode ser realizado com empilhadeiras que irão armazenar os lingotes no local de estocagem.
- Os lingotes podem ser movimentados até o setor de fusão por meio de uma empilhadeira ou, se houver possibilidade, pode ser melhorado com o uso de esteiras transportadoras, conforme a Figura 2.18, diretamente para os fornos de fusão.
- Após a fusão do aço, ele será despejado em cadinhos apropriados que serão levados até o setor de vazamento nos moldes de areia, usando carros de carga ou empilhadeiras.
- Já os moldes serão obtidos com a areia previamente preparada nos misturadores, que enviarão por meio de dutos diretamente para a moldagem e compactação mecanizada dos moldes.
- O aço líquido, ao chegar até o setor de vazamento nos moldes, será despejado pelos viradores no cadinho e preencherá os moldes, sendo que os cadinhos retornarão para o setor de fusão.
- Após a solidificação das peças, os moldes serão transportados em esteiras vibratórias para facilitar a desmoldagem.
- As peças serão descarregadas no setor de rebarbação e limpeza e, posteriormente, seguirão também por esteiras transportadoras, de acordo com a Figura 2.19, para a inspeção de qualidade e embalagem.

Figura 2.17 | Fluxograma de um processo de fundição



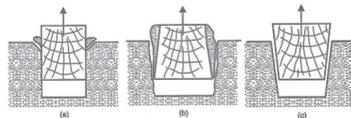
Fonte: adaptada de Groover (2014).

Figura 2.18 | Esteira transportadora



Fonte: <<http://www.rossil.com.br/monovias.php>>. Acesso em: 2 set. 2016.

Figura 2.19 | Esteira transportadora



Fonte: <<http://www.rossil.com.br/Esteiras-Transportadoras.php>>. Acesso em: 2 set. 2016.

## Avançando na prática

### Utilizando melhor os recursos na fundição em areia

#### Descrição da situação-problema

Em sua jornada pelas atividades de engenheiro de desenvolvimento de processos na empresa fabricante de peças fundidas, você já percebeu que são muitos os desafios para alcançar os melhores resultados em termos técnicos e econômicos.

Neste momento, a tarefa que você está sendo incumbido de conduzir se refere ao consumo e ao descarte das areias de moldagem usadas na fundição.

A empresa entende que está gastando muito na reposição da areia para produzir os moldes das peças. Perde-se muito na movimentação e no transporte manual, o que requer a compra de um volume maior de areia virgem.

O que você recomenda para que a empresa reduza o consumo da areia, aproveite-a melhor no seu reuso e tenha custos compatíveis com as exigências de mercado?

#### Resolução da situação-problema

A utilização de areia nos processos de fundição se torna um problema para os fundidores a partir do momento em que originam resíduos sólidos.

Na fundição em areia a verde, boa parte da areia usada nos moldes pode ser reaproveitada para fabricar novos moldes. É possível, ainda, o reuso da areia em outros processos de fundição, como o processo de cura a frio.

Uma necessidade para ser sugerida à empresa é a aquisição de regeneradores de areia.

Outro ponto a destacar é a sistematização da circulação da areia por meio de dutos, possibilitando a redução do desperdício provocado pela movimentação manual.

Após a moldagem, o vazamento do metal líquido e a solidificação das peças, é possível instalar um sistema de esteira transportadora com mecanismo vibratório para facilitar a desmoldagem e coletar a areia.

Você também pode sugerir que parte da areia que não for reaproveitada para novas moldagens seja direcionada para a produção de outros produtos, que podem usá-la como elemento de base para pavimentação, por exemplo.

### Faça valer a pena

**1.** Em relação à automatização na fundição, podemos utilizar os programas de computador para a obtenção do desenho e do projeto do fundido, até a usinagem dos modelos em máquinas ferramenta, que irão resultar nas dimensões e forma da geometria do modelo.

Assinale a alternativa que preenche corretamente as lacunas a seguir.

O processo de fundição \_\_\_\_\_ é um dos tipos de fundição em que a confecção dos modelos utiliza diversos equipamentos, tais como máquinas de usinagem para as \_\_\_\_\_ e prensas para a compactação dos modelos de \_\_\_\_\_ nas matrizes.

- a) Em areia; cascas; madeira.
- b) Em cera perdida; matrizes metálicas; cera.
- c) *Shell*; placas modelo; metal.
- d) Em moldes metálicos; matrizes; resina.
- e) Areia a verde; partes do modelo; alumínio.

**2.** O vazamento do metal no molde tem início com o uso de equipamentos de movimentação e transporte, em que o molde é levado por uma esteira transportadora até o setor onde será preenchido com metal líquido. Nesse setor, existem cadinhos que carregam o metal líquido desde o forno de fusão.

Leia as afirmações a seguir e assinale verdadeiro (V) para as corretas e falso (F) para as incorretas e, em seguida, assinale a alternativa correta:

(    ) Os cadinhos com o metal líquido são movimentados por braços mecânicos.

(    ) O vazamento do metal líquido no molde ocorre durante a movimentação da esteira.

(    ) O molde de areia é transportado do setor de fusão para que seja preenchido.

(    ) O molde de areia é transportado do setor de moldagem para o setor de vazamento do metal líquido.

- a) F – V – V – F.
- b) V – F – F – V.
- c) V – V – V – F.
- d) F – V – F – F.
- e) V – F – V – V.

**3.** A mecanização e a automatização estão presentes nas diversas etapas do processo de fundição, em que materiais, ferramentas, utensílios, acessórios e peças são transportadas, movimentadas e armazenadas, utilizando equipamentos próprios para essas finalidades.

A mecanização e a automatização no processo de fundição ocorrem desde o recebimento das ligas metálicas, passando pela fusão, obtenção dos modelos, moldagem, vazamento do metal líquido nos moldes, desmoldagem, rebarbação e limpeza e inspeção.

#### Porque

Os moldes de fundição são muito grandes e frágeis e não podem ser manuseados.

- a) As duas afirmações são proposições verdadeiras, mas a segunda não é uma justificativa para a primeira.
- b) As duas afirmações são proposições verdadeiras, e a segunda é uma justificativa correta da primeira.
- c) A primeira afirmação é uma proposição verdadeira, e a segunda é uma proposição falsa.
- d) A primeira afirmação é uma proposição falsa, e a segunda é uma proposição verdadeira.
- e) As duas afirmações são proposições falsas.

# Seção 2.2

## Moldes, injetoras, centrífugas e lingoteiras

### Diálogo aberto

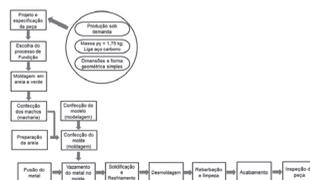
Caro aluno, bem-vindo à Seção 2.2 da disciplina Fundição e processos siderúrgicos. Após estudar a mecanização e a automatização da fundição, apresentamos agora, nesta Unidade 2, aspectos relacionados aos tipos de moldes não perecíveis, máquinas para fundição sob pressão, para fundição centrífuga e lingotamento contínuo.

Você foi contratado por uma empresa que está desenvolvendo novos processos de fundição e necessita de seus conhecimentos para definir algumas questões relacionadas a um novo produto.

Como você já aprendeu alguns conceitos relacionados aos equipamentos utilizados na fundição, é possível definir um processo de fundição para que a empresa possa se manter competitiva no mercado em que atua?

Ao final desta seção, você deverá ser capaz de indicar as melhorias alternativas de produção de uma determinada liga metálica, considerando os equipamentos de fundição.

Figura 2.20 | Matriz para fundição em coquilha (enchimento por gravidade)



Fonte: arquivo pessoal do autor.

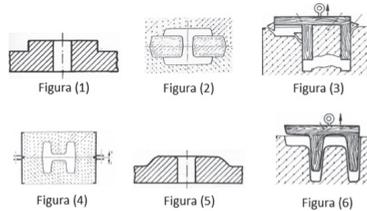
## Não pode faltar

No processo de fundição, os moldes podem ser perecíveis, à base de areia, uma vez que são destruídos após a solidificação das peças, ou também, podem ser usados os chamados moldes permanentes, confeccionados de ferro fundido ou aço tratado.

Nesta seção, trataremos dos moldes não perecíveis. Quando se usa um molde de areia, que é destruído após a fundição, faz-se necessário ter outro molde para outra peça. Já na fundição usando moldes metálicos, é possível reutilizá-lo várias vezes. Isto, com certeza, é uma vantagem em relação aos moldes perecíveis.

Nesta categoria de moldes permanentes, temos a fundição por gravidade em coquilha (Figura 2.21), a fundição sob pressão, a fundição centrífuga e um processo capaz de fundir ligas metálicas ferrosas além das não ferrosas, que é o lingotamento contínuo.

Figura 2.21 | Coquilha para fundição com vazamento por gravidade



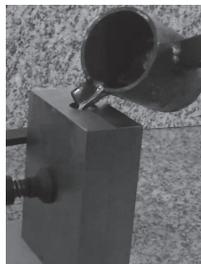
Fonte: <<http://www.moldmetal.com.br/coquilha.php>>. Acesso em: 9 set. 2016.



### Exemplificando

Na fundição, quando o vazamento do metal líquido ocorre pela ação da gravidade (Figura 2.22), não temos a presença de uma pressão forçando o material a preencher a cavidade do molde. Este tipo de enchimento do molde de fundição é utilizado tanto em moldes de areia, quanto em moldes metálicos (coquilha).

Figura 2.22 | Vazamento por gravidade em molde metálico



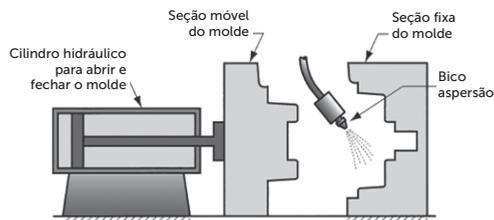
Fonte: arquivo pessoal do autor.

Na fundição em molde permanente, o molde metálico é fabricado, geralmente, em duas partes. O projeto deve considerar a abertura e o fechamento do molde. A forma da peça a ser fundida é obtida na cavidade onde o sistema de canais também é incluído. Isto permite melhor acabamento superficial e precisão dimensional.

Em geral, as ligas metálicas utilizadas na fundição em moldes metálicos são alumínio, cobre, magnésio, zinco e, em alguns casos, o ferro fundido.

Antes de o metal ser vazado, o molde metálico é preaquecido para facilitar o fluxo de metal no molde e também ocorre a limpeza por meio de sopros de ar e aspersão de elementos lubrificantes e de recobrimento (Figura 2.23). Quando o metal se solidifica, o molde é aberto para que a peça fundida seja retirada. Então, ele é novamente fechado e se inicia um novo ciclo.

Figura 2.23 | Ilustração de molde para fundição por injeção e aspersão de lubrificante

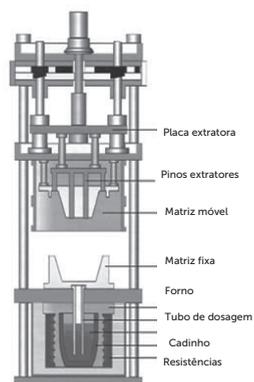


Fonte: adaptada de Groove (2014).

Em relação ao processo de fundição em moldes metálicos sob pressão, podemos ter a variação entre fundição em baixa pressão e fundição em alta pressão.

Na fundição em baixa pressão, o metal líquido é pressionado para a cavidade com pressão em torno de 0,2 até 1 bar, ou 0,1 MPa, estando localizado em um forno, abaixo do molde, e injetado direto do forno para o molde, de baixo para cima, conforme ilustra a Figura 2.24.

Figura 2.24 | Processo de fundição em baixa pressão



Fonte: adaptado de <[http://www.lmctechnology.com/counter\\_pressure.html](http://www.lmctechnology.com/counter_pressure.html)>. Acesso em: 29 nov. 2016.



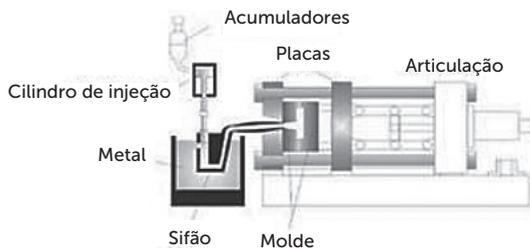
### Assimile

Nos processos de fundição sob pressão — tanto baixa quanto alta pressão —, é comum utilizar equipamentos para possibilitar a ação das pressões envolvidas para o fechamento e a abertura dos moldes e, também, para a extração das peças. Nos processos de fundição em coquilha, em que o vazamento é realizado por gravidade, é possível que o fechamento e a abertura do molde sejam manuais, mas é bastante usual, na produção industrial, o uso de equipamentos mecanizados e automatizados também nesta variação do processo.

Na fundição em alta pressão, o metal líquido é pressionado para a cavidade do molde sob pressões típicas, que vão de 7 a 350 MPa (70 a 3500 bar). Enquanto o metal solidifica, a pressão é mantida e, após a abertura do molde, a peça retirada. Neste tipo de fundição, os moldes também são conhecidos como matrizes, em inglês *die casting*.

Para possibilitar que o processo de fundição sob pressão ocorra, são necessárias máquinas específicas que reúnam características para fechamento das partes do molde e mantenham o fechamento mesmo quando o metal está sendo pressionado na cavidade. As máquinas de fundição podem ser de câmara quente ou câmara fria. Elas têm formas diferentes de injetar o metal fundido na cavidade. Nas máquinas de câmara quente, como na Figura 2.25, o metal permanece fundido em um recipiente junto à máquina, e um êmbolo força o metal líquido sob alta pressão para a cavidade da matriz. É possível encontrar máquinas com capacidade de produção de até 500 peças por hora. Na fundição sob pressão em câmara quente, o desgaste no sistema de injeção é um aspecto desfavorável, tornando o processo limitado às ligas metálicas de baixo ponto de fusão que não apresentem reação química com os componentes mecânicos da máquina. Os metais usuais utilizados nestes processos são zinco, estanho, chumbo e, às vezes, magnésio.

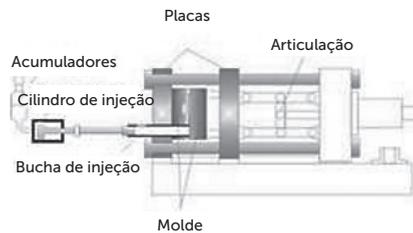
Figura 2.25 | Ilustração de máquina de fundição sob pressão em câmara quente



Fonte: adaptado de <<http://www.themetalcasting.com/pressure-die-casting.html>>. Acesso em: 29 nov. 2016.

Na fundição sob pressão em câmara fria, conforme Figura 2.26, o metal líquido é vazado em uma câmara não aquecida por meio de um recipiente externo, como um cadinho. Um êmbolo é usado para forçar o metal a entrar na cavidade do molde sob alta pressão. As pressões de injeção usadas nas máquinas de câmara fria são da ordem de 14 a 140 MPa (de 140 a 1400 bar). Comparando as máquinas de câmara fria com as de câmara quente, temos que os ciclos de produção são mais longos em câmara quente, pois existe a necessidade de transferir o metal líquido para a máquina. Contudo, a fundição em máquinas de câmara fria apresenta alta produção. As ligas metálicas usuais nas máquinas de câmara fria são alumínio, latão e ligas de magnésio. Também é possível utilizar ligas metálicas com ponto de fusão mais baixo, como o estanho, o chumbo e o zinco, em máquinas de câmara-fria. Entretanto, é mais vantajoso que essas ligas sejam fundidas em processo de câmara-quente.

Figura 2.26 | Ilustração de máquina de fundição sob pressão em câmara fria



Fonte: adaptado de <<http://www.themetalcasting.com/pressure-die-casting.html>>. Acesso em: 29 nov. 2016.

Ainda em relação aos moldes utilizados na fundição, em moldes metálicos, os materiais de construção dos moldes (matrizes) são, em geral, aços tratados e ferros fundidos, sendo que, para a fundição sob pressão, os preferidos são aços de médio teor de carbono, aços ferramenta e aço maraging. Na fundição sob pressão, também são utilizados, no projeto das matrizes, pinos extratores para facilitar a retirada das peças. E em relação ao projeto das matrizes, é necessário considerar canais para possibilitar a saída de gases e ar, pois o material das matrizes não tem permeabilidade. Esses canais e furos são muito pequenos, mas é comum que também sejam preenchidos com metal que irá constituir rebarbas na peça, que deverão ser removidos na etapa de rebarbação. Neste tipo de fundição, é comum o uso de desmoldantes, também conhecidos pelos efeitos lubrificantes, que são aspergidos nas cavidades das matrizes para que não ocorra travamento. Esses lubrificantes são de diversas origens, sendo os mais usuais os óleos, as ceras e os silicones. Entre as vantagens da fundição sob pressão, podemos citar o bom acabamento superficial, a capacidade de produção, menores espessuras de parede, a viabilidade de produção de lotes maiores, tolerâncias mais estreitas quando comparado aos processos de fundição em areia e maior resistência mecânica das peças fundidas sob pressão.

Contudo, a fundição sob pressão se limita às ligas não ferrosas, com raras exceções ao uso de ferro fundido, e limita, também, o tamanho das peças que,

nesse processo, não costumam exceder 5 kg, além de existir a possibilidade de retenção de ar na cavidade das matrizes e a restrição de forma, o que pode dificultar a retirada da peça solidificada da cavidade da matriz.



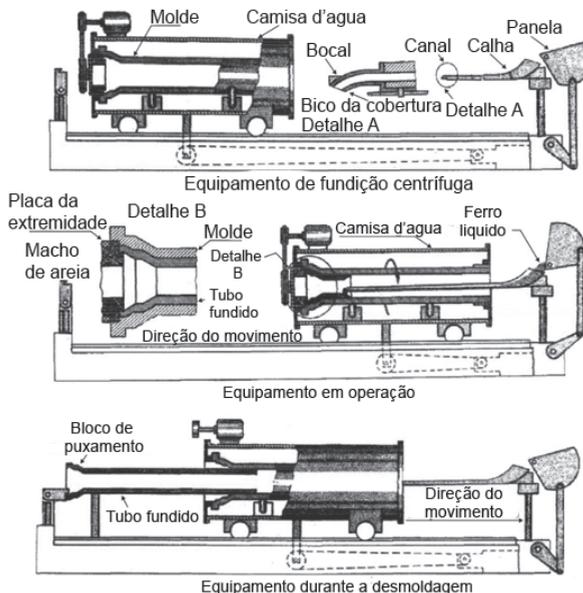
### Pesquise mais

Para conhecer um pouco mais sobre fundição sob pressão, fundição centrífuga e lingotamento contínuo, leia os capítulos 2.3, 2.4 e 2.5 do livro:

BALDAM, R. L.; VIEIRA, E. A. **Fundição**: processos e tecnologias correlatas. 1 ed. São Paulo: Erica, 2013. 384 p.

A fundição centrífuga é um tipo de fundição que emprega a rotação do molde a velocidades elevadas, em que a liga metálica no estado líquido é derramada, e o giro do molde durante a solidificação permite a obtenção da peça fundida, sendo a força centrífuga responsável por distribuir e manter o metal líquido nas proximidades das paredes do molde e também por formar uma estrutura no fundido que seja quase isenta de defeitos. Por meio da fundição centrífuga, é possível obter tubos de ferro fundido nodular utilizados na condução de água e esgoto, cilindros para laminadores e tubos para indústria petroquímica. Também é possível fundir ligas não ferrosas por centrifugação para a produção de buchas e mancais em ligas de cobre. Em geral, este processo se limita à produção de formas geométricas cilíndricas. O processo mais convencional de fundição centrífuga é realizado para a produção de peças fundidas tubulares, conforme mostra a Figura 2.27.

Figura 2.27 | Esquema de fundição centrífuga de tubos



Fonte: Baldam e Vieira (2013).



### Refleta

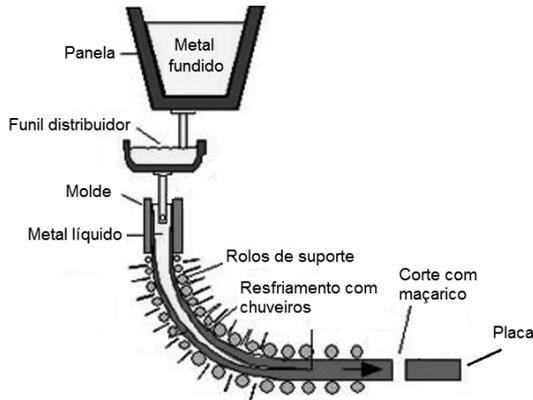
Até aqui, abordamos a fundição de ligas metálicas no estado líquido. O processo de fundição só é possível com a liga metálica nesse estado da matéria?

Leia o item 6.3.4 do capítulo 6 do livro a seguir e analise a possibilidade da fundição com o metal no estado semissólido:

GROOVER, M. P. **Introdução aos processos de fabricação**. 1. ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN-LTC, 2014.

A fundição contínua ou lingotamento contínuo é um tipo de fundição em que as peças fundidas são produzidas por processo contínuo e têm formas longas, de seções quadrada, retangular, hexagonal e outros formatos. Os produtos obtidos por esse processo têm grande comprimento e são, em geral, processados posteriormente por usinagem ou por conformação mecânica, com o material no estado sólido. De forma simplificada, o processo é conduzido pelo vazamento do metal líquido em um cadinho aquecido. O metal líquido escoar por matrizes de cobre com revestimento de cromo e são resfriados à água. A barra ou placa, já no estado sólido, ainda com temperatura elevada, é agarrada por cilindros e arrastada, respeitando as velocidades de resfriamento e solidificação do metal. Na sequência, o material continua esfriando, sendo cortado com serras circulares ou maçarico. Nesse processo, as ligas metálicas não ferrosas, o aço e o ferro fundido nodular podem ser fundidos. No caso do aço, são obtidas placas de grandes dimensões. Existem diversas possibilidades de equipamentos de lingotamento contínuo, sendo que a máquina vertical curva tem sido a mais usada para a obtenção de aços, conforme mostra a Figura 2.28. Existe também a configuração da máquina horizontal, que é utilizada na produção de perfis de ferro fundido. Outra possibilidade é que o molde, nas máquinas verticais, seja fabricado de grafite ou carbureto de silício. Um recurso que não permite que o metal fique aderido ao molde é a oscilação da barra enquanto está sendo solidificada. As instalações de produção de fundição contínua podem ser relativamente pequenas, no caso de fundição de seções pequenas de alumínio, até plantas industriais de grande porte, como é o caso de placas de aço de grandes dimensões.

Figura 2.28 | Ilustração esquemática de máquina de lingotamento contínuo vertical curva



Fonte: adaptada de: <<http://ccc.illinois.edu/introduction/overview.html>>. Acesso em: 10 set. 2016



## Vocabulário

**Coquilha:** termo que designa moldes metálicos utilizados em fundição por gravidade.

**Lingote:** tipo de forma na qual uma liga metálica no estado líquido é vazada e toma a forma prismática denominada lingote.

**Die Casting:** termo em inglês que significa matriz (*die*) e fundição ou fusão (*casting*), sendo geralmente utilizado para caracterizar a fundição sob pressão.

**Aço maraging:** classe de aços de baixo teor de carbono que apresentam elevada resistência, mantendo a maleabilidade. O principal elemento de liga é o níquel de 15 a 25%. A palavra maraging é uma junção dos termos em inglês, *martensite* (martensita, constituinte do aço) e *aging* (envelhecimento).

## Sem medo de errar

Você foi contratado pela empresa de fundição de peças metálicas que está desenvolvendo novos produtos e necessita saber mais sobre equipamentos que ainda não são utilizados em seus processos. Foi solicitado que você avaliasse as melhores alternativas para a produção de uma peça fundida a partir de uma liga de alumínio. Nesta seção, foram apresentadas algumas possibilidades de produção de peças nos processos de fundição com a utilização de equipamentos adequados a cada necessidade. Como a empresa pretende investir em seus novos processos,

você deverá apresentar qual deve ser o tipo de vazamento, sendo que, no caso de a escolha ser por fundição sob pressão, é preciso indicar se será alta ou baixa pressão e se necessita de máquina de fundição para essa peça, que tem média complexidade geométrica e massa aproximada de 0,4 kg, além de propriedades mecânicas de  $LR = 230 \text{ MPa}$ ,  $LE = 130 \text{ MPa}$  e  $AI = 3\%$ . Como se trata de uma liga de alumínio, a fundição pode ser realizada em moldes de areia ou moldes permanentes. A ideia de a peça ter média complexidade geométrica e ser relativamente pequena nos conduz a pensar em um processo que utilize moldes metálicos. A questão quanto ao vazamento ser por ação da gravidade apenas ou sob pressão também deve levar em consideração as características físicas da peça e a demanda de produção, que foi informada como sendo de 10 mil peças por mês. Assim, a fundição em moldes metálicos por gravidade (coquilha) talvez seja inviável do ponto de vista econômico, em função do tamanho da peça e da demanda. A escolha por um processo de fundição sob pressão é mais interessante para atender à demanda e garantir o atendimento às condições técnicas da peça. Ainda em relação à pressão nesse processo, podemos imaginar, pelo que foi estudado, que o ideal é o uso de máquinas injetoras, com alta pressão, da categoria de câmara fria, devido ao tipo de liga utilizada.



### Atenção

Nesta decisão, pesou o fato de o material a ser utilizado se tratar de uma liga metálica não ferrosa, de pequeno porte, com média complexidade geométrica e de grande demanda. Outras características informadas poderiam nos conduzir à escolha de outro processo de fundição capaz de produzir este tipo de peça também.

## Avançando na prática

### Aprimorando o processo de fundição em moldes permanentes

#### Descrição da situação-problema

Uma empresa, que está recebendo reclamações de um defeito nas peças entregues no último lote de fornecimento, está buscando soluções para seu processo de fundição no que diz respeito às máquinas injetoras para produção de peças pequenas a partir de ligas de alumínio. O defeito reclamado se trata de pequenos poros na peça quando submetida ao processo de usinagem.

Foi solicitado que você analisasse a reclamação e propusesse uma solução para a queixa do cliente.

### Resolução da situação-problema

O defeito reclamado está relacionado aos pequenos poros (porosidade) encontrados nas peças durante a usinagem. Estes vazios ou porosidade presentes nas peças fundidas em processo de injeção podem ter origem na retenção de ar e gases no interior da cavidade das matrizes metálicas. Conforme estudado, as matrizes utilizadas na fundição sob pressão em máquinas injetoras devem ter canais para facilitar a saída de ar e gases da cavidade do molde.

Analisando as matrizes utilizadas na produção do lote reclamado, você observou que, na confecção das matrizes, não foi realizada a usinagem desses canais, embora conste no desenho das matrizes. Neste caso, deve ser avaliada a possibilidade de retrabalhar as matrizes e usinar os canais necessários conforme desenho ou confeccionar novas matrizes de fundição para essa peça.

### Faça valer a pena

**1.** No processo de fundição, os moldes são os elementos que dão forma às peças fundidas. Os moldes de fundição podem ser destruídos após a solidificação das peças para a desmoldagem. Outra possibilidade utilizar os moldes não perecíveis, também conhecidos como permanentes.

Os moldes de fundição que são chamados de permanentes têm características que possibilitam seu uso para a produção de grande quantidade de peças.

#### Porque

São fabricados de materiais metálicos, em especial, aços tratados e ferros fundidos.

- a) As duas afirmações estão corretas, mas a segunda não é uma justificativa para a primeira.
- b) As duas afirmações estão corretas, e a segunda é uma justificativa correta da primeira.
- c) A primeira afirmação está correta, e a segunda está incorreta.
- d) A primeira afirmação está incorreta, e a segunda está correta.
- e) As duas afirmações estão incorretas.

**2.** Em relação à automatização na fundição, podemos utilizar os programas de computador para a obtenção do desenho e do projeto do fundido até a usinagem dos modelos em máquinas ferramenta, que irão resultar nas dimensões e na forma da geometria do modelo.

Assinale a alternativa que preencha corretamente as lacunas a seguir.

Nas máquinas injetoras de câmara \_\_\_\_\_, o metal permanece fundido em um recipiente junto à máquina, e um êmbolo força o metal líquido sob \_\_\_\_\_ pressão para a cavidade da matriz.

- a) Fria; alta.
- b) Fria; baixa.
- c) Quente; baixa.
- d) Quente; alta.
- e) Morna; média.

**3.** Uma das possibilidades de fundição de peças de geometria circular, tais como tubos, é a fundição por centrifugação. Neste processo, o metal líquido é despejado em um molde que gira e, por meio da ação da força centrífuga, permite a obtenção da peça fundida.

Leia as afirmações a seguir e assinale verdadeiro (V) para as corretas e falso (F) para as incorretas e, em seguida, assinale a alternativa correta:

(    ) Na fundição por centrifugação, a rotação do molde ocorre em baixas velocidades.

(    ) O metal líquido mantém-se nas proximidades das paredes do molde devido à força centrífuga.

(    ) Por meio da fundição centrífuga, é possível obter tubos de ferro fundido nodular.

(    ) É possível fundir ligas não ferrosas por centrifugação para a produção de buchas e mancais em ligas de cobre.

- a) F – F – V – F.
- b) V – F – F – V.
- c) V – F – V – F.
- d) F – V – V – V.
- e) V – F – V – V.



## Seção 2.3

### Fornos utilizados na fusão das ligas metálicas

#### Diálogo aberto

Bem-vindo de volta! Vamos retomar o estudo da fundição e processos siderúrgicos?

Já vimos que os processos de fundição de ligas metálicas são bastante versáteis na produção de peças para diversos segmentos industriais. Dentro deste contexto de versatilidade, podemos destacar as inúmeras possibilidades de produção de peças com tamanhos e geometrias variadas. Outro aspecto que faz da fundição um processo de fabricação muito atrativo é a possibilidade de reciclagem das ligas metálicas empregadas. Como os metais e suas ligas necessitam estar no estado líquido para que o processo seja realizado, são utilizados outros equipamentos para este fim: os fornos para fusão das ligas metálicas. Nesta seção, abordaremos os tipos utilizados na fundição.

Você foi contratado por uma empresa que está desenvolvendo um novo produto a partir do alumínio. Ela deseja definir alguns aspectos para o processo de fundição desse novo produto e solicitou-lhe que determinasse as melhores opções em termos de forno de fusão, além da possibilidade de reciclagem economicamente viável.

Nesta etapa do seu estudo, você encontrará os conceitos e as aplicações dos principais fornos de fusão utilizados em fundição de metais, bem como os aspectos relacionados ao emprego de material reciclado.

Vamos começar?

Figura 2.29 | Imagem de forno a cadinho basculante



Fonte: <[http://grionfornos.com.br/home-page/fornos\\_cadinho.htm](http://grionfornos.com.br/home-page/fornos_cadinho.htm)>. Acesso em: 19 set. 2016.

## Não pode faltar

Para que seja possível realizar o processo de fundição, é necessário alterar o estado dos metais e suas ligas, de sólido para líquido. Para isso, um importante equipamento utilizado em fundição e siderurgia são os fornos de fusão, que transformam minérios e outros materiais em ferro e aço, além de outras ligas metálicas não ferrosas. Os fornos de fundição são construídos de diferentes formas e desenhos, cada um destinado a um processo de fusão específico e podendo ser do tipo equipamentos de cúpula, indução e fornos elétricos. Os fornos podem ter mais de um tipo de classificação, sendo, em geral, divididos de acordo com a fonte de energia utilizada, eletricidade ou combustível, e pelo modo de operação, cadinho, revérbero, de cuba, entre outros. Os fornos a combustível apresentam, geralmente, mais economia no aquecimento que os elétricos. Contudo, os fornos elétricos são menos poluentes no local de trabalho, têm maior facilidade de automação, melhor homogeneidade de composição e temperatura pela agitação gerada no metal, melhor controle de temperatura e da potência aplicada sobre o metal. No caso de a fonte de energia utilizada ser combustível, podemos citar o forno cubilô. Um dos tipos de fornos de fundição muito utilizado nos processos siderúrgicos é o alto-forno, que é um tipo de forno cubilô (Figura 2.30), que utiliza ar forçado, podendo ser enriquecido com puro oxigênio, superaquecendo o material e reduzindo o tempo necessário para produzir ferro em fornos de fundição. O forno cubilô é normalmente utilizado na produção de ferro fundido, operando com ferro-gusa, sucata de aço e de ferro fundido, calcário (para separar as impurezas), ferro-silício, ferro-manganês, e usa carvão mineral – coque - como combustível. Ele opera por meio do método de contracorrente, como é o caso do alto-forno, tendo a carga metálica e o coque descendo, e os gases subindo. O metal fundido fica depositado no fundo, sendo escoado por um canal de vazamento.

Figura 2.30 | Representação de um forno cubilô



Fonte: adaptada de <[http://www.refrata.com.br/portal/index.php?option=com\\_k2&view=item&id=74:forno-cubilo&Itemid=77&lang=en](http://www.refrata.com.br/portal/index.php?option=com_k2&view=item&id=74:forno-cubilo&Itemid=77&lang=en)>. Acesso em: 20 set. 2016.

O forno do tipo cubilô tem carcaça cilíndrica e vertical feita de aço e revestida internamente com tijolos refratários. Inicialmente, é importante que o forno seja limpo e, após, é adicionado o carvão vegetal ou mineral no fundo, e o fogo é gerado. Quando o fogo passa pela camada de coque, é iniciado o sopro de ar. A partir daí, tem início o carregamento, realizado em camadas, seguindo de minério de ferro ou ferro-gusa, sucata, coque e o fundente calcário. O carregamento é mantido até que se alcance o nível de entrada da carga, devendo permanecer assim durante toda a operação.

No caso da operação contínua, o metal fundido é vazado continuamente em uma calha. Nessa calha, existe uma bacia que separa a escória do metal. A escória, por ser menos densa, flutua e escorre pelo furo acima do canal de vazamento do ferro. O ferro é vazado na panela de fundição.

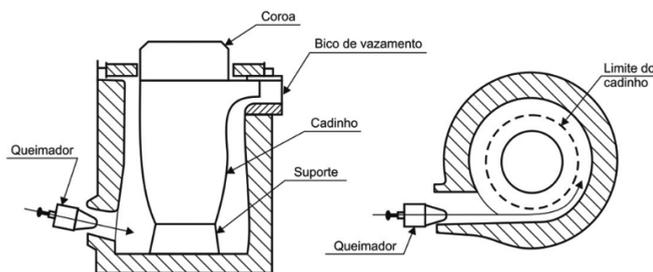
Outro tipo de forno de fundição é o do tipo cadinho, que também tem a forma de energia pela queima de combustível, conforme Figura 2.31.



### Exemplificando

O alto-forno utilizado na siderurgia para a transformação do minério de ferro em ferro-gusa é um tipo de forno de cúpula, também caracterizado como forno cubilô.

Figura 2.31 | Esquema de forno a cadinho, tipo poço, aquecido por queima de combustível



Fonte: adaptada de Senai (1987, apud BALDAM, R. L.; VIEIRA, E. A. **Fundição**: processos e tecnologias correlatas. 1. ed. São Paulo: Erica, 2013. 384 p.)

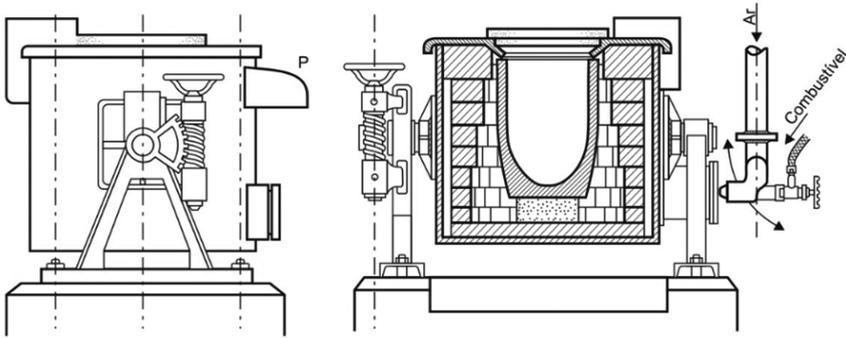
Um forno a cadinho tem, tipicamente, formato cilíndrico, com uma estrutura externa usualmente de aço, com revestimento interno de refratários, tendo no interior um cadinho, que é um recipiente feito de material resistente ao calor, que conterá o metal líquido. O material do cadinho pode ser de ferro fundido ou aço (caso de fusão de ligas de alumínio, chumbo), mas normalmente é feito de materiais como a grafita ou o carbureto de silício.

O aquecimento desse cadinho pode ser com combustível líquido, gasoso (Figura 2.32) ou, mesmo, sólido, bem como por resistência elétrica. O cadinho pode ser fixo ou móvel em relação ao forno.

No caso de cadinho fixo, o forno deve ser basculante ou permitir ser deslocado para a retirada do metal líquido.

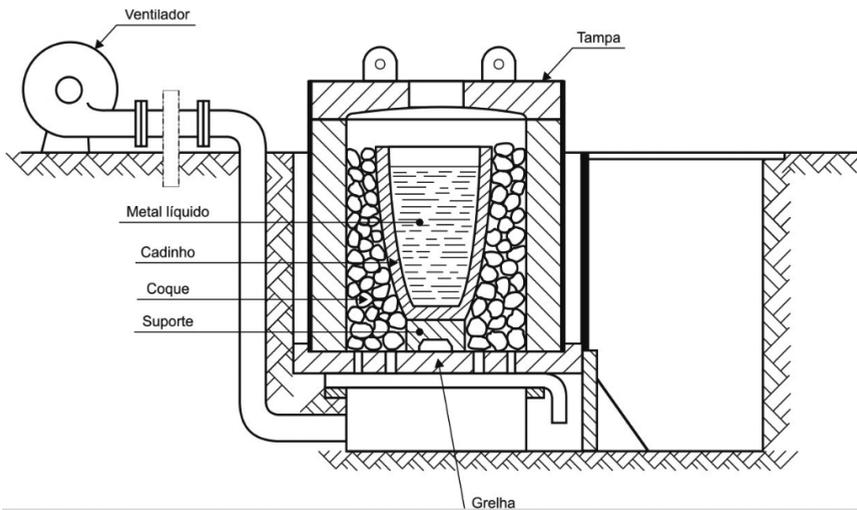
No caso de cadinho móvel, o forno normalmente é fixo e, em alguns casos, abaixo do nível do solo. Assim, o cadinho é removido pelo uso de tenazes.

Figura 2.32 | Esquema de forno a cadinho com combustível fluído (líquido ou gasoso)



Fonte: adaptada de Torre (2004, apud BALDAM; VIEIRA, 2013).

Figura 2.33 | Esquema de forno a cadinho, tipo poço, aquecido por queima de coque



Fonte: adaptada de Senai (1987, apud BALDAM; VIEIRA, 2013).

Os fornos revérbero são utilizados para fundir cargas com mais de 400 kg. Os dois tipos de fornos revérberos mais importantes são os aquecidos por combustível, óleo ou gás e os aquecidos a arco elétrico. Os primeiros têm como inconveniente deixar os gases de combustão em contato com o banho líquido, que pode se contaminar com esses gases. Caracteriza-se pelo fato de o calor (de fonte elétrica ou combustível)

ser irradiado no metal ou na escória que sobrenada o banho metálico. Os revérberos podem ser empregados para a maioria das ligas metálicas, até mesmo aços e ferros fundidos, com tamanhos variados, desde algumas centenas de quilos até várias toneladas.

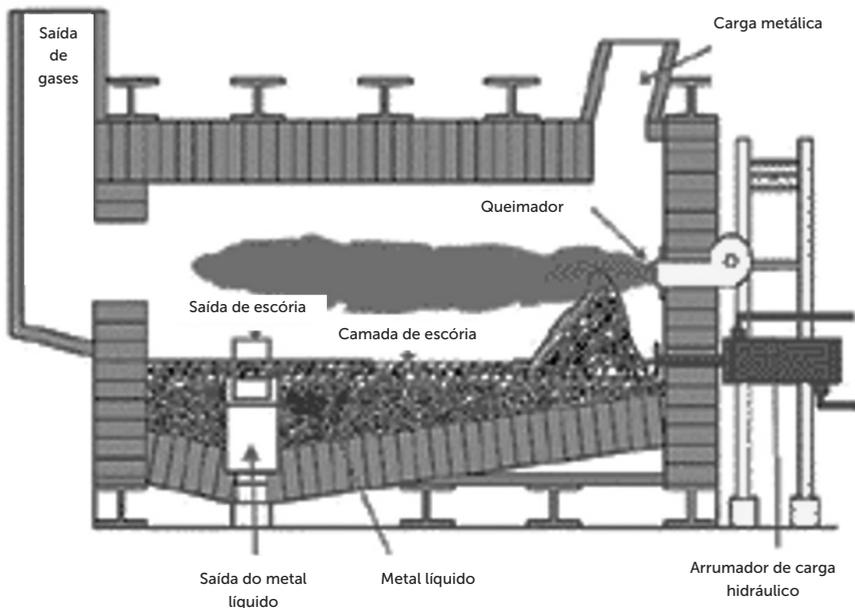


### Assimile

No caso de forno revérbero elétrico, em geral, a operação ocorre por arco elétrico sobre o banho metálico, sendo que o rendimento térmico não é muito bom. É usado principalmente para ligas mais reativas com oxigênio, como ligas de zinco e ligas de magnésio, pois o arco elétrico direto sobre a carga resultaria em grande perda de material e poluição pela oxidação da carga metálica. Daí a restrição no uso desse tipo de forno de fusão.

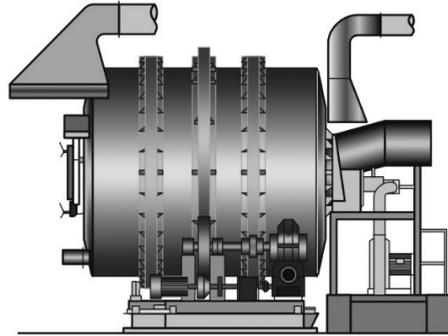
As Figuras 2.34 e 2.35 apresentam dois tipos de fornos revérberos, sendo o primeiro, estacionário, e o segundo, rotativo.

Figura 2.34 | Esquema de forno revérbero estacionário



Fonte: adaptada de <[http://www.osha.gov/SLTC/etools/leadsmelter/images/diagrams/reverbfurnace\\_diagram.gif](http://www.osha.gov/SLTC/etools/leadsmelter/images/diagrams/reverbfurnace_diagram.gif) (apud BALDAM; VIEIRA, 2013)>. Acesso em: 20 set. 2016.

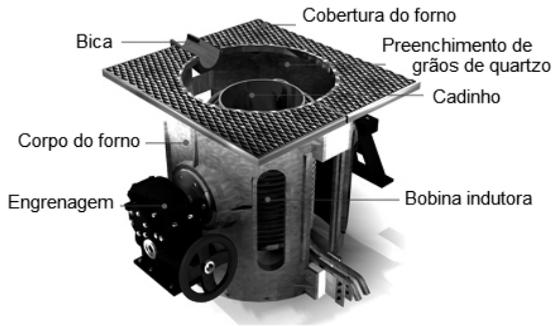
Figura 2.35 | Esquema de forno revérbero rotativo



Fonte: Baldam e Vieira (2013).

No forno elétrico, a indução à corrente elétrica alternada passa por uma bobina, gerando a corrente elétrica induzida na carga metálica, fazendo com que a resistência elétrica seja aquecida, fundida e sobreaquecida. Os fornos do tipo cadinho (Figura 2.36) são mais utilizados no caso de fornos elétricos à indução. Em sua construção, não incluem um núcleo magnético, sendo o próprio metal que se deseja fundir o secundário, podendo operar com diferentes frequências.

Figura 2.36 | Forno elétrico de indução tipo cadinho



Fonte: adaptado de <<http://www.abb-furnace.com/furnaces/induction-furnace.html>>. Acesso em: 21 set. 2016.

Esse tipo de forno de fusão é constituído, em sua forma, de um cadinho sem a presença de um núcleo magnético, sendo que o próprio metal que se deseja fundir funciona como secundário. Quando comparado ao forno a canal, o forno a cadinho mostra-se mais versátil, devido à possibilidade de trabalhar com carga totalmente fria e alteração da composição da carga. Para melhorar seu rendimento, é comum não se esvaziar o forno totalmente. Estes fatores explicam o amplo predomínio do forno a cadinho em fundições que operam com fornos elétricos. A operação do forno de indução a cadinho é iniciada, normalmente, com carga sólida, mas, após a primeira fusão, é comum deixar determinada quantidade de carga líquida no forno. Este volume de carga líquida contribui para aumentar a velocidade de fusão da carga

seguinte, maximizando o rendimento total de operação. Já no forno elétrico a arco, conforme Figura 2.37, é gerada uma diferença de potencial entre os eletrodos de tal forma que haja a formação de um arco que, a elevadas temperaturas atingidas, funde e sobreaquece o metal direta ou indiretamente.

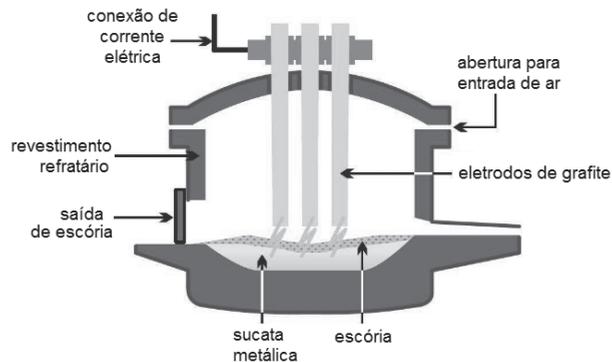


### Pesquise mais

Para conhecer um pouco mais sobre forno elétrico a arco, leia o capítulo 7.2.3.4 do livro:

BALDAM, R. L.; VIEIRA, E. A. **Fundição**: processos e tecnologias correlatas. 1. ed. São Paulo: Erica, 2013. 384 p.

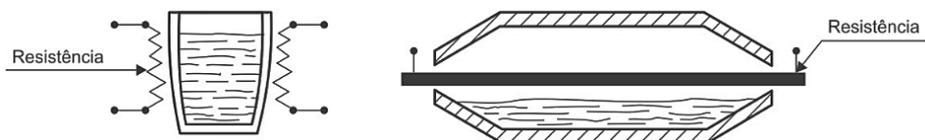
Figura 2.37 | Forno elétrico a arco



Fonte: adaptada de <<http://steelfeel.com/mechanical/electric-arc-furnace-flowline-briefly-explain/>>. Acesso em: 21 set. 2016.

Outro tipo de forno de fusão de ligas metálicas de fonte de energia elétrica é o forno elétrico à resistência, em que a passagem da corrente elétrica pela resistência aquece, irradiando o calor que preaquece, funde e sobreaquece o metal, conforme Figura 2.38. A resistência pode encontrar-se no exterior ou no interior do forno.

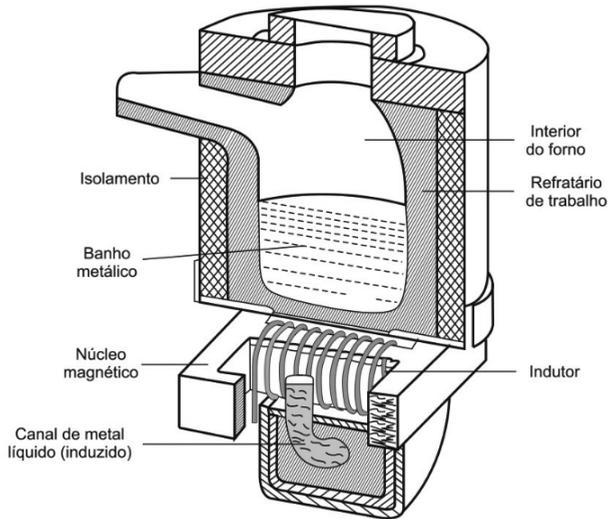
Figura 2.38 | Forno elétrico com resistência interna e externa



Fonte: Baldam e Vieira (2013).

Mais outro tipo é o forno de indução a canal, também conhecido como forno de indução com núcleo magnético, devido ao núcleo de aço magnético no qual é enrolada uma bobina, que é feita geralmente de um tubo de cobre e refrigerada à água (Figura 2.39). O processo gera uma diferença de potencial entre as extremidades da bobina, resultando em uma corrente alternada (primária), que induz um campo eletromagnético alternado no canal preenchido pelo metal.

Figura 2.39 | Corte de um forno de indução a canal com núcleo magnético



Fonte: Baldam e Vieira (2013).

Alguns problemas deste tipo de forno ocorrem quando há mudança de ligas metálicas, sendo que o metal líquido que permanece pode afetar a liga metálica seguinte, mas a principal limitação é o fato da necessidade de operação com metal líquido para evitar o entupimento do canal.

Neste caso, é necessário operar com outro forno a canal, ao lado do primeiro, ou um forno a cadinho para iniciar a operação.



### Refleta

Ao estudar os processos de fundição, temos falado bastante em ligas metálicas, pois, para o uso a que se destinam as peças obtidas por fundição, faz-se necessário combinar as propriedades de diversas ligas metálicas e alcançar os resultados desejados.

Como uma liga metálica é obtida?

Leia o capítulo 7.1, do livro:

BALDAM, R. L.; VIEIRA, E. A. **Fundição**: processos e tecnologias correlatas. 1. ed. São Paulo: Erica, 2013.

A Quadro 2.1, a seguir, apresenta um resumo da relação entre o tipo de forno, a liga utilizada e o material refratário empregado.

Quadro 2.1 | Relação entre tipo de forno, liga produzida e refratário utilizado de acordo com a região do forno

Tipo de forno	Tipo de liga	Refratário
Cadinho	Alumínio, chumbo, magnésio, zinco	Em contato com metal: ferro fundido, aço, grafite, carbureto de silício. Tampa: silicoso ou aluminoso. Isolamento térmico: silicoso.
	Cobre	Em contato com metal: grafite, carbureto de silício. Tampa: silicoso ou aluminoso. Isolamento térmico: silicoso.
	Ferro fundido	Em contato com metal: carbureto de silício. Tampa: silicoso ou aluminoso. Isolamento térmico: silicoso.
Fornos de indução	Alumínio, zinco, cobre, ferros fundidos	Em contato com metal: carbureto de silício, silicoso, aluminoso. Tampa (quando existente): silicoso ou aluminoso. Canal de corrida: aluminoso. Isolamento térmico: silicoso ou aluminoso.
	Aços	Em contato com metal: magnesiano, aluminoso. Tampa (quando existente): silicoso ou aluminoso. Canal de corrida: aluminoso. Isolamento térmico: silicoso ou aluminoso.
Fornos elétricos a arco	Não ferrosos e ferros fundidos	Em contato com metal: silicoso ou aluminoso. Abóbada: silicoso ou aluminoso. Área dos eletrodos: aluminoso ou magnesiano. Canal de corrida: aluminoso. Isolamento térmico: silicoso ou aluminoso.
	Aços	Em contato com metal: magnesiano, cromo-magnesiano, magnésia-carbono, dolomítico. Abóbada: silicoso ou aluminoso. Área dos eletrodos: aluminoso ou magnesiano. Canal de corrida: aluminoso. Isolamento térmico: silicoso ou aluminoso.
Forno cubilô	Ferros fundidos	Silicoso, neutro ou básico.

Fonte: adaptado de Baldam e Vieira (2013).



## Vocabulário

**Cubilô:** forno cilíndrico no qual se refunde o ferro para lançá-lo nos moldes de fundição.

Fonte: <<http://www.osdicionarios.com/c/significado/cubilo>>. Acesso em: 22 set. 2016.

**Cadinho:** recipiente em forma de pote, normalmente com características refratárias, resistente a temperaturas elevadas, no qual são fundidos materiais a altas temperaturas.

Fonte: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Cadinho>>. Acesso em: 22 set. 2016.

**Revérbero:** ato ou efeito de reverberar; reflexo luminoso; lâmina destinada a refletir a luz; rescaldo.

**Forno de revérbero:** aquele que serve para fundir metais.

Fonte: Dicionário Priberam da Língua Portuguesa. Disponível em: <<https://www.priberam.pt/dlpo/rev%C3%A9rberos>>. Acesso em: 22 set. 2016.

**Tenazes:** ferramenta que se assemelha à tesoura, sendo utilizada para agarrar ou remover qualquer coisa.

Fonte: <<https://www.dicio.com.br/tenaz/>>. Acesso em: 22 set. 2016.

## Sem medo de errar

Finalizando mais uma seção, você aprendeu sobre equipamentos utilizados em fundição e, agora, deve ser capaz de atender ao solicitado pela empresa que o contratou como engenheiro de processos. Como se trata de uma liga de alumínio e como já foi definido que a peça será fundida em molde metálico em máquina injetora de câmara fria com alta pressão, a melhor opção para a fusão dessa liga, do ponto de vista técnico e econômico, é o forno elétrico de indução a cadinho.

No aspecto de reciclagem economicamente viável do alumínio, temos uma liga metálica, que é um dos principais materiais em termos de reciclagem, o que representa grande importância para a sustentabilidade em termos econômicos, ambientais e sociais.

Como o alumínio pode ser reciclado a partir de sucatas geradas no processo produtivo, é capaz de ser reaproveitado em nova fusão para a produção de outras peças e, também, por meio de produtos que atingiram o final de vida útil. Para tanto, é necessário avaliar também as características de propriedades desejadas na peça em questão.

Se não for reutilizado na própria fundição, pode ser empregado em outras aplicações, como em latas de bebidas, componentes automotivos, esquadrias de janelas, utensílios domésticos, entre outros.



### Atenção

O alumínio pode ser reciclado infinitas vezes, sem perder suas características no processo de reaproveitamento, ao contrário de outros materiais.

## Avançando na prática

### Utilizando outras opções de fornos de fusão

#### Descrição da situação-problema

A competitividade cada vez mais acirrada e a busca por redução nos custos fazem com que as empresas busquem melhorar seus processos para se manterem competitivas.

Agora, você deve apresentar uma proposta de redução no consumo de energia elétrica em um processo de fundição.

Para uma gama de peças de ligas de aço, atualmente fundidas em fornos de fusão de indução a cadinho, foi solicitado avaliar a possibilidade de uma alternativa que mantenha as características técnicas com redução no consumo de energia.

Qual é a sua proposta para atender ao solicitado?

#### Resolução da situação-problema

O consumo de energia para fornos de indução maiores é cerca de 550 kWh/t de aço fundido, cerca de 20 a 30% a mais que os fornos elétricos a arco de maior porte, que têm, hoje, consumo de 350 a 400 kWh/t de aço produzido, para os fornos produzidos mais recentemente (RIZZO, 2006c, apud BALDAM, 2013).

Portanto, uma sugestão para este caso seria a adoção do forno elétrico a arco para atender à demanda do ponto de vista técnico e econômico. Se a empresa já tem este tipo de forno, fica mais fácil de realizar testes e comparar os resultados. No caso de a empresa não tê-lo, é necessário um estudo detalhado para verificar a viabilidade de aquisição deste equipamento.

### Faça valer a pena

**1.** Os fornos de fundição, também conhecidos como fornos de fusão, são utilizados para alterar o estado de metais e suas ligas, de sólido para líquido, permitindo o preenchimento dos moldes de fundição. Transformam minérios e outros materiais em ferro e aço, e também outras ligas metálicas não ferrosas.

Leia as afirmações a seguir e assinale verdadeiro (V) para as corretas e falso (F) para as incorretas e, em seguida, assinale a alternativa correta:

( ) Os fornos de fundição utilizam a mesma fonte de energia e mesmo modo de operação.

( ) Os fornos elétricos são menos poluentes no local de trabalho e têm maior facilidade de automação.

( ) Os fornos a combustível apresentam, em geral, mais economia no aquecimento que os elétricos.

( ) No forno cubilô, a fonte de energia utilizada pode ser de combustível.

a) F – F – V – F.

b) V – F – F – V.

c) V – F – V – F.

d) F – V – V – V.

e) V – F – V – V.

**2.** Os fornos de fundição são construídos de diferentes formas e desenhos, cada um destinado a um processo de fusão específico, e podem ser do tipo equipamentos de cúpula, indução e fornos elétricos. Os fornos são classificados de acordo com a fonte de energia utilizada e pelo modo de operação.

Assinale a alternativa que preencha corretamente as lacunas a seguir.

O \_\_\_\_\_ é um tipo de forno cubilô, que utiliza ar forçado, \_\_\_\_\_ o tempo necessário para produzir \_\_\_\_\_ em fornos de fundição.

a) Cadinho; aumentando; aço.

b) Alto-forno; reduzindo; ferro.

c) Forno a indução; mantendo; ferro.

d) Cubilô; aumentando; ligas de magnésio.

e) Alto-forno; mantendo; manganês.

**3.** No forno elétrico por indução, a corrente elétrica alternada passa por uma bobina, refrigerada à água, gerando a corrente elétrica induzida na carga metálica, fazendo com que a resistência elétrica seja aquecida, fundida e sobreaquecida.

Os fornos do tipo cadinho são mais utilizados no caso de fornos elétricos à indução.

Porque

Esse tipo de forno de fusão é constituído, em sua forma, de um cadinho sem a presença de um núcleo magnético, sendo que o próprio metal que se deseja fundir funciona como secundário.

- a) As duas afirmações estão corretas, mas a segunda não é uma justificativa para a primeira.
- b) As duas afirmações estão corretas, e a segunda é uma justificativa correta da primeira.
- c) A primeira afirmação está correta, e a segunda está incorreta.
- d) A primeira afirmação está incorreta, e a segunda está correta.
- e) As duas afirmações estão incorretas.



# Referências

BALDAM, R. L.; VIEIRA, E. A. **Fundição**: processos e tecnologias correlatas. 1. ed. São Paulo: Erica, 2013. 384 p.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**: processos de fabricação e tratamento. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. v. 3.

DICIONÁRIO CIMM. **O que é sinterização**. Disponível em: <<http://www.cimm.com.br/portal/verbetes/exibir/1641-sinterizacao>>. Acesso em: 19 nov. 2016.

FERNANDES, F. C. F.; LEITE, R. B. Automação industrial e sistemas informatizados de gestão da produção em fundições de mercado. **Gestão & Produção**, v. 9, n. 3, p. 313-344, dez. 2002. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/gp/v9n3/14572.pdf>. Acesso em: 2 set. 2016.

GROOVER, M. P. **Introdução aos processos de fabricação**. 1. ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN-LTC, 2014.

INTRODUCTION to continuous casting. In: Continuous Casting Consortium Disponível em: <<http://ccc.illinois.edu/introduction/overview.html>>. Acesso em: 10 set. 2016.

TECNOLOGIA e resultados precisos. Disponível em: <<http://www.moldmetal.com.br/coquilha.php>>. Acesso em: 9 set. 2016.



## Solidificação, resfriamento, desmoldagem e acabamento

### Convite ao estudo

Olá! Bem-vindo de volta!

Na Unidade 1, estudamos as possibilidades de peças obtidas por fundição, as principais matérias-primas da fundição e dos processos siderúrgicos, as ligas metálicas ferrosas e não ferrosas, a fundição em moldes perecíveis e em moldes metálicos e algumas regras básicas para o projeto de peças fundidas. Na Unidade 2, aprendemos sobre mecanização e automatização dos processos de fundição, softwares de simulação para fundição, máquinas injetoras para fundição de ligas metálicas não ferrosas e fornos de fusão.

Iniciaremos agora o estudo dos fenômenos relacionados à solidificação das ligas metálicas e suas etapas – mecanismos de crescimento, estruturas de solidificação, perdas metálicas durante a fusão, contração –, além de meios de remoção de rebarbas, e faremos uma discussão sobre os defeitos de fundição, formas de evitá-los, bem como o controle da qualidade das peças fundidas.

O conhecimento de tais aspectos é importante para os projetos de fundição, pois afetam diretamente a qualidade das peças fundidas e os custos dos processos.

Uma empresa de fundição, fabricante de peças metálicas, está desenvolvendo novos produtos para as linhas de eletrodomésticos e peças automotivas e necessita expandir sua capacidade produtiva para atender a esta nova demanda. A empresa está enfrentando dificuldades de operação na fundição da seguinte forma:

- Perda metálica excessiva causada por um dos processos de fundição, que está produzindo um flange para aplicação hidráulica a partir de uma liga de aço.

- Defeitos frequentes nas peças fundidas (do tipo porosidades) e desgaste de ferramentas de usinagem.
- Alto consumo de tempo com remoção de canais e rebarbas das peças.

Você foi contratado para atuar na melhoria dos processos de fabricação da empresa e deve apresentar soluções para as dificuldades apresentadas pela empresa em seus processos de fundição.

Ao final desta unidade, você será capaz de compreender os principais conceitos relacionados à solidificação na fundição e de identificar as características principais de controle dos processos de fundição.

# Seção 3.1

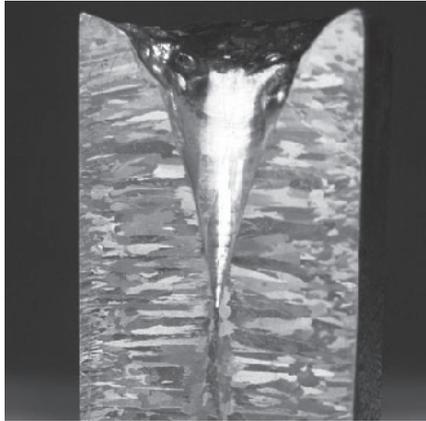
## Princípios de solidificação de ligas metálicas

### Diálogo aberto

Caro aluno, bem-vindo à Seção 3.1 de Fundição e Processos Siderúrgicos. Até o momento, você estudou aspectos que lhe permitiram solucionar alguns problemas nos processos de fundição. Aprendeu sobre a importância da fundição para produção de peças metálicas para diversas aplicações, ligas metálicas ferrosas e não ferrosas utilizadas, uso de moldes refratários e moldes metálicos, algumas regras básicas para o projeto de peças fundidas, uso de mecanização e automatização dos processos de fundição, máquinas para fundição sob pressão e fornos de fusão.

Agora você foi contratado por uma empresa que está crescendo e recebendo novos desafios em seus processos, devido aos constantes aumentos de demanda. Para que possa se manter competitiva no mercado, ela necessita reduzir os desperdícios, principalmente na produção, etapa em que os resultados não estão dentro de padrões satisfatórios com relação às perdas metálicas. Em uma determinada peça para a indústria automotiva, a perda metálica em relação ao material empregado na fusão afeta a qualidade do fundido e está prejudicando os resultados da empresa. Você deverá acompanhar o processo em que está ocorrendo este problema e verificar as causas da perda metálica por oxidação, além de propor soluções para melhorar o processo de fundição dessa peça e os resultados da empresa. Ao final desta seção, você deverá ser capaz de indicar as opções para melhorar os resultados de um processo de fundição, a qualidade e as propriedades de uma peça fundida, compreendendo os aspectos de solidificação, os controles de temperatura, o uso de elementos inoculantes e o tempo de resfriamento.

Figura 3.1 | Lingote de alumínio com ~5 cm de largura, mostrando a formação da linha central de contração

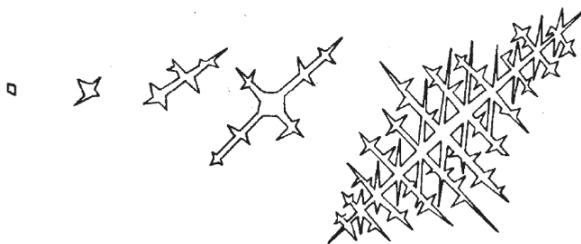


Fonte: <<http://www.cienciadosmateriais.org/index.php?acao=exibir&cap=21>>. Acesso em: 5 out. 2016.

## Não pode faltar

O que é solidificação das ligas metálicas? A solidificação pode ser entendida como um processo de transformação da fase líquida para a fase sólida que, de forma controlada, é largamente utilizado na indústria metalúrgica moderna. Os átomos, quando no estado líquido, movimentam-se e distribuem-se desordenadamente, sendo que, na solidificação, eles passam a se posicionar de maneira mais definida e ordenada, formando uma figura geométrica regular chamada "cristal" que, por meio de seus contornos irregulares e apresentando crescimento em contato com outros cristais, dá origem aos "grãos". Desta forma, as ligas metálicas, em geral, apresentam a solidificação na forma de cristais, tendo como aspecto mais comum a formação de dendritas, conforme representada na Figura 3.2. O processo de solidificação se inicia pelos processos de nucleação e crescimento, sendo que a nucleação de cristais sólidos na massa líquida dos metais é mais instável, quando comparada à formação de núcleos de liquefação durante a fusão.

Figura 3.2 | Esquema de crescimento de uma dendrita em uma liga metálica

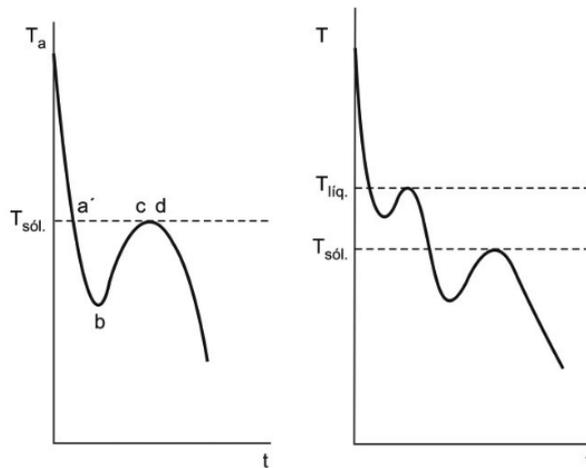


Fonte: Chiaverini (1986, p. 2).

Devido à extração de calor pela parede do molde, imediatamente após o vazamento, é formada uma fina camada de metal sólido na interface com o molde. A espessura da camada aumenta formando uma casca em volta do metal fundido à medida que a solidificação progride em direção ao centro da cavidade. A velocidade com que a solidificação avança depende da transferência de calor para o molde, assim como das propriedades térmicas do molde (Figura 3.3).

Normalmente, a temperatura de fusão é considerada a temperatura em que ocorre o equilíbrio termodinâmico entre um sólido e seu respectivo líquido. Contudo, este conceito não garante que a solidificação tenha início nessa temperatura.

Figura 3.3 | Curvas de resfriamento de metais puros e de uma liga com intervalo de solidificação



Fonte: adaptada de Muller (2002 apud BALDAM; VIEIRA, 2013, p. 47).

O controle da solidificação é importante para que as peças fundidas não apresentem heterogeneidades, tais como: rechupes, trincas de contração e porosidades, segregação de impurezas ou de elementos de liga e controle de grão – tipo, distribuição, tamanho e orientação dos grãos cristalinos. A solidificação se processa em duas etapas sucessivas:

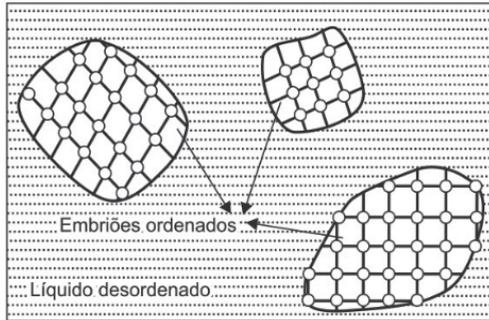
**Nucleação:** traduz o modo pelo qual a fase sólida surge de forma estável no meio da fase líquida, sob a forma de pequenos núcleos cristalinos.

**Crescimento:** traduz o modo pelo qual esses núcleos crescem sob a forma de cristais ou grãos cristalinos.

A nucleação pode se apresentar como homogênea e heterogênea. A nucleação homogênea é aquela que surge na fase líquida, não apresentando interferência ou participação energética de elementos estranhos ao sistema original. A estrutura dos

metais líquidos consiste essencialmente em um estado desordenado de átomos, no qual, aleatoriamente, surgem regiões atômicamente ordenadas, agrupando-se na estrutura cristalina do metal sólido correspondente. Essas regiões são chamadas de embriões, conforme Figura 3.4. O grupo de átomos organizados que formam um embrião não pode ser chamado de núcleo, porque seu tamanho ainda não é suficiente para ser estável e crescer. Existe a possibilidade de o embrião desfazer-se novamente.

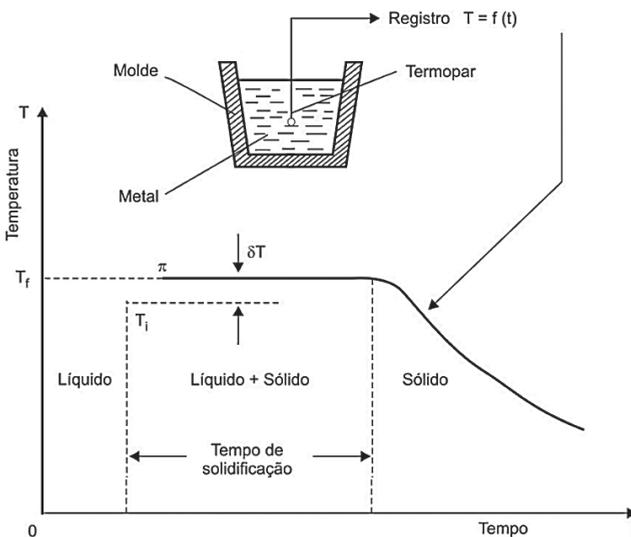
Figura 3.4 | Embriões da fase sólida em meio à fase líquida



Fonte: Baldam; Vieira (2013, p. 58).

O metal líquido precisa ser exposto a um super-resfriamento térmico ( $\delta T$ ), que pode ser analisado pela curva de resfriamento térmico, conforme a Figura 3.5, a seguir. Com a fase líquida super-resfriada, a fase sólida terá maior estabilidade termodinâmica, pois tem menor energia livre ( $F$ ) que a fase líquida.

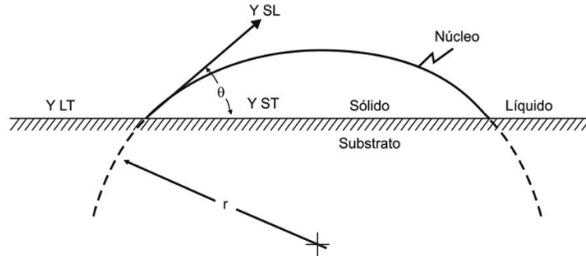
Figura 3.5 | Curva típica de resfriamento



Fonte: adaptada de Campos Filho e Davies (1978 apud BALDAM; VIEIRA, 2013, p. 58).

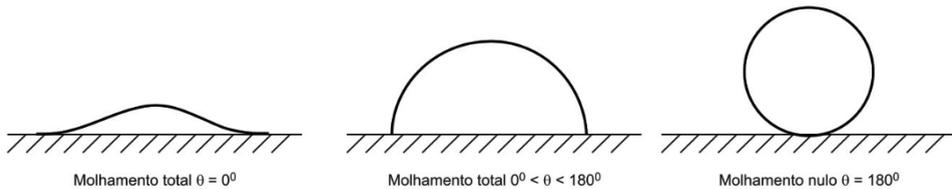
Já a nucleação heterogênea é caracterizada pela presença de substratos, em que a tensão superficial se relaciona ao balanço energético para que o embrião mantenha-se na forma de um núcleo sólido. Esse embrião apresenta-se na superfície do substrato como uma espécie de calota esférica, sendo que o quanto de efeito que o substrato terá na nucleação é obtido pelo chamado ângulo de molhamento ( $\theta$ ), que surge entre o embrião e o substrato, conforme a Figura 3.6.

Figura 3.6 | Formação de um núcleo heterogêneo sobre um substrato e as tensões superficiais envolvidas



Fonte: adaptada de Campos Filho e Davies (1978 apud BALDAM; VIEIRA, 2013, p. 62).

Figura 3.7 | Exemplos esquemáticos de molhamento entre embrião e substrato na nucleação heterogênea



Fonte: Baldam; Vieira (2013, p. 62).



### Assimile

A expressão molhamento (Figura 3.7) traduz o nível de afinidade físico-química existente entre metal e substrato, portanto quanto menor o ângulo de molhamento, maior será a contribuição da energia superficial do substrato na nucleação.

**Inoculantes (refinadores de grão):** no que diz respeito ao desempenho mecânico, é importante que uma liga metálica tenha o tamanho de grãos pequenos, o que faz com que a resistência mecânica do material seja aumentada substancialmente, mantendo o alongamento. Sendo os grãos menores, maiores serão a densidade de contornos e a densidade da área superficial de grãos por unidade de volume. Como o contorno é uma barreira para o deslocamento das discordâncias, a deformação plástica é restrita. Quando se deseja maior resistência mecânica, mantendo o alongamento, é comum buscar um processo que aumente a frequência de nucleação e, conseqüentemente,

minimize o tamanho médio dos cristais sólidos. Este processo é conhecido como refino de grão. Para favorecer o refino de grão, antes da solidificação, são adicionados ao metal líquido substratos heterogêneos com alto poder de nucleação na forma de partículas finamente divididas. Estas adições, chamadas de inoculantes, são dispersas uniformemente no metal líquido. A Figura 3.8, a seguir, apresenta duas macroestruturas de um lingote de alumínio, sendo uma sem adição de inoculantes e a outra com adição de inoculantes.



### Pesquise mais

Para aprender mais sobre nucleação, leia o item 3.2.3.3 do Capítulo 3 do livro referenciado a seguir. Neste tópico, você observará como ocorre a nucleação dinâmica.

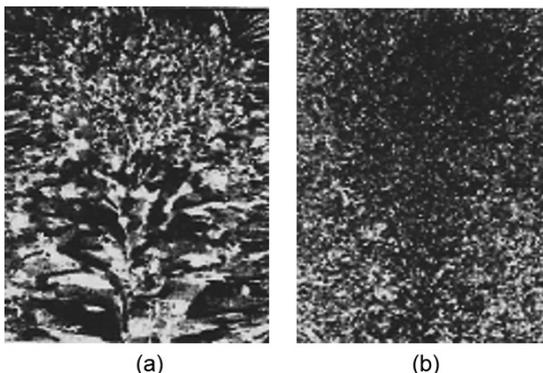
BALDAM, Roquemar de Lima; VIEIRA, Estéfano Aparecido. **Fundição: processos e tecnologias correlatas**. 1. ed. São Paulo: Editora Erica, 2013.

Leia, também, o seguinte artigo:

FERREIRA, Jetson Lemos; MELO, Túlio Magno Füzessy de; RIOS, Paulo Rangel. Efeitos de parâmetros termomecânicos em mecanismos dinâmicos de refino de grão em aços C-Mn-Nb e C-Mn. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v. 3, n. 4, p. 29-35, abr.-jun. 2007. Disponível em: <<http://www.tecnologiammm.com.br/files/v3n4/v3n4a05.pdf>>. Acesso em: 6 out. 2016.

Assim, cada partícula atua com um substrato localizado para nuclear a fase sólida. Para favorecer a nucleação, a interface líquido/substrato deve ter um baixo nível energético.

Figura 3.8 | Macroestrutura de lingote de alumínio solidificado (a) sem adição de inoculante e (b) com inoculação prévia titânio-boro



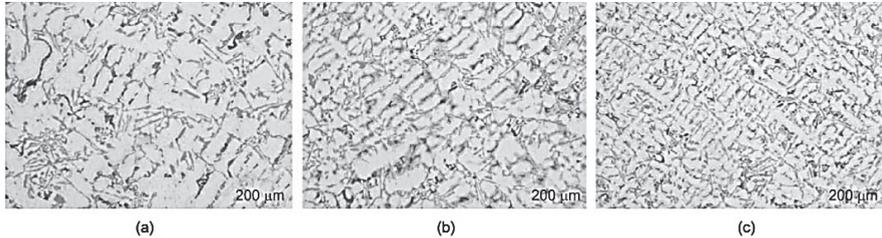
(a)

(b)

Fonte: Campos Filho e Davies (1978 apud BALDAM; VIEIRA, 2013, p. 64).

O refino do grão ou formação de dendritas mais finas pode também ser obtido por meio de altas taxas de resfriamento da liga, conforme mostra a Figura 3.9.

Figura 3.9 | Resfriamento de uma liga Al7%Si resfriada sob taxas diferentes



Fonte: Dobrzanski (2007 apud BALDAM; VIEIRA, 2013, p. 65).

Quanto mais alta a taxa de resfriamento, mais refinada é a microestrutura.

O quadro a seguir apresenta alguns tipos de inoculantes utilizados para refino de grãos.

Quadro 3.1 | Inoculantes para refino de grão e respectivas eficiências

Metais e ligas	Inoculantes	Eficiência relativa
Ligas de magnésio	Cloreto de ferro	Alta
	Carbono	Alta
	Zircônio	Moderada
Alumínio e suas ligas	Titânio	Alta
	Boro	Alta
	Nióbio	Moderada
Titânio e suas ligas	Terras raras	Moderada
	Níquel	Baixa
	Cobalto	Baixa
Zinco	Alumínio	Moderada
Estanho	Germânio	Moderada
	Índio	Baixa
Chumbo	Telúrio	Moderada
Ligas de cobre	Ferro	Moderada
	Nióbio	Baixa
	Vanádio	Baixa
Ligas de níquel	Cobalto	Moderada
	Óxido de cobalto	Alta
Ferro fundido	Terras raras	Moderada
Aço comum	Nióbio	Moderada
	Titânio	Moderada

Aço Hadfield (13% Mn)	Cianeto de cálcio	Moderada
Aço inoxidável	Óxido de níquel	Moderada
Aço-ferramenta	Óxido de ferro	Baixa

Fonte: Campos Filho e Davies (1978 apud BALDAM; VIEIRA, 2013, p. 64).

**Mecanismos de crescimento:** após o embrião estar formado, estável, e o núcleo de solidificação, formado, tem início o crescimento do grão, de forma espontânea, até que todo líquido se transforme em sólido. A maioria das ligas com grande intervalo de solidificação tem crescimento dendrítico, sendo que a forma de crescimento depende da composição química da liga e, também, do intervalo de solidificação.



### Refleta

Em relação ao processo de solidificação e resfriamento, o comportamento das ligas altera-se de acordo com as variadas temperaturas.

Qual é a relação da velocidade de solidificação e das condições de formação da estrutura da peça fundida?

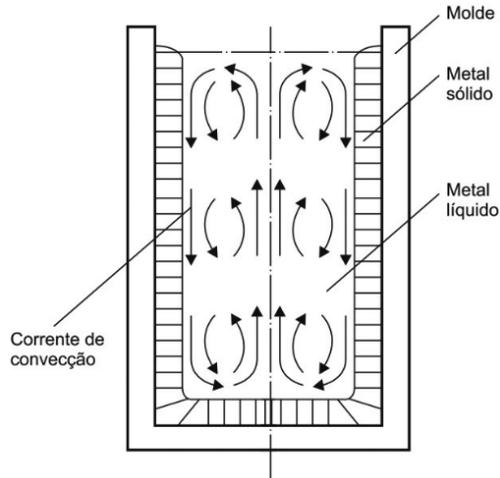
Leia o item 3.2.7 do Capítulo 3, página 69, do livro *Fundição: processos e tecnologias correlatas*, dos autores Roquemar de Lima Baldam e Estéfano Aparecido Vieira.

**Superaquecimento:** na prática da fundição, o metal líquido é sempre vazado no molde a temperaturas superiores à temperatura de fusão. Esta diferença entre a temperatura de vazamento e a de início de solidificação é chamada de superaquecimento. Segundo Garcia (2007 apud BALDAM; VIEIRA, 2013):

$$\Delta T = T_v - T_f$$

em que  $\Delta T$  representa o superaquecimento,  $T_v$ , a temperatura de vazamento, e  $T_f$ , a temperatura de fusão da liga. Na prática, nos processos de fundição, o superaquecimento não ultrapassa os 10% da temperatura de fusão. O calor obtido pelo superaquecimento é dissipado pelas correntes de convecção, que podem ser forçadas ou naturais, conforme apresenta a Figura 3.10.

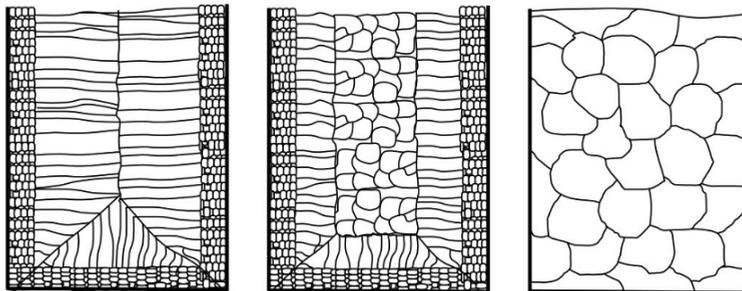
Figura 3.10 | Esquema das correntes de convecção dentro de um molde no início da solidificação



Fonte: adaptada de Campos Filho (1978 apud BALDAM; VIEIRA, 2013, p. 68).

Quando os metais são vazados em um molde, durante a formação dos cristais, podem surgir três tipos de regiões diferentes, sendo: zona coquilhada, zona colunar e zona equiaxial central. A zona coquilhada apresenta uma camada periférica onde os grãos são formados a partir de núcleos nas paredes do molde e crescem na forma de cristais finos. Na zona colunar, os cristais se formam por meio do fluxo de calor para fora do molde com grãos grandes e alongados. A morfologia equiaxial também ocorre na zona equiaxial central, onde a transferência de calor ocorre em todas as direções com praticamente a mesma intensidade. Porém, como a taxa de nucleação é reduzida, os grãos são mais grosseiros, quando comparados aos da zona coquilhada. É de maior interesse para a metalurgia a proporção relativa da zona colunar e da zona equiaxial central admissível na peça bruta, já que a zona coquilhada, em geral, é pequena e com grãos mais finos, com pouca influência nas características da peça final. As possíveis macroestruturas de solidificação de um lingote fundido estão apresentadas na Figura 3.11, a seguir.

Figura 3.11 | Possíveis macroestruturas de um lingote solidificado



Fonte: Baldam; Vieira (2013, p. 70).

**Oxidação:** o metal apresenta maior reatividade quando está no estado líquido do que quando está no estado sólido, pois seus átomos estão mais distantes uns dos outros, facilitando a reação com outros elementos. Para a fundição, isto se torna um problema, pois os metais líquidos em geral têm grande afinidade com o oxigênio. Desta forma, dois aspectos devem ser analisados: a formação de óxidos e as perdas de material metálico durante a fusão. Alguns elementos, como os óxidos de alumínio, o cálcio e o magnésio, têm menor energia livre (mais fortemente negativas). Consequentemente, os óxidos são mais facilmente formados, sendo estes elementos alguns dos que têm maior afinidade com o oxigênio. Esta propriedade de oxidação é importante quando é desejado desoxidar o banho de outro metal que tenha afinidade com o oxigênio menor que a dos citados anteriormente. Assim, o metal adicionado oxida-se no lugar da liga a ser produzida.

**Perdas de material metálico durante a fusão:** são comuns perdas de materiais durante o processo de fusão das ligas. Elas acontecem também devido à formação dos óxidos. No caso da fusão dos latões em fornos de cadinho, as perdas podem variar de valores inferiores a 1% indo até aproximadamente 5%. Os latões são ligas cobre-zinco. O zinco tem maior tendência à formação de óxido e, assim, quanto maior for o teor de zinco, maior será a perda por oxidação. De maneira geral, as perdas por oxidação são diretamente proporcionais ao teor de elementos com muita afinidade com o oxigênio. Para minimizar as perdas por oxidação, recursos como o uso de atmosferas redutoras ou neutras, escórias protetoras e adição de elementos que inibem a oxidação dos metais e ligas são algumas das alternativas mais usadas. Em relação às atmosferas redutoras ou neutras, a atmosfera neutra pode ser conseguida por meio de hélio e argônio, que impedem a formação do óxido do metal no banho. Para alcançar a atmosfera, podem ser utilizados hidrocarbonetos gasosos, hidrogênio e monóxido de carbono, que reduzem os óxidos já existentes. É importante destacar que a atmosfera de CO pode ser obtida por meio do recobrimento do banho metálico com fragmentos de carvão vegetal ou coque. As escórias protetoras podem ser à base de sílica, de bórax ou de misturas salinas complexas. Essas escórias são importantes, pois formam uma camada entre o banho e a atmosfera, reduzindo bastante a oxidação.



### Exemplificando

Adição de elementos que inibem a oxidação dos metais e ligas: a adição de elementos de maior afinidade pelo oxigênio, como o alumínio e o berílio, atenua a oxidação da liga metálica de interesse.

### Sem medo de errar

Você foi contratado pela empresa de fundição de peças metálicas para atuar na melhoria dos processos de fundição, tendo participado de reuniões com as equipes e acompanhado de perto os processos avaliando os resultados apresentados.

Como um dos problemas que a empresa está enfrentando diz respeito à perda metálica por oxidação durante o processo de fundição de uma liga de aço, quais são as soluções que você propõe para minimizar tais perdas e melhorar o processo e os resultados da empresa?

No decorrer dessa seção, apresentamos diversos aspectos sobre solidificação e resfriamento durante os processos de fundição, as formas de início da cristalização quando o metal está passando do estado líquido para o sólido, os mecanismos de nucleação e crescimento que originam a estrutura cristalina das ligas metálicas, as temperaturas envolvidas, o superaquecimento e o super-resfriamento e as perdas metálicas por oxidação e durante a fusão.

Como uma das dificuldades que a empresa vem enfrentando está relacionada à perda metálica por oxidação, recursos como o uso de atmosferas redutoras ou neutras, escórias protetoras e adição de elementos que inibem a oxidação dos metais e ligas são algumas das alternativas mais usadas.

Em relação às atmosferas redutoras ou neutras, a atmosfera neutra pode ser conseguida por meio de hélio e argônio, que impedem a formação do óxido do metal no banho. Para alcançar a atmosfera, podem ser utilizados hidrocarbonetos gasosos, hidrogênio e monóxido de carbono, que reduzem os óxidos já existentes. É importante destacar que a atmosfera de CO pode ser obtida por meio do recobrimento do banho metálico com fragmentos de carvão vegetal ou coque.

As escórias protetoras podem ser à base de sílica, de bórax ou de misturas salinas complexas. Essas escórias são importantes, pois formam uma camada entre o banho e a atmosfera, reduzindo bastante a oxidação.

E, ainda, é possível a adição de elementos que inibam a oxidação dos metais e das ligas com a adição de elementos de maior afinidade pelo oxigênio, como o alumínio e o berílio, para atenuar a oxidação da liga metálica de interesse.

Outro ponto é avaliar a composição da liga que está sendo fundida e o material do cadinho, por exemplo, pois o elemento de maior afinidade com o oxigênio tende a apresentar perda por oxidação. Como a liga metálica que está em estudo é uma liga de aço, pode-se adicionar o alumínio como forma de desoxidar o banho metálico.

## Avançando na prática

### Refinando os grãos da estrutura cristalina

#### Descrição da situação-problema

Em uma das peças produzidas pela TF Total Foundry, a partir de uma liga de alumínio, foi observado que a estrutura dos grãos formados durante a solidificação

apresenta granulação grosseira e afeta as propriedades da peça fundida, sendo que a resistência mecânica está abaixo do desejado, que é de 230 Mpa, e o alongamento deve manter-se em torno de 3%.

O que você propõe para melhorar a estrutura cristalina dessa peça?

Qual é a maneira de refinar os grãos cristalinos e melhorar as propriedades da peça?

### Resolução da situação-problema

Em relação ao desempenho mecânico, a liga metálica deve ter grãos menores. Desta forma, a resistência mecânica do material é aumentada substancialmente, mantendo o alongamento.

Sendo os grãos menores, maiores serão a densidade de contornos e a densidade da área superficial de grãos por unidade de volume. Como o contorno é uma barreira para o deslocamento das discordâncias, a deformação plástica é restrita.

Quando se deseja maior resistência mecânica, mantendo o alongamento, é comum buscar um processo que aumente a frequência de nucleação e, conseqüentemente, minimize o tamanho médio dos cristais sólidos. Este processo é conhecido como refino de grão.

Para favorecer o refino de grão, antes da solidificação, são adicionados ao metal líquido substratos heterogêneos com alto poder de nucleação na forma de partículas finamente divididas.

Estas adições, chamadas de inoculantes, são dispersas uniformemente no metal líquido.

Para o caso da liga de alumínio, pode ser adicionado como inoculante o titânio, que tem alta eficiência para esta finalidade. Uma outra opção seria aumentar a taxa de resfriamento para melhorar e refinar os grãos cristalinos.

### Faça valer a pena

**1.** A solidificação tem início quando os átomos que estão se movimentando a esmo no metal líquido começam a formar embriões que dão origem aos núcleos, e o crescimento desses núcleos formam as estruturas cristalinas que se constituirão nos grãos dos metais.

Leia as afirmações a seguir e assinale verdadeiro (V) para as corretas e falso (F) para as incorretas e, em seguida, assinale a alternativa correta:

( ) A velocidade com que a solidificação avança depende da transferência de calor para o molde.

( ) Controlar a solidificação é importante para que as peças fundidas não apresentem homogeneidades.

( ) A nucleação de cristais sólidos na massa líquida dos metais é mais instável quando comparada à formação de núcleos de liquefação durante a fusão.

( ) As ligas metálicas, em geral, apresentam a solidificação na forma de cristais.

a) F – F – V – F.

b) V – F – F – V.

c) V – F – V – F.

d) F – V – V – V.

e) V – F – V – V.

**2.** A solidificação se processa em duas etapas sucessivas, a nucleação e o crescimento. A nucleação traduz o modo pelo qual a fase sólida surge de forma estável no meio da fase líquida, sob a forma de pequenos núcleos cristalinos. Já o crescimento traduz o modo pelo qual esses núcleos crescem sob a forma de cristais ou grãos cristalinos.

Leia as afirmações a seguir e responda.

I. Na nucleação homogênea, a nucleação ocorre em meio à fase líquida, sem interferência ou participação energética de elementos estranhos ao sistema original.

II. Na nucleação homogênea, o grupo de átomos organizados que formam um embrião pode ser chamado de núcleo, porque seu tamanho é suficiente para ser estável e crescer.

III. A influência de elementos estranhos ao sistema, chamados de substratos, participando da sobrevivência do embrião sob a forma de núcleo sólido, é característica da nucleação heterogênea.

IV. A superfície que se formará pela nucleação a partir de um substrato na nucleação heterogênea é maior, quando comparada à superfície formada pela nucleação homogênea.

É correto o que se afirma em:

a) II e IV, apenas.

b) II, apenas.

c) III, apenas.

- d) I e III, apenas.
- e) I e IV, apenas.

**3.** Na fundição, o uso de inoculantes ajuda a melhorar a estrutura cristalina, quando, antes da solidificação, acontece a adição ao metal líquido de substratos heterogêneos com alto poder de nucleação na forma de partículas finamente divididas. Estas adições, chamadas de inoculantes, são dispersas uniformemente no metal líquido.

Assinale a alternativa que preenche corretamente as lacunas a seguir.

Os inoculantes são utilizados no processo de fundição de metais, quando se deseja \_\_\_\_\_ a resistência mecânica, \_\_\_\_\_ o alongamento. Para isso, utiliza-se um processo que \_\_\_\_\_ a frequência de nucleação, \_\_\_\_\_ os grãos do metal.

- a) Reduzir; aumentando; mantém; refinando.
- b) Aumentar; mantendo; aumenta; refinando.
- c) Manter; reduzindo; reduz; engrossando.
- d) Aumentar; reduzindo; reduz; resfriando.
- e) Reduzir; reduzindo; reduz; refinando.

## Seção 3.2

### Contração, concentração de impurezas, desprendimento de gases

#### Diálogo aberto

Vamos continuar nossos estudos de fundição e processos siderúrgicos? Seja bem-vindo!

Como um engenheiro recém-formado, você foi contratado por uma empresa do setor metalúrgico que atua na fabricação de peças fundidas para aplicações diversas na indústria.

Você foi capaz de indicar soluções para melhorar os resultados de um processo de fundição, a qualidade e as propriedades de uma peça fundida, compreendendo os aspectos de solidificação, controles de temperatura, uso de elementos inoculantes e tempo de resfriamento.

Agora, o seu desafio é identificar as dimensões do fundido com base nas especificações da peça usinada e indicar soluções para evitar o surgimento de defeitos, tais como porosidade e inclusões não metálicas.

Nesta seção, você identificará as principais causas de defeitos originados durante a solidificação e a forma de evitá-los. Ao desta etapa, você será capaz de compreender quais são os cuidados que devem ser tomados no projeto de uma peça fundida no que diz respeito ao processo de solidificação.

Figura 3.12 | Imagem da simulação da solidificação de uma peça fundida



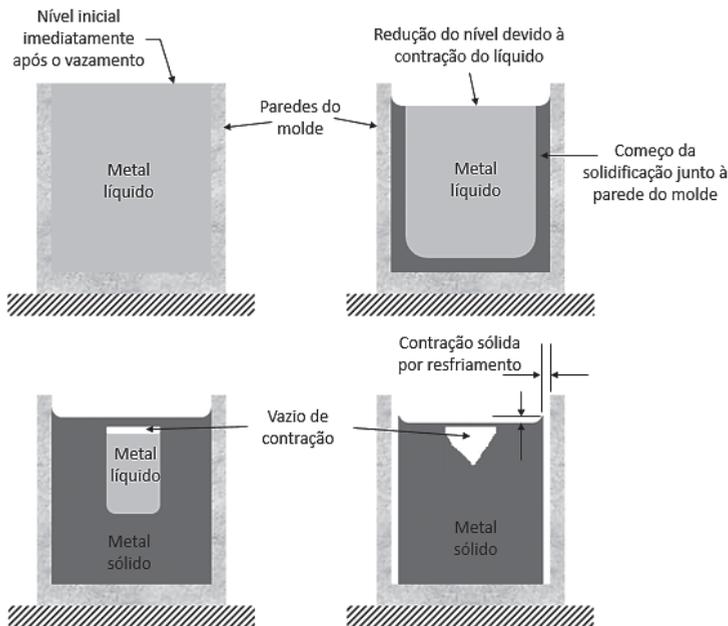
Fonte: <[http://www.sutcast.com/Libraries/Events\\_2010/Module-m.sflb.ashx](http://www.sutcast.com/Libraries/Events_2010/Module-m.sflb.ashx)>. Acesso em: 10 out. 2016.

## Não pode faltar

A contração é uma redução no volume de peças fundidas que ocorre no metal líquido, nos processos de solidificação e no metal sólido, sendo que o metal líquido vazado ocupa a cavidade do molde e, quando inicia o processo de resfriamento, o metal se contrai, diminuindo o volume final da peça fundida. Estas alterações de volume devem ser consideradas nos projetos das peças fundidas, dos moldes, dos canais de enchimento e da alimentação. Em geral, as contrações que ocorrem durante as fases da fundição provocam defeitos no fundido. Em razão disso, devem ser controladas.

Então, a contração ocorre em três fases: contração no estado líquido, que é originada devido ao aumento da densidade do metal enquanto ocorre o resfriamento; contração durante a solidificação, originada devido à cristalização na etapa de solidificação; contração no estado sólido, que tem origem no resfriamento do metal sólido, desde a temperatura de solidificação até a temperatura ambiente e ocorre em praticamente todos os metais, porque a fase sólida tem massa específica maior que a fase líquida, conforme ilustra a Figura 3.13.

Figura 3.13 | Representação esquemática da contração de um fundido durante a solidificação e o resfriamento



Fonte: adaptada de Groover (2014, [s.p]).

A transformação de fase que acompanha a solidificação causa a redução no volume por unidade de massa do metal. O Quadro 3.2 apresenta valores de contração linear para algumas ligas metálicas.

Quadro 3.2 | Valores de contração linear típicos para diferentes metais fundidos

Metal	Contração linear (%)
Ligas de alumínio	1,3
Latão amarelo	1,3 – 1,6
Ferro fundido cinzento	0,8 – 1,3
Ferro fundido branco	2,1
Magnésio	2,1
Liga de magnésio	1,6

Fonte: adaptada de Metals Handbook (2008 apud GROOVER, 2014, [s.p]).

A contração sólida deve ser objeto de estudo no projeto do modelo de fundição e dependerá da liga utilizada.

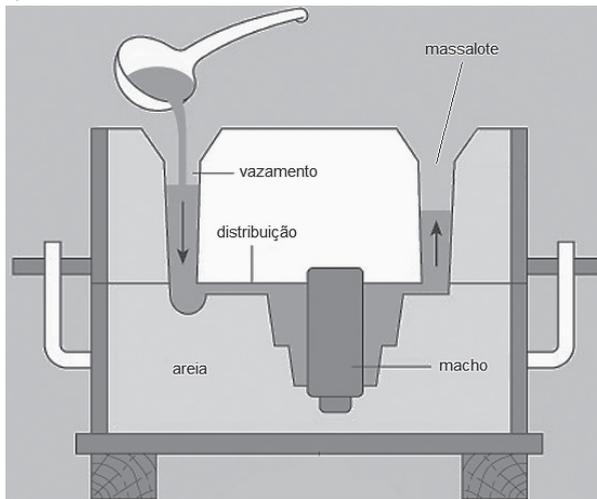


### Exemplificando

Como exemplos de contração linear, podemos citar os aços fundidos com 2,18% a 2,47% de contração linear, sendo o menor valor para teores mais altos de carbono; ferros fundidos com percentual de contração entre 1 a 1,5%, sendo 1% para o ferro fundido cinzento e de 1,3 a 1,5% para o ferro fundido nodular; para o níquel e ligas cobre-níquel, este percentual de contração vai de 8 a 9%.

A contração provoca uma heterogeneidade conhecida como rechupe ou vazio. Estes vazios podem localizar-se na região interna das peças, próximos à superfície, mas, na maior parte dos casos, não são visíveis externamente. A contração pode provocar defeitos internos, trincas a quente e tensões residuais. No entanto, estes problemas podem ser controlados por meio de considerações no projeto da peça fundida, tratamentos de alívio de tensões e projeto do molde. Uma das formas mais usuais em fundição para evitar os efeitos indesejados da contração do metal líquido e durante a solidificação é por meio do uso de alimentadores, que também são conhecidos como massalotes (Figura 3.14), pois estes elementos irão garantir que as regiões sujeitas aos vazios de contração sejam preenchidas com metal líquido até a solidificação total da peça.

Figura 3.14 | Exemplo de uso de alimentador (massalote) em molde de fundição



Fonte: adaptada de <<http://memechanicalengineering.com/casting-process-advantages-and-limitations/>>. Acesso em: 10 out. 2016.



### Assimile

Então, podemos dizer que o massalote é uma espécie de reserva de metal líquido, projetado para fornecer metal líquido na cavidade do molde, a fim de compensar os efeitos da contração no estado líquido e durante a solidificação, com o objetivo de alimentar a peça, evitando, assim, a formação de vazios ou rechupes.

Neste caso, os vazios ocorrem no massalote que será descartado na rebarbação e não comprometerá a qualidade da peça fundida (Figura 3.15).

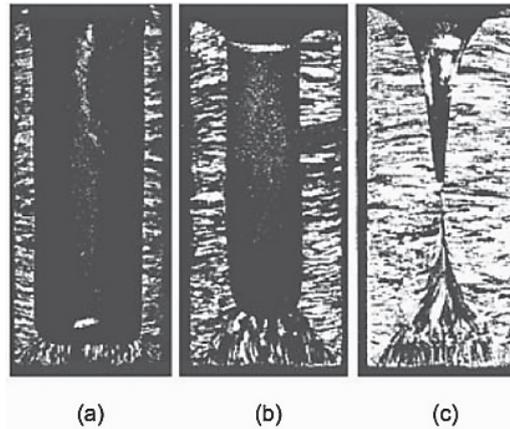
Figura 3.15 | Peça de bronze fundido mostrando os canais de enchimento e massalote



Fonte: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Riser\\_\(casting\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Riser_(casting))>. Acesso em: 10 out. 2016.

Uma das formas de solidificação de um metal fundido é por meio do surgimento de uma casca de metal sólido na parede do molde, sendo que quanto mais a solidificação avança, mais a espessura desta casca aumenta. Segundo Baldam (2013, p.72), "isso é comprovado pela decantação do excesso do líquido, do molde, no processo de solidificação". A Figura 3.16 apresenta a solidificação do alumínio fundido.

Figura 3.16 | Desenvolvimento de um fundido de alumínio pela decantação do líquido do molde, após (a) 20 segundos, (b) 40 segundos e (c) solidificação completa



Fonte: Baldam; Vieira (2013, [s.p]).

Quando o metal já se encontra totalmente solidificado, o uso de massalotes, resfriadores e direcionadores de resfriamento já não faz mais efeito, pois toda a massa já se encontra no estado sólido. Para estes casos, é necessário considerar ao projeto da peça fundida, em todas as dimensões, um percentual correspondente aos coeficientes de contração linear da respectiva liga metálica.



### Pesquise mais

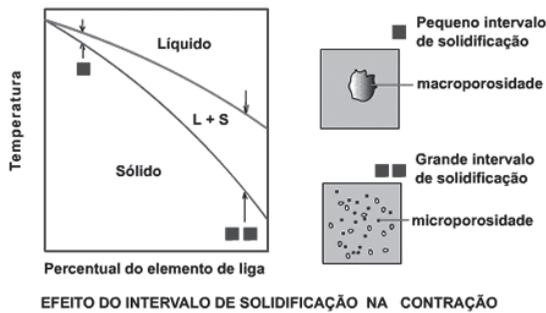
Na página 111 do livro referenciado a seguir, você encontrará a tabela de **contrações lineares médias livres de ligas fundidas**:

BALDAM, R. L.; VIEIRA, E. A. **Fundição**: processos e tecnologias correlatas. 1. ed. São Paulo: Editora Erica, 2013. p. 111.

**Trincas a quente**: as trincas a quente podem ocorrer quando o formato da peça é muito complexo e as trincas encontram-se próximas às regiões que solidificam por último, bem como por ligas com intervalo de solidificação mais amplo. Ocorre formação e separação dos cristais, sendo que há redução do líquido restante entre os cristais que começam a sofrer coesão. A partir daí, acontece o desenvolvimento de tensões cisalhantes resultantes da contração, e as dendritas primárias são separadas por um filme líquido. Surge a segregação das fases de menor ponto de fusão ou inclusões nos contornos de grão, afetando a resistência do metal fundido, e a peça fica sujeita a trincas. Uma forma de evitar este tipo de defeito é por meio do refino de grão. Outra possibilidade de trinca a quente é aquela que se inicia na superfície externa e segue para o interior da peça, devido à formação irregular da camada sólida no início da solidificação, normalmente observada pelos grandes cristais localizados na superfície exterior. A segregação de composições de liga de menor ponto de

fusão nos contornos de grão é a causa desse defeito. Se o processo de solidificação e resfriamento não for controlado, podem surgir efeitos indesejados muito comuns em fundição, ocasionados pela contração e pela retenção de gases no molde, como a porosidade, que pode se apresentar como macroporosidade ou microporosidade. O intervalo de solidificação (Figura 3.17) é um dos fatores que determina o tipo de porosidade. A macroporosidade é característica de ligas metálicas com pequeno intervalo de solidificação. Já a microporosidade ocorre quando as ligas metálicas têm grande intervalo de solidificação.

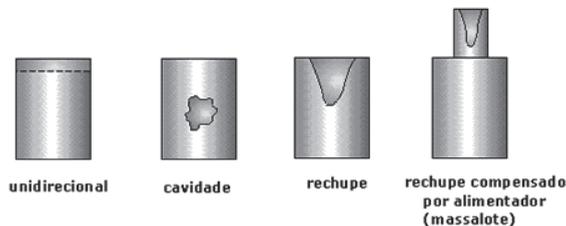
Figura 3.17 | Efeito do intervalo de solidificação na contração



Fonte: <[http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir\\_noticia/6751-defeitos-de-solidificacao](http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/6751-defeitos-de-solidificacao)>. Acesso em: 14 out. 2016.

Algumas formas típicas de macroporosidades são apresentadas na Figura 3.18.

Figura 3.18 | Tipos de macroporosidades



Fonte: <[http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir\\_noticia/6751-defeitos-de-solidificacao](http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/6751-defeitos-de-solidificacao)>. Acesso em: 14 out. 2016.

Existe a possibilidade de que a solidificação seja unidirecional, ocorrendo uma redução na altura da peça, não caracterizada como uma porosidade ou cavidade, resultando em defeito chamado de rechupe. Se a liberação de calor ocorrer em outras direções, o resultado é uma grande porosidade no centro da peça. Também é possível que este vazio forme-se na última região a se solidificar. O uso dos alimentadores (massalotes) também tem a função controlar os vazios originados pelas contrações de solidificação, sendo eles posicionados próximos das regiões que se solidificam no final. Os reservatórios têm a função de fornecer metal líquido suficiente de modo que o vazio ou o rechupe localize-se no massalote, e a peça fique

isenta de macroporosidade. O massalote é uma reserva de metal líquido adjacente à peça, que tem a função de compensar a contração líquida e de solidificação. O dimensionamento dos massalotes deve considerar que a solidificação dos massalotes ocorra após a solidificação da peça. O massalote deve se localizar em partes da peça que se solidificam por último, conter metal líquido suficiente para compensar o efeito da contração e também representar mínima massa relativa à massa da peça, por questões de custo do material empregado. Para o dimensionamento e o uso de alimentadores, utilizaremos a equação de Chvorinov, o método dos módulos e a regra da contração. O tempo de solidificação da seção de uma peça pode ser expresso pela equação de Chvorinov (POIRIER e POIRIER, 1994 apud BALDAM; VIEIRA, 2013), da seguinte forma:

$$t = C \cdot \left( \frac{V}{S} \right)^2$$

Em que:  $t$  é o tempo de solidificação da parte da peça que se tem interesse;  $C$  é a constante que depende das condições locais do molde;  $V$  é o volume da parte da peça em questão;  $S$  é a área da superfície resfriada pelo molde da parte da peça em questão. Como  $C$  é uma constante, isso indica que a relação  $(V/S)$  é que determina a sequência de solidificação da peça. Essa relação é chamada de módulo parcial de solidificação da peça. Pela regra dos módulos, o cálculo dos módulos de cada segmento é feito da seguinte forma:  $M$  é o módulo do segmento da peça em cm;  $V$  é o volume do segmento da peça em  $\text{cm}^3$ ;  $S$  é a área do segmento da peça em contato com o molde em  $\text{cm}^2$ . O tempo de resfriamento de uma peça ou o elemento da peça é a função de seu módulo parcial de resfriamento  $M$ . Para que o massalote solidifique-se após a peça, é preciso que ele tenha um módulo ( $M_m =$  módulo do massalote) superior ao módulo da peça ( $M_p$ ). Após definido que o massalote se solidificará depois da peça, verificamos por meio da "regra da contração" se ele terá volume suficiente para alimentar a parte da peça à qual se destina. Para o cálculo do massalote da região a alimentar, usamos a regra dos módulos, que deve expressar a seguinte relação:

$$M_m \geq k \cdot M_p$$

Em que:  $k$  é um coeficiente que depende das condições de funcionamento do massalote (Quadro 3.3). Pela regra da contração, o massalote deve ter uma quantidade de metal líquido suficiente para compensar a contração da peça ou elemento da peça ao ser resfriado.

Quadro 3.3 | Valores do coeficiente K para condições de funcionamento do massalote

Caso geral	K = 1,2
Massalote aquecido pelo ataque	K = 1,1
Massalote com luva exotérmica	K = 0,9 a K = 0,8
Massalote para peça de ferro fundido da grafita lamelar vazado em molde rígido	K = 0,6
Massalote com luva exotérmica para peça de ferro fundido de grafita lamelar vazado em molde rígido	K = 0,5

Fonte: Baldam; Vieira (2013).

A regra da contração é expressa por:

$$V_m = k \cdot r \cdot V_c$$

Em que:  $V_m$  é o volume do massalote,  $V_c$  é o volume da cavidade ou do metal líquido da peça ou elemento da peça que vai ser alimentada,  $r$  é o coeficiente de contração volumétrica do metal ou liga metálica e  $k$  é o coeficiente que depende das condições de funcionamento do massalote. Para se determinar o volume da cavidade do molde que será utilizado na regra da contração, é necessário considerar a relação de densidades do metal no estado sólido e no estado líquido e o volume e a massa da peça ou parte da peça em questão, usando a seguinte expressão:

$$V_c = V_p \cdot \frac{\rho_s}{\rho_l}$$

Em que:  $V_p$  é o volume da peça sólida e fria, e  $\rho_s$  e  $\rho_l$  são as densidades do metal no estado sólido e líquido, respectivamente. A escolha do massalote por meio das regras dos módulos e da contração deve levar em consideração o maior massalote. O massalote deve atuar com pressão máxima durante o tempo de solidificação e deve ter massa mínima em relação à massa da peça. O volume do massalote deve ser maior ou igual ao volume de metal a ser fornecido para compensação da contração durante a solidificação, conforme a equação básica a seguir:

$$V_m = \frac{V_p \cdot b}{\eta \cdot b}$$

Em que:  $V_m$  volume do massalote;  $V_p$  é o volume da peça ou parte da peça a ser alimentada;  $b$  é o coeficiente de contração volumétrica; e  $\eta$  é o rendimento do massalote.



### Refleta

A utilização de alimentadores, também conhecidos como montantes ou massalotes, é importante para evitar defeitos nas peças fundidas. Contudo, o uso excessivo de massalotes é bom ou ruim para o processo de fundição?

Qual é a relação de um bom projeto de fundição no que diz respeito ao posicionamento e à massa dos massalotes com a economia de material?

Leia o item 5.3.5 do Capítulo 5, do livro *Introdução aos processos de fabricação*, de Mikell O. Groover. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2640-4/cfi/6/34!/4/212@a0:1.65>>. Acesso em: 11 out. 2016.

**Concentração de impurezas:** as impurezas nas ligas apresentam comportamento diferente se a liga estiver no estado líquido ou no sólido, sendo que, no estado líquido, surgem impurezas totalmente dissolvidas e homogêneas e, no estado sólido, menos solúveis, ficando acumuladas nas regiões em que a solidificação ocorreu por último, por exemplo, o fósforo e o enxofre nas ligas ferro-carbono. Também ocorre a segregação de elementos de liga e composição química não uniforme além de propriedades mecânicas diferentes em determinadas regiões.

**Inclusões não metálicas:** alguns produtos originários de gases aparecem na estrutura de fusão na forma de óxidos, nitretos ou sulfetos. Esses produtos são chamados de inclusões endógenas, pois têm origem no próprio material fundido. O efeito das inclusões é similar ao das cavidades, agindo como descontinuidades e afetando o comportamento plástico do material. Em processos de fusão de ligas ferrosas, as inclusões, de acordo com a sua origem, podem ser classificadas em dois grupos principais: as endógenas e as exógenas. Para evitar estes defeitos provocados pelas inclusões, é necessário um bom processo de escorificação (remoção da escória) e, também, cuidados em relação ao projeto de alimentação e limpeza de equipamentos auxiliares.

**Aspiração de ar:** outro ponto importante a se considerar no projeto dos fundidos é a presença de gases dissolvidos no metal líquido, que favorece a formação de vazios pela retenção de ar e gases na cavidade do molde, formada no líquido remanescente devido à solubilidade do gás no líquido ser maior do que no sólido. Como normalmente esses vazios formam-se longe dos alimentadores, não conseguem ser preenchidos com o metal líquido, sendo necessário minimizar este efeito por meio do uso de processos de degaseificação. Mais comuns nas ligas ferro-carbono, temos o oxigênio dissolvido na liga, que tende a se combinar com o carbono, formando  $\text{CO}_2$ , facilmente eliminado se a liga estiver no estado líquido. Contudo, com a viscosidade aumentando durante a solidificação, este gás tende a ficar retido na peça, formando bolhas e vazios. Para se evitar este defeito, faz-se a adição ao metal líquido de “desoxidantes”, como alguns tipos de ferro-liga, como ferro-silício e ferro-manganês ou alumínio. O oxigênio reage preferencialmente com estes elementos, formando óxidos sólidos, resultando em  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

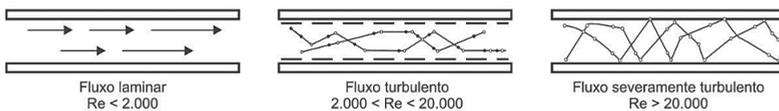
**Turbulência do fluxo metálico:** o estudo das características do fluxo de metais em canais é facilitado pelo fato de que o comportamento de metais e ligas com suficiente superaquecimento é bastante semelhante ao da água. Durante o fluxo de um líquido dentro de um canal, a ocorrência ou não de turbulência depende da relação entre forças de inércia do líquido e as forças devidas à viscosidade. Essa relação é expressa de maneira sintética pelo número de Reynolds,  $Re$  (MARIOTTO, ALBERTIN e FUOCO, 1987 apud BALDAM; VIEIRA, 2013).

$$Re = \frac{V \cdot dh}{\nu}$$

Em que:  $V$  é a velocidade do fluxo,  $dh$  é o diâmetro hidráulico do canal e  $\nu$  a viscosidade cinemática.

Embora, na prática de fundição, sempre ocorrerá alguma turbulência, a manutenção do número de Reynolds (Figura 3.19), dentro de limites aos quais corresponde a turbulência, é pouco prejudicial, ou seja, abaixo de 20.000, devendo se constituir em um dos critérios a adotar no cálculo das dimensões do sistema de canais.

Figura 3.19 | Tipos de fluxo conforme número de Reynolds



Fonte: adaptada de Mariotto, Albertin e Fuoco (1987 apud BALDAM; VIEIRA, 2013).

Na prática de fundição, o surgimento de regiões de baixa pressão devido à contração de fluxo decorrente do descolamento da corrente de líquido das paredes pode causar aspiração de ar e gases do molde e, conseqüentemente, oxidação do metal e formação de bolhas.

## Sem medo de errar

A empresa que o contratou como engenheiro de processos está desenvolvendo um novo produto fundido juntamente com seu cliente do setor metalúrgico e está encontrando dificuldades para aprovar as peças, pois elas estão apresentando defeitos do tipo porosidade e inclusões não metálicas durante o processo de usinagem posterior.

Como deve ser planejado o processo de fundição dessas peças, considerando as especificações da peça usinada? O que pode ser feito para evitar o surgimento desses defeitos como porosidade e inclusões de ligas metálicas?

Ao longo dessa seção, apresentamos os possíveis defeitos que podem surgir durante o processo de solidificação das ligas metálicas, suas principais causas e a forma de evitá-los.

No projeto do modelo das peças, deve ser considerado o percentual de contração linear que a liga metálica, no caso, o aço baixo carbono, irá apresentar. Nesse caso, um acréscimo de 2 a 2,4% nas dimensões lineares do modelo devem resolver. Para minimizar os efeitos da contração volumétrica durante a fase líquida e a solidificação, o dimensionamento de um alimentador (massalote) é recomendável. Para os defeitos de porosidade, como se trata de uma liga ferro-carbono, um bom projeto de saída de gases deve resolver. Mas, se a viscosidade aumentar durante a solidificação, uma medida para conter a formação de porosidades é a adição de “desoxidantes”, como ferro-liga, ferro-silício e ferro-manganês ou alumínio, ao metal líquido. Para a inclusão não metálica, os cuidados no desenvolvimento do projeto do molde de fundição devem levar em conta um bom processo de remoção da escória e dimensionamento dos canais de alimentação e saída de gases, além da limpeza dos equipamentos auxiliares.

## Avançando na prática

### Minimizando os efeitos da contração em peças fundidas

#### Descrição da situação-problema

Em uma das peças produzidas pela TF Total Foundry, a partir de uma liga de alumínio-silício-magnésio, pelo processo de fundição sob pressão em câmara fria, observou-se o surgimento de pequenos vazios, caracterizados como porosidades (Figura 3.20), nas peças após a fundição, e durante a usinagem, alguns rechupes em regiões superficiais e pequenas trincas.

O que você recomenda para eliminar estes defeitos das peças fundidas?

Figura 3.20 | Esquemático da formação esférica dos poros



Fonte: <[http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/imagens/grau-de-porosidade\\_.jpg](http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/imagens/grau-de-porosidade_.jpg)>. Acesso em: 18 out. 2016.

#### Resolução da situação-problema

Como se trata de um processo de fundição sob pressão, injeção em câmara fria, há de se identificar se o projeto do molde metálico considerou os canais de saída de gases e avaliar se é necessário aumentar a taxa de injeção do metal líquido. O aquecimento prévio do molde metálico na máquina injetora também é fundamental

para um bom fluxo de metal líquido na cavidade do molde, assim como o controle e a manutenção da temperatura do metal no vazamento e o ajuste do fornecimento de metal líquido meio da escolha correta da velocidade de injeção e das pressões nas fases de enchimento e de compactação do metal líquido na cavidade do molde. Outro aspecto a se verificar é a limpeza do banho da liga de alumínio, para eliminar os óxidos, carbonetos e nitretos do banho e, também, para reduzir o teor de hidrogênio. Para o problema dos rechupes, é interessante se fazer um bom projeto de massalotes, já que esse defeito se origina da contração de volume durante a solidificação. Além disso, é aconselhável avaliar, no projeto da peça, as regiões que combinam tensões de contração de pontos quentes.

### Faça valer a pena

**1.** A contração é uma redução no volume de peças fundidas, que ocorre no metal líquido, nos processos de solidificação e no metal sólido, sendo que o metal líquido vazado ocupa a cavidade do molde e, quando inicia o processo de resfriamento, o metal se contrai, diminuindo o volume final da peça fundida.

Leia as afirmações a seguir e responda.

I. A Contração no estado líquido é originada devido ao aumento da densidade do metal enquanto ocorre o resfriamento.

II. A transformação de fase que acompanha a solidificação causa aumento do volume por unidade de massa do metal.

III. A Contração no estado sólido é originada devido à cristalização na etapa de solidificação.

IV. A Contração no estado sólido tem origem no resfriamento do metal sólido, desde a temperatura de solidificação até a temperatura ambiente, e ocorre em praticamente todos os metais, porque a fase sólida tem massa específica maior que a fase líquida.

É correto o que se afirma em:

- a) II e III, apenas.
- b) II, apenas.
- c) III, apenas.
- d) I e III, apenas.
- e) I e IV, apenas.

**2.** O massalote é uma reserva de metal líquido adjacente à peça, que tem a função de compensar a contração líquida e de solidificação. O dimensionamento dos massalotes deve considerar que a solidificação destes ocorra após a solidificação da peça.

Leia as afirmações a seguir e assinale verdadeiro (V) para as corretas e falso (F) para as incorretas e, em seguida, assinale a alternativa correta:

( ) A escolha do massalote por meio das regras dos módulos e da contração deve levar em consideração o menor massalote.

( ) O massalote deve se localizar em partes da peça que se solidificam por último.

( ) O massalote deve conter metal líquido suficiente para compensar o efeito da contração.

( ) O massalote deve representar mínima massa relativa à massa da peça por questões de custo do material empregado.

a) F – F – V – F.

b) V – F – F – V.

c) V – F – V – F.

d) F – V – V – V.

e) V – F – V – V.

**3.** Alguns produtos originários de gases aparecem na estrutura de fusão na forma de óxidos, nitretos ou sulfetos. Esses produtos são chamados de inclusões endógenas, pois têm origem do próprio material fundido. O efeito das inclusões é similar ao efeito das cavidades, agindo como descontinuidades e afetando o comportamento plástico do material.

Assinale a alternativa que preenche corretamente as lacunas a seguir.

Para evitar os defeitos provocados pelas \_\_\_\_\_, é necessário um bom processo de \_\_\_\_\_ e, também, cuidados em relação ao projeto de \_\_\_\_\_ e limpeza de equipamentos auxiliares.

a) Cavidades; produção; organização.

b) Inclusões; escorificação; alimentação.

c) Intrusões; liquefação; extração.

d) Trincas; escorificação; rebarbação.

e) Inclusões; tratamento; seleção.



## Seção 3.3

### Desmoldagem, limpeza e acabamento

#### Diálogo aberto

Seja bem-vindo de volta à Unidade 3 de Fundição e Processos Siderúrgicos. Na seção anterior, você aprendeu alguns aspectos sobre os fenômenos da contração nas peças durante o processo de fundição. Observou a importância do intervalo de solidificação, as considerações sobre contração volumétrica e linear e os mecanismos de formação de rechupes. Notou que o dimensionamento e o emprego de massalotes auxiliam na prevenção de alguns defeitos e aprendeu os cuidados nos projetos dos moldes de fundição para evitar os efeitos indesejados da retenção de impurezas, da inclusão de óxidos, da aspiração de ar e da turbulência do fluxo metálico. Agora, dirigimo-nos ao setor de fundição que trata das questões relacionadas às etapas de desmoldagem, limpeza, acabamento e controle da qualidade das peças fundidas. Como você está atuando na empresa do setor metalúrgico que atua na fabricação de peças fundidas para diversas aplicações na indústria, a solicitação aqui é que você proponha soluções para facilitar a desmoldagem e a retirada dos canais de alimentação e canais de enchimento das peças após a fundição. As peças são fundidas em liga de alumínio e são relativamente pequenas. Posteriormente, serão usinadas em alguns pontos, permanecendo o acabamento fundido em outras partes da peça. Os volumes de produção são da ordem de 10 mil peças por mês e a produção é seriada.

Figura 3.21 | Peças fundidas acabadas, após desmoldagem, rebarbação e limpeza



Fonte: <<http://www.iron-foundry.com/surface-finish-quality-smoothness-cast-iron-steel-sand-castings-china.html>>. Acesso em: 25 out. 2016.

Como você definirá a operação mais viável de remoção de rebarbas e outros elementos metálicos das peças? O que você propõe para a limpeza e para um bom acabamento das peças? Ao longo dessa seção, você conhecerá os métodos para a desmoldagem, rebarbação, limpeza, acabamento e controle de qualidade das peças fundidas.

Bons estudos!

### **Não pode faltar**

Após a solidificação das peças fundidas dentro dos moldes, são realizadas as etapas de desmoldagem, remoção dos canais, limpeza e rebarbação. Na fundição em areia, a desmoldagem é utilizada para a separação da areia das peças fundidas. Existem diversas formas de separar a areia e outros resíduos do processo de fundição das peças. Nos processos de fundição em areia a verde, a maior parte da areia é reaproveitada para confecção de novos moldes. A desmoldagem e a recuperação da areia estão associadas, pois as plantas de fundição estão cada vez mais mecanizadas e com capacidade de reaproveitamento da areia de fundição. Com a desmoldagem, a areia é separada do fundido e transportada para os processos de recuperação. A forma e o sistema de desmoldagem é projetado de acordo com os tipos de peças fundidas e as características de mecanização e automatização das instalações da fundição. Os equipamentos para desmoldagem são constituídos de sistemas vibratórios e de impacto para a separação da areia. Após a solidificação das peças fundidas, as areias de fundição, geralmente, estão impregnadas por resíduos do processo. As temperaturas da areia também variam, além dos respingos de metal, rebarbas e partes de canais e alimentadores, argila queimada e restos de carvão queimados que por ventura se misturaram à areia. "Daí a importância dos processos de recuperação, que vão prover a separação das frações aproveitáveis dessa areia e encaminharão os resíduos para tratamento adequado" (SIEGEL, 1985 apud BALDAM; VIEIRA, [s.p.]). A desmoldagem (Figura 3.22) tem início depois que a peça fundida se encontra solidificada e tendo passado tempo suficiente para um devido resfriamento do molde, características da peça, do molde e da liga metálica. Este processo consiste em extrair do molde a peça fundida por meio de processos manuais ou mecanizados, sendo a areia separada do molde. Entre os objetivos deste procedimento de separação da areia das peças fundidas, podemos destacar: a recuperação da areia usada no processo para a confecção de novos moldes, incluindo a areia utilizada nos machos, que pode ou não ser recuperada conforme a sua composição em relação à areia. Com a separação da areia, a peça fundida ainda tem, em sua forma, o sistema de canais e massalotes e outras partes metálicas em excesso, que podem ser originadas por rebarbas, escamas e outros efeitos do processo. Como a operação de desmoldagem pode ser realizada de várias formas, de acordo com o tamanho das peças e do tipo de processo de

fundição, para o tipo de moldagem que utiliza as caixas, três formas de processos de desmoldagem são comumente utilizadas: por choques, por vibrações e por extrusão.

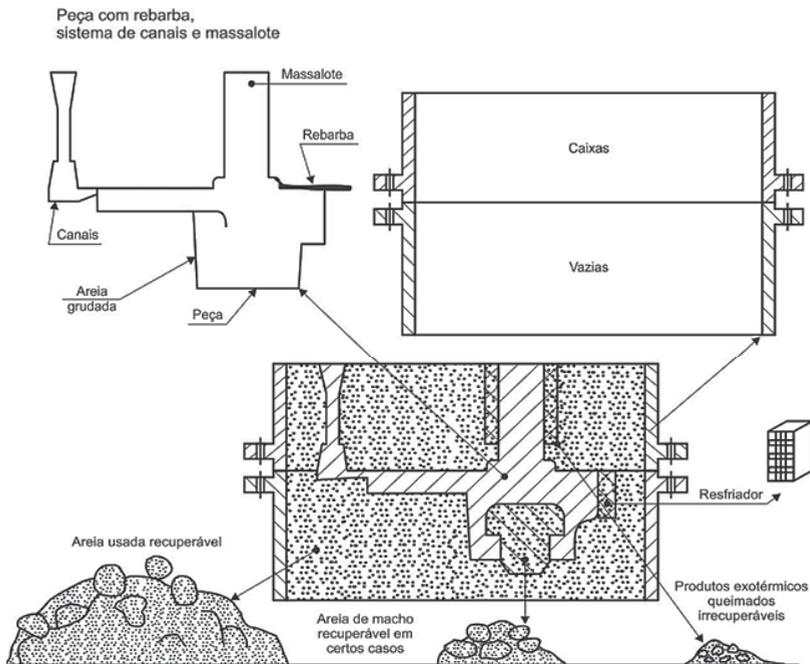


### Assimile

Ao se realizar a desmoldagem manual, é necessário observar que os golpes com ferramentas, para a separação da areia das caixas de moldagem, devem ocorrer somente sobre a areia, e não sobre as caixas, para não danificar as caixas que serão reutilizadas em outras moldagens em areia.

Uma questão importante a ser considerada na desmoldagem é a temperatura em que se encontra a peça fundida, não sendo uma prática comum esperar a peça chegar à temperatura ambiente para desmoldar. Em alguns casos, como o de peças unitárias, até pode ser conveniente esperar a peça atingir a temperatura ambiente.

Figura 3.22 | Desmoldagem – finalidade



Fonte: adaptada de Senai (1987 apud BALDAM; VIEIRA, 2013, [s.p]).

Contudo, nos casos de produção seriada, é inviável esperar as peças alcançarem a temperatura ambiente, pois isso exigiria que a empresa de fundição tivesse um volume de areia de moldagem muito elevado em circulação, resultando em prejuízo do ponto de vista econômico, além de requerer um espaço físico coberto das instalações muito maior. Embora não seja interessante, na maioria dos casos, esperar as peças

chegarem até a temperatura ambiente, é importante que a temperatura das peças para a desmoldagem esteja abaixo das curvas de transformação de fases, não permitindo a deformação da peça fundida. As ligas de cobre podem ser usualmente desmoldadas abaixo dos 250 °C e as ligas de alumínio abaixo dos 150 °C.

**O processo de desmoldagem por choques:** trata-se da forma mais antiga de desmoldagem em fundições, em que a moldagem ainda é manual, sendo encontrada em pequenas fundições e, também, para peças fundidas de grandes dimensões. Enquanto os investimentos para modernizar as instalações de fundição não oferecerem condições de retorno apropriadas, este tipo de desmoldagem continuará sendo realizada. Na desmoldagem manual, quando os moldes são pequenos e a moldagem é em areia a verde, é comum deixar as caixas caírem no chão pela ação da gravidade para que possibilite a separação da areia das peças fundidas. As saliências deixadas pelos canais de enchimento, massalotes e outras podem auxiliar na desmoldagem manual. Quando os moldes são maiores, é recomendado quebrar a areia localizada na parte superior da caixa de moldagem, com o auxílio de um sistema que suspende a caixa enquanto o operador golpeia com martelo, alavanca ou picareta a areia localizada nas proximidades das paredes do molde. A ideia é liberar totalmente a peça fundida da areia do molde, restando apenas a caixa inferior, com o restante da areia que será removida para que a caixa possa ser reutilizada em outra moldagem. É comum utilizar martelos pneumáticos para os casos de moldes de maiores dimensões e que tenham areia mais endurecida. O procedimento é semelhante ao anterior, no caso de levantar a caixa de moldagem. Contudo, os operadores iniciam a desmoldagem removendo a areia em volta da peça, utilizando martelos pneumáticos, possibilitando liberar a peça da areia e, com auxílio de uma ponte rolante e correias ou correntes para sustentar a peça, é possível movimentar o fundido de grandes dimensões. Este tipo de desmoldagem oferece muitos inconvenientes, pois as condições de trabalho são muito adversas, exigindo grande esforço físico e ambiente bastante insalubre devido às condições de calor, vapores e poeiras.

**O processo de desmoldagem por vibração** (Figura 3.23): neste método de desmoldagem, que é muito utilizado em plantas de fundição mecanizada, a separação da areia dos moldes das peças fundidas é justificada pelas dimensões dos moldes, pelos tipos de ligas metálicas empregados e a constituição dos moldes. Na desmoldagem por vibração, é possível um vibrador pneumático, que montado junto à parede da caixa remove a areia, sendo empregado para moldes de areia a verde, moldes de areia cimento, de resina furânica ou com silicato de sódio. Também, é possível manter os moldes suspensos por meio de ganchos de ponte rolante, dispensando o uso de cavaletes.

Figura 3.23 | Equipamento desmoldador vibratório



Fonte: <[http://www.mavi.com.br/produto.php?produto\\_id=23&idioma\\_id=2](http://www.mavi.com.br/produto.php?produto_id=23&idioma_id=2)>. Acesso em: 26 out. 2016.

Usado principalmente para moldes de areia a verde, devido à facilidade de quebra da areia, um tipo de desmoldagem por vibração bastante comum utiliza dois vibradores suspensos por uma viga, permitindo o ajuste da largura entre os vibradores, de acordo com o tamanho da caixa utilizada. É comum que, neste processo de desmoldagem, exista certa dificuldade de controle dos fenômenos de ressonância em função de dimensões e massa dos moldes.



### Refleta

A limitação ao uso de equipamento de desmoldagem por vibração se deve à dificuldade de combinar o amortecimento eficaz das vibrações para que as vibrações não sejam transmitidas para outros elementos do conjunto, como ponte rolante e estrutura da edificação predial. Então, qual é a forma ideal de instalação de equipamentos de desmoldagem por vibração que não transmita as vibrações para outras partes das instalações?

Uma opção é instalar os sistemas vibratórios em uma estrutura independente à do galpão da fábrica.

Outro método de desmoldagem por vibração é por meio do uso das chamadas grades vibratórias (Figura 3.24), em que é possível realizar a separação da areia das peças e a quebra dos moldes. São os equipamentos de desmoldagem mais utilizados e, também, os mais completos. São compostas de uma caixa metálica contendo uma grade horizontal ou com ligeira inclinação na parte superior, podendo se utilizar de uma combinação de barras e malhas e um suporte que sustenta a caixa, um dispositivo gerador de vibrações que é o elemento motor da grade, geralmente movido por ação mecânica e, em alguns casos, por ação eletromecânica ou pneumática.

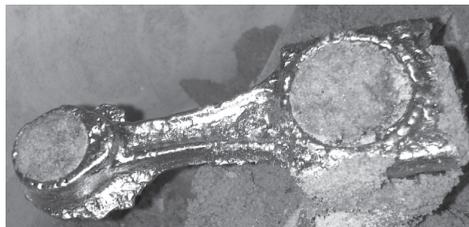
Figura 3.24 | Desmoldador vibratório por grades



Fonte: <<http://www.ecosand.com.br/catalogos/catalogo-2014.pdf>>. p. 15. Acesso em: 25 out. 2016.

**O processo de desmoldagem por extrusão:** de acordo com Senai (1987 apud BALDAM; VIEIRA, 2013), o sistema de desmoldagem por extrusão procede em duas etapas: (1) separação das caixas do conjunto areia-peça e (2) separação da areia das peças. É comum se utilizar uma grade vibratória para a separação da areia das peças, sendo que o tempo de permanência das peças sobre a grade é usado para possibilitar a remoção da areia dos machos (Figura 3.25). Isto pode requerer um sistema de recuperação da areia com dois circuitos distintos, permitindo certa separação da areia do molde e da areia dos machos.

Figura 3.25 | Peça fundida ainda com resíduos de areia, em especial nos furos representado pelos machos de areia



Fonte: elaborada pelo autor.



### Pesquise mais

Leia o artigo:

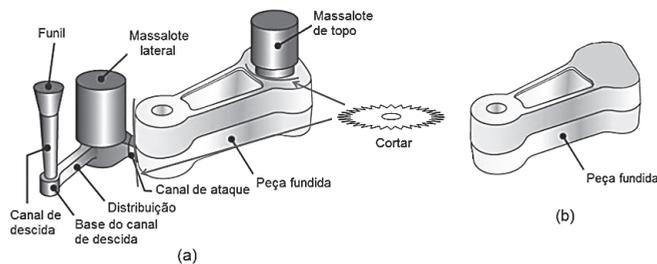
SILVA, C. E. et al. Influência da areia de cura a frio reutilizada nas propriedades mecânicas e características superficiais de moldes empregados em fundição. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 65, n. 1, p. 73-78, jan./mar. 2012. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rem/v65n1/a10v65n1.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2016.

**Remoção dos machos:** os machos em fundição em areia são elementos utilizados para formar as partes da peça que não serão preenchidas pelo metal líquido. Como são constituídos de areia, aglomerantes, como silicato de sódio e resinas, além de

ligantes, e são levados à secagem em estufa, podem apresentar certa dificuldade na remoção após a solidificação da peça, em função da geometria e das dimensões do fundido, sendo que, muitas vezes, os processos convencionais de remoção não resultam na limpeza desejada das peças. Um dos métodos que está sendo empregado com sucesso é a remoção térmica da areia que, por meio da elevação da temperatura, queima a resina que se encontra ao redor do grão, proporcionando a remoção mais fácil da areia do macho pelo processo de jateamento de granalha.

**Remoção dos canais e alimentadores:** após a solidificação das peças fundidas e da desmoldagem e separação da areia das peças, é necessário remover canais de enchimento, de saída de gases e alimentadores (Figura 3.26).

Figura 3.26 | (a) Peça fundida com canais e alimentadores e (b) peça com canais e alimentadores removidos



Fonte: elaborada pelo autor.

Para o caso de produção seriada e peças de pequeno e médio porte, a remoção mecanizada é mais indicada do ponto de vista produtivo. Para proceder a remoção de canais de enchimento, massalotes e rebarbas que se formam durante a fundição, a peça fundida é submetida a processos de rebarbação manual ou mecanizada, realizada com a peça próxima da temperatura ambiente. A remoção de canais de enchimento, alimentadores e outras protuberâncias formadas nas peças fundidas ocorre de várias maneiras, sendo as mais usuais por meio do uso de serras de fita, discos de corte, maçaricos ou marteletes. A limpeza superficial pode ser feita por jateamento de areia ou tamboreamento. Também é comum se utilizar marteletes pneumáticos e esmeril para a remoção de rebarbas e outros excessos de metal na peça.



### Exemplificando

As rebarbas provenientes do processo de fundição de ligas metálicas podem ser removidas por diversos meios, incluindo ferramentas manuais, lixas, processos de tamboreamento e jateamento de granalha e, também, máquinas de usinagem, sendo bastante usual a aplicação de abrasivos na eliminação de rebarbas e outras saliências nas peças fundidas.

Após a remoção dos canais e alimentadores, as rebarbas restantes nas peças fundidas podem ser removidas com ferramentas manuais, normalmente com discos abrasivos (Figura 3.27).

Figura 3.27 | Remoção de rebarbas em peça fundida



Fonte: <<http://weldflex.com.br/images/slider/img06.jpg>>. Acesso em: 25 out. 2016.

Um método bastante utilizado nas fundições para a limpeza e o acabamento das peças é o tamboreamento (Figura 3.28), que consiste no tratamento de finalização e no acabamento de superfícies de peças pequenas e médias em grandes volumes, resultando em ganho de produtividade, redução de custos no acabamento manual das peças e redução no consumo de energia elétrica.

Figura 3.28 | Operação de tamboreamento para acabamento de peças fundidas

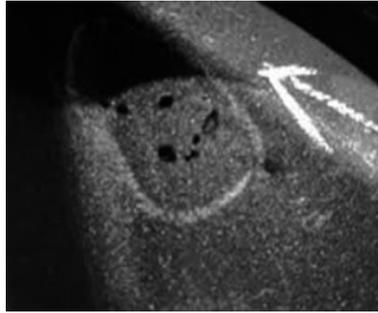


Fonte: <[http://www.aljumentalblasting.com.br/pt/produto/equipamentos-de-tamboreamento\\_3.html](http://www.aljumentalblasting.com.br/pt/produto/equipamentos-de-tamboreamento_3.html)>. Acesso em: 26 out. 2016.

Em alguns casos, as peças fundidas são submetidas ao processo de jateamento de abrasivos para limpeza e, após, para a rebarbação.

**Defeitos de fundição:** entre os diversos tipos de defeitos que podem surgir nas peças fundidas, a inclusão de areia (Figura 3.29) é ocasionada pela erosão da areia, molde com cantos quebrados ou com mal fechamento. Nestes casos, a qualidade da mistura da areia, menor granulometria da areia e mudanças no sistema que leva o metal líquido até a cavidade do molde são algumas formas de se evitar ou atenuar esses defeitos.

Figura 3.29 | Peça fundida com inclusão de areia



Fonte: <<http://www.foundrybra.blogspot.com.br/>>. Acesso em: 25 out. 2016.

Também pode ocorrer a quebra do molde, o que requer maior atenção na plasticidade da mistura e melhorar a resistência do molde, além de verificar a regulação na extração dos moldes das máquinas em moldagem mecanizada e dos modelos na moldagem manual. Existe a possibilidade de ocorrência de penetração metálica, em que a mistura da areia deve ser melhorada e o processo de compactação, mais eficiente. O uso de areia de maior granulometria pode levar à ocorrência de elevada rugosidade na superfície da peça fundida. Além disso, fatores como temperatura muito alta da areia e excesso de água, de argila e ligantes também favorecem a formação desse defeito. Para evitá-lo, podemos destacar a utilização de areia de granulação mais fina, o ajuste da temperatura e a umidade da mistura e o ajuste das quantidades de argila e ligantes.

A erosão na areia no molde (Figura 3.30) pode ser ocasionada pela baixa plasticidade da mistura, menor resistência do molde, areia de granulometria grosseira e, também, pela alta temperatura da mistura. Neste caso, a utilização de areia com temperatura mais baixa e um sistema que possibilite que o metal líquido escoie pela cavidade do molde com mais facilidade devem resolver.

Figura 3.30 | Peça fundida com defeitos provocados por erosão de areia do molde

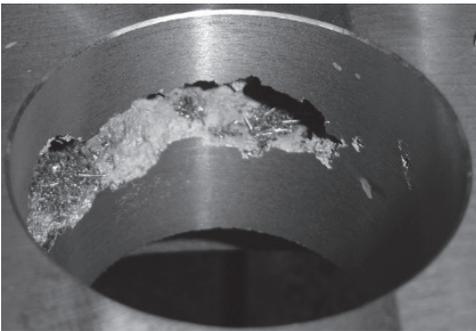


Fonte: adaptado de <<http://www.wncftd.com/News/xinwenfenlei1/2016/1003/161.html>>. Acesso em: 24 out. 2016.

Outro defeito encontrado nos processos de fundição que utilizam moldes de areia é a sinterização de areia, podendo ocorrer pela elevada penetração metálica em espaços intergranulares do molde. As reações entre a liga metálica e areia são responsáveis por esse defeito. É possível resolver este problema melhorando a mistura da areia com os ligantes e aditivos, e, ainda, elevando a quantidade de elementos capazes de gerar carbono vítreo à mistura. Outros defeitos, como escamas, rabo de rato e veimento, podem surgir se houver elevada compressão do molde, bem como se houver expansão silicosa. Para se evitar esses defeitos, deve-se proceder com o uso de maior teor de argila e, no caso de uso de água industrial, que tenha o mais baixo teor de sais possível, além de reduzir o esforço compressivo na compactação do molde. Ainda há um outro tipo de defeito caracterizado pela concentração de impurezas que, ao se solidificarem na liga metálica, acumulam-se em pontos da peça fundida de forma heterogênea, dando origem à segregação, o que torna o material com composição química não uniforme, podendo afetar, também, as propriedades mecânicas.

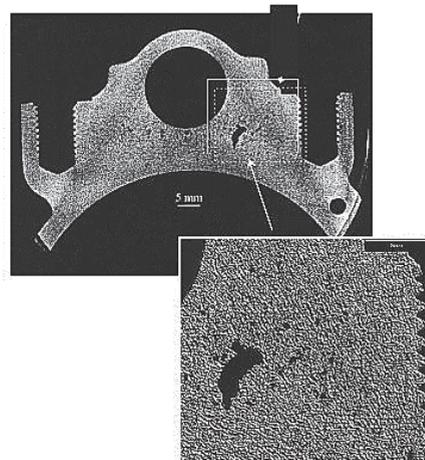
Para evitar que esse defeito ocorra, é importante considerar um rigoroso controle da composição química das ligas e, ainda, da velocidade de resfriamento, como estudado na Seção 3.2.

Figura 3.31 | Macroporosidade observada em peça após a usinagem



Fonte: <<http://www.fumbarri.com/recommendationsmanual-to-prevent-shrinkage-in-spheroidal-casting-parts/>>. Acesso em: 24 out. 2016.

Figura 3.32 | Microporosidades em peça fundida após a usinagem

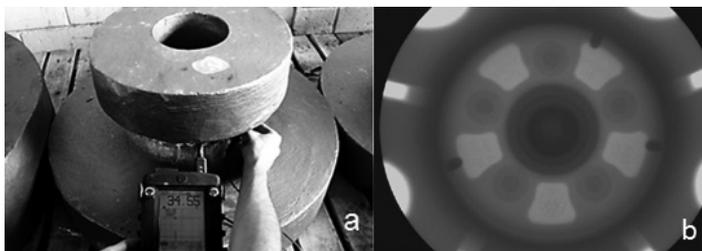


Fonte: <<http://www.ndt.net/article/dgzfp03/papers/v17/v17.ht>>. Acesso em: 24 out. 2016.

**Trincas decorrentes de contração:** os metais, ao se solidificarem, sofrem determinadas variações dimensionais, como vimos na Seção 3.2, que podem ocasionar contração expressa em porcentagem de volume e, no caso da contração sólida, a variação é expressa linearmente. Para evitar os efeitos indesejados da contração, o uso de massalotes e o correto dimensionamento dos moldes para compensar a contração normalmente são suficientes.

**Controle da qualidade das peças fundidas:** a análise da qualidade das peças fundidas inclui a inspeção dimensional para verificar a adequação aos requisitos de especificação dimensional do projeto da peça, forma, acabamento superficial e outros aspectos que podem ser avaliados por inspeção visual, além de ensaios destrutivos para análise de propriedades mecânicas, inspeção metalúrgica para análise de composição química, metalografia e análise microestrutural da peça, e ensaios não destrutivos, como ultrassom (Figura 3.33a), raio X (Figura 3.33b), partículas magnéticas e outros para avaliar a presença de macroporosidades, microporosidades, rechupes e outras heterogeneidades internas nas peças fundidas. Outras avaliações de qualidade podem incluir testes de montagem e simulações da utilização funcional da peça.

Figura 3.33 | Ensaios não destrutivos: (a) medição de espessura por ultrassom em peça fundida e (b) imagem de raio X de uma roda de alumínio obtida na fundição



Fonte: (a) <<http://www.poliend.com.br/2011/blog/?p=1456>>; (b) <[http://www.ndt.net/news/2004/mu231\\_5.jpg](http://www.ndt.net/news/2004/mu231_5.jpg)>. Acesso em: 27 out. 2016.

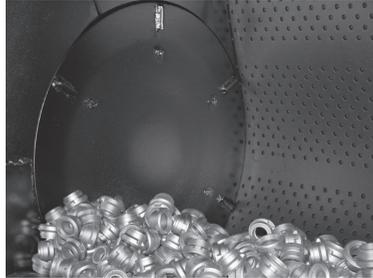
## Sem medo de errar

Chegamos aos setores da fundição que realizam a desmoldagem, a remoção de rebarbas, canais e outras saliências das peças fundidas, a limpeza e o acabamento das peças, além do controle de qualidade. Um determinado tipo de peça que será fabricado em liga de alumínio tem pequenas dimensões e produção seriada. Como você definirá a operação mais viável de remoção de rebarbas e outros elementos metálicos das peças? O que você propõe para a limpeza e para um bom acabamento delas? Ao longo desta seção, você compreendeu como realizar a desmoldagem, rebarbação, limpeza, acabamento e controle de qualidade das peças fundidas.

A desmoldagem após a solidificação das peças fundidas pode ser realizada por métodos manuais ou mecanizados. A remoção dos canais de enchimento, alimentadores e outros pode ser realizada com o uso de ferramentas manuais ou equipamentos apropriados. Para retirar as rebarbas, também é possível utilizar ferramentas portáteis e manuais, além de operações de jateamento e tamboreamento. Neste caso, como se trata de um volume grande de peças pequenas, a produtividade pode ser favorecida com o uso de equipamentos de desmoldagem por vibração, máquinas para remoção dos canais e tamboreamento para limpeza e acabamento.

Para a inspeção de qualidade, além da inspeção visual e dimensional convencional, pode ser recomendado o uso de um equipamento de ultrassom, raio X ou partículas magnéticas para detecção de vazios, descontinuidades e outras heterogeneidades nas peças.

Figura 3.34 | Operação de tamboreamento de peças fundidas



Fonte: <[http://www.aljmetalblasting.com.br/pt/aplicacoes/fundicion-forja\\_3.html](http://www.aljmetalblasting.com.br/pt/aplicacoes/fundicion-forja_3.html)>. Acesso em: 27 out. 2016.

## Avançando na prática

### Facilitando a remoção dos canais de alimentação e enchimento em peças fundidas

#### Descrição da situação-problema

A rebarbação tem como finalidade a remoção das rebarbas e outras protuberâncias metálicas em excesso na peça fundida. Após a remoção dos canais e da limpeza com jateamento abrasivo ou tamboreamento, as peças são submetidas ao rebarbamento para acabamento. A empresa XYZ está gastando muito tempo na remoção mecânica das rebarbas das peças fundidas, conforme Figura 3.35. Qual é a forma de melhorar a condição de rebarba da peça fundida?

Figura 3.35 | Peça fundida com canais de enchimento, massalote e excesso de rebarba



Fonte: elaborada pelo autor.

### Resolução da situação-problema

Como é possível observar, as rebarbas estão surgindo, principalmente, na linha de divisão da peça que representa o fechamento do molde de areia. Neste caso, é possível que um melhor dimensionamento do molde e compactação da areia, fazendo com que o fechamento do molde origine o mínimo de rebarba na linha de divisão, deva solucionar este problema. É possível, também, melhorar a forma dos canais de enchimento e massalote, formando o chamado “pescoço” na junção dos canais com a peça e facilitando a remoção desses canais.

### Faça valer a pena

**1.** A desmoldagem e a recuperação da areia estão associadas, pois as plantas de fundição estão cada vez mais mecanizadas e com capacidade de reaproveitamento da areia de fundição. Com a desmoldagem, a areia é separada do fundido e transportada para os processos de recuperação.

Assinale a alternativa que preenche corretamente as lacunas a seguir.

Após a peça fundida estar \_\_\_\_\_ e tendo passado tempo suficiente para um devido \_\_\_\_\_ do molde, tem início o processo de \_\_\_\_\_, no qual a peça fundida é extraída do molde por processos manuais ou mecanizados.

- Derretida; aquecimento; desmoldagem.
- Resfriada; amolecimento; decapagem.
- Solidificada; resfriamento; desmoldagem.
- Solidificada; aquecimento; recuperação.
- Acabada; beneficiamento; usinagem.

**2.** A remoção dos canais que se formaram durante a solidificação é executada por métodos manuais ou mecanizados. Como nos projetos de fundição, existe a recomendação de que se originem nas junções da peça e dos canais uma espécie de pescoço, facilitando a remoção dos canais e a remoção por meio de ferramentas manuais.

Leia as afirmações a seguir e responda.

I. No caso de produção seriada e peças de pequeno e médio porte, a remoção mecanizada de canais é mais indicada do ponto de vista produtivo.

II. A remoção de canais e massalotes é realizada com a peça ainda sob alta temperatura.

III. Um método bastante utilizado nas fundições para a limpeza e o acabamento das peças fundidas é o torneamento, que consiste em tratamento de finalização e acabamento de superfícies de peças.

IV. A remoção de canais de enchimento, massalotes e rebarbas da peça fundida é realizada por processos de rebarbação manual ou mecanizada.

É correto o que se afirma em:

a) I e IV, apenas.

b) II, apenas.

c) III, apenas.

d) I e III, apenas.

e) II e III, apenas.

**3.** Durante o processo de fundição de ligas metálicas, podem ser originados diversos tipos de defeitos nas peças, por motivos que estão relacionados aos fenômenos ocorridos na solidificação das peças, efeitos de contração, desprendimento de gases, aspiração de ar e outros.

Leia as afirmações a seguir e assinale verdadeiro (V) para as corretas e falso (F) para as incorretas e, em seguida, assinale a alternativa correta:

( ) O uso de areia de granulometria grosseira pode levar à ocorrência de elevada rugosidade na superfície da peça fundida.

( ) A erosão na areia no molde pode ser ocasionada pela elevada plasticidade da mistura, maior resistência do molde e areia de granulometria fina.

( ) A sinterização da areia pode ser evitada, melhorando o grau de mistura da areia com os ligantes e aditivos e, ainda, elevando a quantidade de elementos capazes de gerar carbono vítreo à mistura.

( ) A segregação é um tipo de defeito no fundido, caracterizado pela concentração de impurezas que, ao se solidificarem na liga metálica, acumulam-se em pontos da peça fundida de forma heterogênea.

a) F – F – V – F.

b) V – F – F – V.

c) V – F – V – F.

d) F – V – V – V.

e) V – F – V – V.

# Referências

ANÁLISE de defeitos de fundição: variáveis para inclusões de areia em moldes de areia verde. Disponível em: <<http://www.foundrybra.blogspot.com.br/>>. Acesso em: 25 out. 2016.

BALDAM, R. L.; VIEIRA, E. A. **Fundição**: processos e tecnologias correlatas. 1. ed. São Paulo: Editora Erica, 2013.

CASTING process: advantages and limitations. Disponível em: <<http://mechanicalengineering.com/casting-process-advantages-and-limitations/>>. Acesso em: 10 out. 2016.

CATÁLOGO de produtos. Ecosand – sistemas e equipamentos industriais. Disponível em: <<http://www.ecosand.com.br/catalogos/catalogo-2014.pdf>>. p. 15. Acesso em: 25 out. 2016.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**: processos de fabricação e tratamento. 3. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

CIÊNCIA dos materiais multimídia. Disponível em: <<http://www.cienciadosmateriais.org/index.php?acao=exibir&cap=21>>. Acesso em: 5 out. 2016.

CORTE e rebarbação. Disponível em: <<http://weldflex.com.br/>>. Acesso em: 25 out. 2016.

DEFEITOS de solidificação. Disponível em: <[http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir\\_noticia/6751-defeitos-de-solidificacao](http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/6751-defeitos-de-solidificacao)>. Acesso em: 14 out. 2016.

DESMOLDADORES e vibratórios: aplicações e funcionamento. Disponível em: <[http://www.mavi.com.br/produto.php?produto\\_id=23&idioma\\_id=2](http://www.mavi.com.br/produto.php?produto_id=23&idioma_id=2)>. Acesso em: 26 out. 2016.

EQUIPAMENTOS de tamboreamento. Disponível em: <[http://www.aljumentalblasting.com.br/pt/produto/equipamentos-de-tamboreamento\\_3.html](http://www.aljumentalblasting.com.br/pt/produto/equipamentos-de-tamboreamento_3.html)>. Acesso em: 26 out. 2016.

FERREIRA, J. L.; MELO, T. M. F.; RIOS, P. R. Efeitos de parâmetros termomecânicos em mecanismos dinâmicos de refino de grão em aços C-Mn-Nb e C-Mn. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v. 3, n. 4, p. 29-35, abr.-jun. 2007. Disponível em: <<http://www.tecnologiammm.com.br/files/v3n4/v3n4a05.pdf>>. Acesso em: 6 out. 2016.

FUNDIÇÃO e forjaria. Disponível em: <[http://www.aljumentalblasting.com.br/pt/aplicacoes/fundicion-forja\\_3.html](http://www.aljumentalblasting.com.br/pt/aplicacoes/fundicion-forja_3.html)>. Acesso em: 27 out. 2016.

GROOVER, M. P. **Introdução aos processos de fabricação**. 1. ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN-LTC, 2014.

MANUAL to prevent shrinkage in spheroidal casting. Disponível em: <<http://www.fumbarri.com/recommendations-manual-to-prevent-shrinkage-in-spheroidal-casting-parts/>>. Acesso em: 24 out. 2016.

MEDIÇÃO de espessura em fundidos. Disponível em: <<http://www.poliend.com.br/2011/blog/?p=1456>>. Acesso em: 27 out. 2016.

MELLO, M. L. N. M. et al. Análise dos modelos utilizados para a previsão dos parâmetros microestruturais obtidos durante a solidificação direcional do aço inoxidável austenítico AISI 304. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 60, n. 1, p. 135-140, jan./mar. 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rem/v60n1/v60n1a21.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2016.

MODULE. Disponível em: <<http://www.sutcast.com/simulation-software/solutions/solidification-simulation/module.aspx>>. Acesso em: 10 out. 2016.

NOÇÕES sobre a teoria de solidificação. Disponível em: <[http://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/3681-noco-es-sobre-a-teoria-de-solidificacao#.WE0H1wTxOZ](http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/3681-noco-es-sobre-a-teoria-de-solidificacao#.WE0H1wTxOZ)>. Acesso em: 6 out. 2016.

PROCESSO de injeção sob pressão. Disponível em: <[http://www.tede.udesc.br/tde\\_arquivos/11/TDE-2006-06-23T071019Z-220/Publico/Cap%202%20REVISAO%20BIBLIOGRAFICA.pdf](http://www.tede.udesc.br/tde_arquivos/11/TDE-2006-06-23T071019Z-220/Publico/Cap%202%20REVISAO%20BIBLIOGRAFICA.pdf)>. Acesso em: 18 out. 2016.

RISER (casting). Disponível em: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Riser\\_\(casting\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Riser_(casting))>. Acesso em: 10 out. 2016.

SAND erosion. Disponível em: <<http://www.wncf-ltd.com/News/xinwenfenlei1/2016/1003/161.html>>. Acesso em: 24 out. 2016.

SILVA, C. E. et al. Influência da areia de cura a frio reutilizada nas propriedades mecânicas e características superficiais de moldes empregados em fundição. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 65, n. 1, p. 73-78, jan./mar. 2012. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rem/v65n1/a10v65n1.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2016.

SURFACE finish quality, surface smoothness of cast iron and cast steel, sand casting made in China. Disponível em: <<http://www.iron-foundry.com/surface-finish-quality-smoothness-cast-iron-steel-sand-castings-china.html>>. Acesso em: 25 out. 2016.

X-RAY inspection of cast aluminum wheels. Disponível em: <<http://www.yxlon.com/Applications/Cast-parts/Wheels>>. Acesso em: 27 out. 2016.

ZABLER, E.; ROSENBERGER, M.; BERGMANN, R. B. **Röntgen-Computertomographie in der industriellen Fertigung (Kraftfahrzeug-Zulieferer)**: anwendungen und entwicklungsziele. Disponível em: <<http://www.ndt.net/article/dgzfp03/papers/v17/v17.htm>>. Acesso em: 24 out. 2016.

## Processos de fundição de ligas metálicas

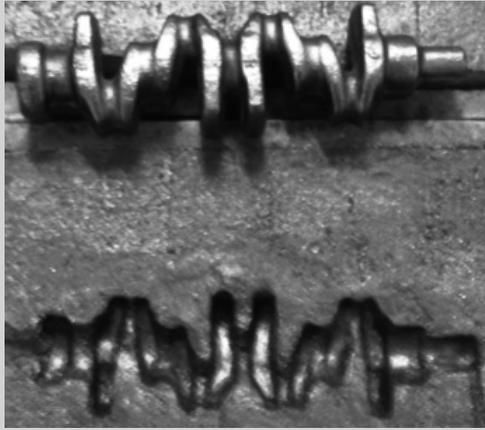
### Convite ao estudo

Olá, aluno! Seja bem-vindo à Unidade 4 de Fundição e processos siderúrgicos.

Após estudarmos os tipos de peças obtidas por fundição, as matérias-primas da fundição e dos processos siderúrgicos, ligas metálicas ferrosas e não ferrosas, alguns conceitos de moldes perecíveis e moldes permanentes, além de compreendermos a mecanização e automatização dos processos de fundição, uso de simulação na fundição, equipamentos para fundição de ligas metálicas não ferrosas e fornos de fusão, bem como aspectos relacionados à solidificação das ligas metálicas, considerando prováveis estruturas, contração, perdas metálicas, defeitos nos fundidos e controle de qualidade, chegamos, finalmente, ao estudo dos processos de fundição de metais e suas ligas. Neste momento, estudaremos um pouco mais sobre os tipos de processos de fundição e a aplicação do que já foi estudado até aqui.

A empresa TMC – Tam Metal Casting, fabricante de peças de aço, ferro fundido, alumínio e outras ligas metálicas, está iniciando a produção de peças fundidas após um longo período em que adquiria as peças fundidas e realizava outros processos mecânicos. As primeiras experiências da empresa com fundição tratam-se de produção de peças a partir de uma liga de aço. Recebeu, também, uma proposta de produção de uma peça de aço inox de grande complexidade geométrica e exigência de tolerância dimensional e de acabamento e, ainda, uma encomenda de produção de um grande volume de peças de liga Al-Si. A Figura 4.1 mostra um tipo de peça que pode ser obtida na fundição.

Figura 4.1 | Virabrequim de aço fundido e cavidade de molde areia respectivo



Fonte: arquivo pessoal do autor.

Você foi contratado como consultor pela TMC – Tam Metal Casting para apoiar nas definições dos processos de fundição adequados e apresentar as soluções para as questões propostas pela empresa. Ao final desta unidade, você deverá ser capaz de selecionar as opções corretas para os processos de fundição, no que diz respeito aos tipos de peça fundida, ligas empregadas, características de volume de produção e de projeto de fundição.

# Seção 4.1

## Fundição em areia a verde

### Diálogo aberto

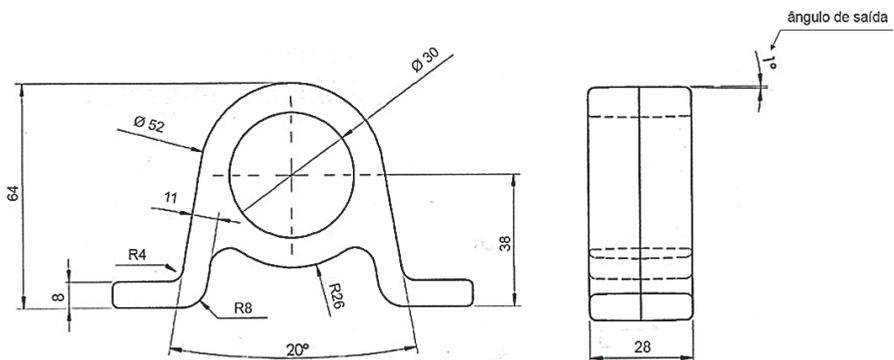
Muito bem, aluno! Iniciaremos agora a Seção 4.1 de Fundição e processos siderúrgicos. Nas seções anteriores, você aprendeu sobre muitos aspectos ligados aos processos de fundição.

Agora que você irá atuar como consultor técnico para a empresa que busca aumentar seu portfólio de produtos, deverá empregar os conhecimentos adquiridos sobre fundição e processos siderúrgicos e ajudá-la a alcançar os resultados desejados.

A empresa ainda não tem muita experiência em fundição, e a primeira demanda solicitada é de um lote de 400 unidades de um mancal de aço-liga, conforme as Figuras 4.2 e 4.3. A empresa necessita do seu apoio para tomar as seguintes decisões:

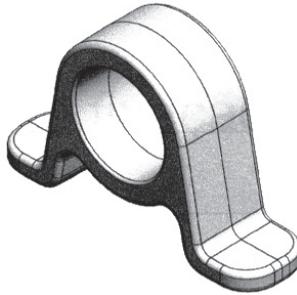
- Qual é o processo de fundição a ser adotado para essa peça?
- Quais aspectos referentes à modelagem e à moldagem devem ser considerados?
- O furo será obtido diretamente do fundido?

Figura 4.2 | Desenho do mancal de aço-liga fundido



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 4.3 | Perspectiva do mancal de aço-liga fundido



Fonte: elaborada pelo autor.

## Não pode faltar

Na fundição em moldes refratários confeccionadas em areia a verde, vários são os componentes que devem ser considerados. Por exemplo:

### Areias de moldagem

As areias para confecção dos moldes de fundição são constituídas de grãos refratários, como a areia silicosa e aglomerantes. A areia que é utilizada nos moldes de fundição deve ter propriedades – principalmente, alta refratariedade, boa permeabilidade, resistência mecânica e plasticidade. No caso da areia utilizada na confecção dos machos, ela deve apresentar boa colapsabilidade, além das propriedades já citadas para a areia de moldagem. As areias utilizadas nos moldes de fundição são classificadas, quanto à sua origem, em: natural, semissintética ou sintética. Além disso, as areias podem ser novas ou recicladas, embora, em casos em que se utilize areia usada, deve ser acrescentado em torno de 10% de areia nova para reconstituição da areia, sendo que, na areia reciclada, são utilizadas quantidades menores de água e aglomerantes. As areias de moldagem podem ser divididas, em relação à granulometria, em: areia de faceamento, ou areia de enchimento, e as areias de macho, para utilização nos elementos que representam partes do molde que não serão preenchidas com a liga metálica líquida. As areias são classificadas, em relação ao estado, como úmida (areia a verde) ou seca (estufada). Os componentes das areias de fundição podem ter como areia de base, silicosa ou não silicosa. A areia base é refratária, em geral, de origem silicosa, mas, se for desejável evitar os efeitos da elevada reatividade com o metal líquido e expansão volumétrica, o uso de areia não silicosa pode ser adotado. As areias não silicosas mais utilizadas são zirconita, cromita, olivina e chamote, sendo que a zirconita pode ser a escolhida em termos de propriedades, mas com custo mais elevado. Já a cromita tem aumento na capacidade de extração de calor do molde, quando comparada com areia comum.

## Aglomerantes

São materiais que envolvem e fazem a ligação entre os grãos de areia, proporcionando uma areia de fundição com boas características para o processo de moldagem, tais como resistência mecânica. Segundo Soares (2000 apud BALDAM; VIEIRA, 2013), existe uma relação inversa com o aumento do teor de aglomerante, sendo que a resistência e a dureza da areia aumentam, enquanto a permeabilidade diminui. Os aglomerantes das areias de fundição podem ser orgânicos, casos em que a resistência do molde ocorre por meio da compactação leve e secagem em estufas. Também podem ser inorgânicos, como a argila, o silicato de sódio e o cimento. Para esses aglomerantes, é comum a ocorrência de sinterização, quando em contato com o metal líquido, dificultando a desmoldagem. Existem, ainda, os aglomerantes sintéticos formados por resinas, que permitem produzir seções mais finas, com excelente resistência e boa colapsabilidade, apesar do custo mais elevado, quando comparado aos outros aglomerantes.

## Moldagem em areia

A moldagem em areia é o método mais tradicional e utilizado em fundição. Nesse processo, um modelo da peça a ser fundida é posicionado em uma caixa de moldagem e coberto com a areia preparada para compactar sobre esse modelo. Iniciaremos pela moldagem em areia a verde, que é um processo em que a areia, geralmente silicosa, é misturada com argila (bentonita) e água.

Para a moldagem em areia a verde, a mistura deve proporcionar uma condição de boa resistência, associada à refratariedade da sílica com a permeabilidade e plasticidade. Algumas proporções são recomendadas, embora, na prática de fundição, ocorram variações nessas proporções. Alguns fundidores recomendam em torno de 90% de areia, com 7% de argila e 3% de água, mas os ajustes de correção devem ser realizados conforme a necessidade. Também é comum utilizar aditivos ou outros elementos aglomerantes que não necessitem de estufagem para o caso do molde. Se forem utilizados machos na composição do molde, devem ser constituídos de outros elementos ligantes e aglomerantes e, posteriormente, secos em estufas.

## Preparação da areia

A eficiência da mistura é afetada por diversos fatores, entre eles, o grau de compactabilidade e a umidade. O grau de compactabilidade varia de acordo com o tipo de moldagem e compactação, sendo entre 50 e 55% para moldagem manual ou mecanizada de baixa pressão, 45 a 50% para moldagem por impacto e média compressão e 40 a 45% para alta produtividade, alta e média pressão. Também é

importante obedecer uma ordem de adição dos elementos da mistura de areia de faceamento, seguindo a sequência: areia, em torno de metade da água a ser utilizada, argila e outros aditivos e o restante da água.



**Assimile**

Existem vantagens operacionais resultantes da recuperação de areia. Para isso, é necessário selecionar a melhor areia para o processo de fundição, sabendo que a maior parte dela será recuperada durante a operação. Além disso, o uso de areia reduz o número de variáveis que devem ser controladas e oferece estabilidade ao longo de um período de tempo.

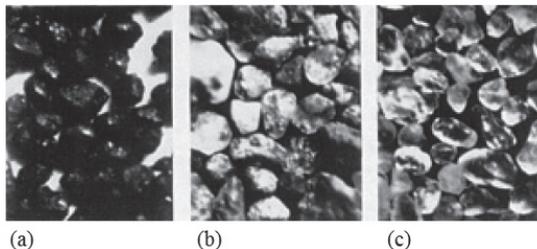
Segundo Brown, a forma dos grãos de areia é definida em termos de angularidade e esfericidade, como mostra a Figura 4.4. Já a distribuição do grão de areia e o sistema ligante são mais uniformes, reduzindo assim os defeitos da areia. Um sistema de recuperação de areia devidamente projetado se inicia pela areia verde e se converte em uma condição semelhante à areia nova. A Figura 4.5 mostra a aparência da areia antes da fundição, após a moldagem e após a recuperação.

Figura 4.4 | Classificação da forma dos grãos

						<b>Alta esfericidade</b>	
							<b>Média esfericidade</b>
							<b>Baixa esfericidade</b>
<b>Muito angular</b>	<b>Angular</b>	<b>subangular</b>	<b>subarredondada</b>	<b>Arredondada</b>	<b>Bem Arredondada</b>		

Fonte: adaptada de Brown (1998, p. 147).

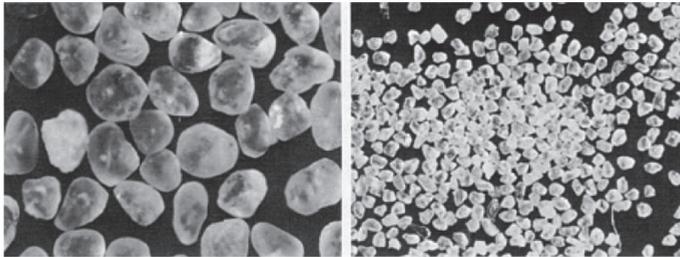
Figura 4.5 | Influência da recuperação da areia na aparência da areia verde (a) após moldagem (sem recuperação); (b) após recuperação térmica; (c) areia nova



Fonte: adaptada de Stefanescu et al. (1998, p. 492).

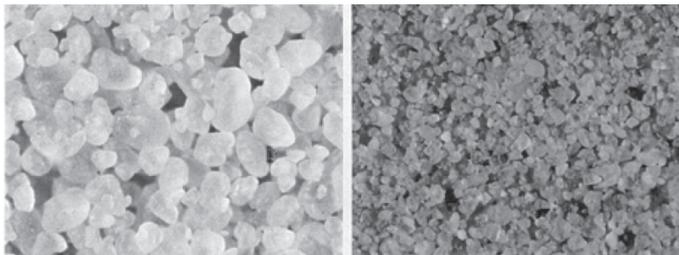
A granulometria da areia de base afeta a permeabilidade da areia e a penetração metálica, sendo que a distribuição dos grãos deve ser relativamente estreita, conforme pode ser observado nas Figuras 4.6 e 4.7. Deve existir um equilíbrio entre as dimensões dos grãos de areia para que se permita boa permeabilidade, mas mantenha-se um bom acabamento na peça fundida.

Figura 4.6 | Dois tamanhos de grãos de areia arredondados aumento de 35 X



Fonte: adaptada de Stefanescu et al. (1998, p. 486).

Figura 4.7 | Tamanhos de poros em faces de moldes feitos de areia grosseira e de areia fina aumento de 35 X



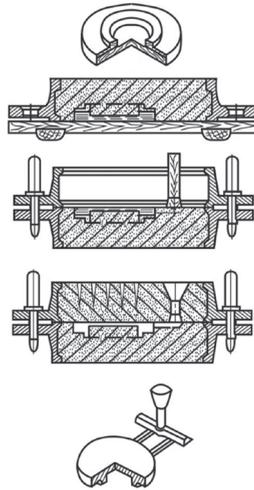
Fonte: adaptada de Stefanescu et al. (1998, p. 486).

### Obtenção dos modelos

Uma das etapas do processo de fundição em areia a verde é a confecção dos modelos. Algumas empresas de fundição contratam os serviços de uma outra empresa especializada em realizar a modelagem. Isso pode representar uma redução de custos, mas também pode ser interessante manter profissionais modeladores na própria empresa fundidora de metais, no caso da produção de peças em que não seja desejável compartilhar os detalhes técnicos com terceiros. Nas dimensões dos modelos, devem ser considerados os fatores de contração volumétrica das peças fundidas e, também, o sobremetal para usinagem. No dimensionamento dos modelos, inclui-se a presença de alimentadores (massalotes) e, também, de marcações de macho, que irão representar pontos de fixação dos machos de areia seca na montagem dos moldes. É muito importante se considerar desde a confecção dos modelos, as recomendações para ângulos de saída para facilitar a retirada dos modelos do molde de areia, os percentuais de contração volumétrica, raios de arredondamento de cantos, para alívio

de tensões e espessuras mínimas. Em alguns casos, a própria peça pode ser utilizada como modelo, situação em que as peças são de simples substituição. Mas, nesses casos, é necessário aumentar as dimensões da peça para compensar os efeitos de contração, já estudados. Também é comum o uso do modelo em duas partes, para facilitar a moldagem, sendo que, nessa situação, a presença de linha de divisão na peça é esperada e pode ser controlada com os cuidados no fechamento das partes do molde. Os materiais utilizados para confecção de modelos e caixas de macho podem ser madeira, tais como cedro, pinho e compensado; metais, como o alumínio e o aço; e, ainda, resinas do tipo epóxi. As diferenças entre os materiais utilizados nos modelos afetam o acabamento e a durabilidade, sendo que o tempo de vida dos modelos está associado ao armazenamento e manuseio e, também, à complexidade geométrica das peças. O método de moldagem mais simples é quando o modelo fica todo em uma das caixas de moldagem, como na Figura 4.8, o que facilita esse processo, e não apresenta a linha de divisão na peça, que fica isenta da rebarba por essa razão.

Figura 4.8 | Moldagem manual em duas partes com modelo monobloco e superfície de separação plana



Fonte: adaptada de Titov e Stepanov (1981 apud BALDAM; VIEIRA, 2013, p. 87).

Devido à complexidade geométrica da peça fundida, pode ser necessário confeccionar o modelo em mais partes, para que se possibilite representar todos os detalhes da peça na moldagem. O processo de moldagem em areia verde pode ser dividido em moldagem manual e mecanizada.

### Moldagem manual

Geralmente é utilizada em peças de grande porte ou em pequenos lotes de peças, nos quais não se justificam investimentos na mecanização.



### Pesquise mais

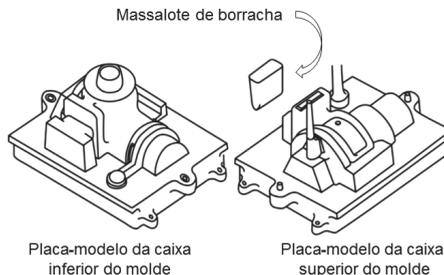
Para aprender mais sobre processos de moldagem manual em areia a verde, leia o item 4.1.1 do Capítulo 4, p. 88-91, do livro:

BALDAN, R. de L.; VIEIRA, E. A. **Fundição**: processos e tecnologias correlatas. 1. ed. São Paulo: Erica, 2013.

### Moldagem mecanizada

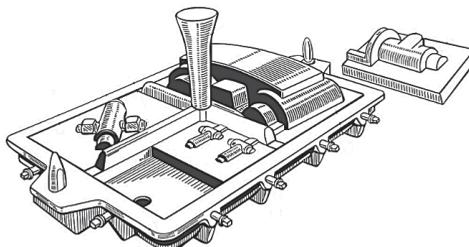
Quando se deseja produzir peças fundidas em série pequena, média ou grande, é interessante que não haja ou que se tenha o mínimo de trabalho manual. Nesses casos, o uso de placas-modelo é recomendado para servir de base para moldagem, conforme a Figura 4.9. No caso de peças menores em pequenas séries, é usual o emprego de placas-modelo universais em que apenas partes dos modelos são substituídas, para produzir tipos diferentes de peças e facilitar a moldagem, de acordo com a Figura 4.10. A moldagem mecanizada pode ser realizada por impacto, em que o molde de areia é suspenso e solto em queda livre, sofrendo impacto que comprime a areia, sendo a operação repetida por diversas vezes. Também é possível realizar a moldagem por compressão, sendo que a areia é comprimida em uma prensa pneumática ou hidráulica. E outra forma de moldagem mecanizada é por meio da compressão associada à vibração e impacto, em que são aplicadas pressão e vibração na mesa onde se localiza a caixa de moldagem.

Figura 4.9 | Placas-modelo para moldagem mecanizada



Fonte: adaptada de Silva (1984 apud BALDAM; VIEIRA, 2013, p. 165).

Figura 4.10 | Placa-modelo universal



Fonte: adaptada de Titov e Stepanov (1981 apud BALDAM; VIEIRA, 2013, p. 92).

## Características das peças fundidas em areia a verde: vantagens, desvantagens e limitações

A fundição em areia a verde é o mais comum entre os processos de fundição e envolve uma série de possibilidades, tanto em relação ao tamanho, à geometria e às dimensões das peças quanto aos tipos de ligas metálicas utilizadas. Em geral, se o metal ou a liga empregada for ferroso, a opção pela fundição em areia já é uma realidade. Contudo, existem muitos processos de fundição que utilizam moldes de areia. A moldagem em areia a verde pode ser mais viável do ponto de vista técnico e econômico também, quando se exige um certo nível de produtividade, pois permite que o sistema de moldagem seja mecanizado, além do vazamento do metal líquido e desmoldagem, mesmo em peças de grande porte.



### Exemplificando

Muitas ligas metálicas não ferrosas, tais como as de alumínio e silício, e cobre e zinco, também são fundidas em moldes de areia a verde, em função das dimensões, do tamanho e das tolerâncias da peça e questões de economia no processo de fundição.

As peças fundidas em moldes de areia a verde devem ter os cantos mais arredondados e espessuras de parede, conforme mostra a Tabela 4.1, relativamente maiores do que os produzidos em outros processos de fundição, seja em areia seca ou em moldes metálicos. Essa é uma das limitações desse processo, levando os projetistas a definirem as dimensões do fundido com sobresspessura que muitas vezes é acabada por processo de usinagem. Outro ponto a se considerar é que os furos obtidos nas peças fundidas em areia a verde não podem ser muito pequenos, exigindo também a usinagem dos furos posteriormente em muitos casos. As tolerâncias dimensionais também devem ser mais abertas, quando comparadas aos outros processos de fundição, conforme apresentado na Tabela 4.2, mais adiante.

Tabela 4.1 | Seções mínimas recomendadas em peças fundidas

Tipo de liga	Seção mínima, em mm			
	Fundição em areia	Fundição em molde metálico	Fundição sob pressão com grandes áreas	Fundição sob pressão com pequenas áreas
Alumínio	3,175 a 4,76	3,175	1,905	1,143
Cobre	2,38	3,175	2,54	1,524
Ferro fundido cinzento	3,175 a 6,35	4,76	–	–
Chumbo	–	–	1,905	1,016
Magnésio	4,0	4,0 a 4,176	2,032	1,27

Ferro maleável	3,175	-	-	-
Aço	4,76	-	-	-
Estanho	-	-	1,524	0,762
Ferro fundido branco	3,175	-	-	-
Zinco	-	-	1,143	0,38

Fonte: Torres (2007 apud BALDAM; VIEIRA, 2013, p. 94).

Tabela 4.2 | Tolerâncias para dimensões lineares gerais em peças brutas de aço fundido

Grau de tolerância	GTA 1	GTA 2	GTA 3	GTA 4
Até 10	-	-	-	± 0,7
Acima de 10 até 20	-	-	± 1,2	± 0,8
Acima de 20 até 30	± 4,5	± 3,0	± 1,5	± 0,9
Acima de 30 até 50	± 5,0	± 3,2	± 1,6	± 1,0
Acima de 50 até 80	± 5,5	± 3,4	± 1,7	± 1,1
Acima de 80 até 120	± 6,0	± 3,7	± 1,8	± 1,2
Acima de 120 até 180	± 6,5	± 4,0	± 2,0	± 1,3
Acima de 180 até 250	± 7,0	± 4,5	± 2,2	± 1,4
Acima de 250 até 320	± 7,5	± 4,8	± 2,3	± 1,5
Acima de 320 até 400	± 8,0	± 5,0	± 2,5	± 1,6
Acima de 400 até 500	± 9,0	± 5,5	± 2,6	± 1,7

Fonte: ABNT NBR 6645 (1986 apud BALDAM; VIEIRA, 2013, p. 95).

### Alternativa de uso de machos

Os machos em moldes de fundição são necessários para a obtenção de furos, vazios e reentrâncias nas peças fundidas, ou seja, representará no fundido porções não preenchidas pelo metal líquido. Para a utilização dos machos de areia nos moldes de areia a verde, é necessário que os machos sejam constituídos de areia e aglomerantes que, após a estufagem, tornem-se mais rígidos e estáveis do ponto de vista de resistência. São montados nos moldes de modo que permaneçam na posição correta durante o vazamento do metal e preenchimento da cavidade do molde.



### Refleta

Como você já aprendeu, os machos em moldes fundição são utilizados para representar partes da peça fundida não preenchidas com metal líquido durante o vazamento. Esses elementos são obtidos exclusivamente por um processo denominado “macharia”, em que a areia, aglomerantes e ligantes são misturados e levados à secagem em estufa para cura da areia.

Leia mais a respeito no Capítulo 4, p. 110, do livro:

BALDAN, R. de L.; VIEIRA, E. A. **Fundição**: processos e tecnologias correlatas. 1. ed. São Paulo: Erica, 2013.

### Vazamento da liga metálica no molde

Como já vimos, um dos efeitos indesejados durante o vazamento do metal nos moldes de fundição é a turbulência, pois um fluxo turbulento pode originar diversos defeitos nas peças fundidas. Para que isso não ocorra, o projeto do sistema de canais no molde deve ser adequado. Também é necessário controlar a temperatura de vazamento para que se possa garantir o completo preenchimento da cavidade do molde de areia. A Tabela 4.3, a seguir, apresenta temperaturas de vazamento de algumas ligas metálicas.

Tabela 4.3 | Temperaturas de vazamento de ligas metálicas

Ligas	Temperatura de fusão da liga em °C	Sobreaquecimento na panela em °C	Sobreaquecimento no forno em relação à temperatura na panela no momento do vazamento
Alumínio	550 a 660	50 a 100	10 a 40
Cobre	825 a 1.083	70 a 120	10 a 40
Ferros fundidos	1.130 a 1.350	50 a 150	10 a 40
Aços	1.400 a 1.525	50 a 150	10 a 40

Fonte: Baldam; Vieira (2013, p. 300).



## Vocabulário

**Colapsabilidade:** propriedade da areia de moldagem em fundição, caracterizada pela maior ou menor facilidade de ser destruída após a solidificação da peça.

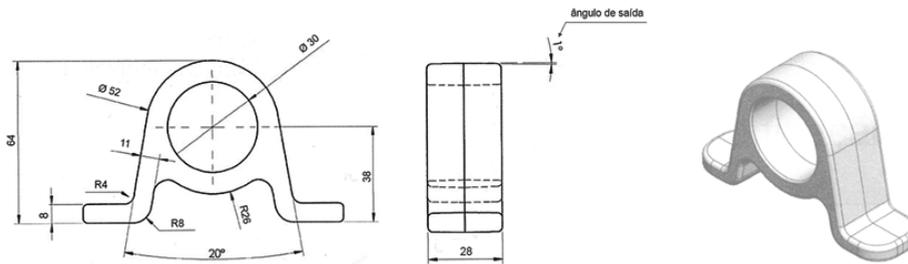
**Granulometria:** medida dos grãos de areia de moldagem em fundição.

**Permeabilidade:** em fundição, a permeabilidade da areia de moldagem está relacionada à capacidade de a areia permitir a passagem de gases por meio de suas partículas.

## Sem medo de errar

Você foi contratado para atuar como consultor técnico na empresa que busca aumentar seu portfólio de produtos e deverá empregar os conhecimentos adquiridos sobre fundição e processos siderúrgicos para ajudá-la a alcançar os resultados desejados. Como a empresa ainda não tem muita experiência em fundição e a primeira demanda solicitada é de um lote de 400 unidades de um mancal de aço-liga, você apoiará a decisão da empresa em relação às questões sobre o processo de fundição a ser adotado para essa peça, os aspectos referentes à modelagem e à moldagem que devem ser considerados e se o furo de diâmetro 30 mm será obtido diretamente do fundido. Ao longo desta seção, apresentamos alguns aspectos importantes sobre moldagem em areia a verde, considerando tipos de liga metálica, tamanho, dimensões e tolerâncias da peça fundida, métodos de modelagem e moldagem, além do uso de machos para obtenção de furos diretamente no fundido. Analisando as informações do desenho apresentado na Figura 4.11, da liga metálica empregada na fundição da peça e volumes de produção, podemos optar pela moldagem em areia a verde e confeccionar o modelo da peça em duas partes, em madeira, como o cedro. Esse modelo deverá ser suficiente para a produção dos moldes dessa demanda inicial, mas é possível construir uma placa-modelo de aço para facilitar a moldagem mecanizada e possibilitar a reprodução mais ágil dos moldes para novas demandas.

Figura 4.11 | Desenho e perspectiva do mancal de aço-liga fundido



Fonte: elaborada pelo autor.

Como a moldagem será em areia a verde, embora não tenha sido mencionada qual é a exigência de acabamento da peça, é interessante utilizar areia de faceamento com granulometria mais fina, deixando a areia de enchimento com grãos maiores. Como se trata de início de produção por fundição, é recomendado adquirir areia nova para a moldagem. A sequência de adição da mistura é areia, em torno de metade da água a ser utilizada, argila e, se necessário, outros aditivos, carvão mineral e o restante da água. A compactação da areia na caixa de moldagem deve levar em conta a produtividade e, nesse caso, se houver a possibilidade de investir em um compactador mecanizado, será muito bem-vindo. O furo de diâmetro 30 mm tem uma altura de 28 mm, o que possibilita a obtenção do furo diretamente no fundido, sendo necessária apenas a usinagem de acabamento do furo posteriormente.

## Avançando na prática

### Evitando a retenção de ar e gases na cavidade do molde de areia

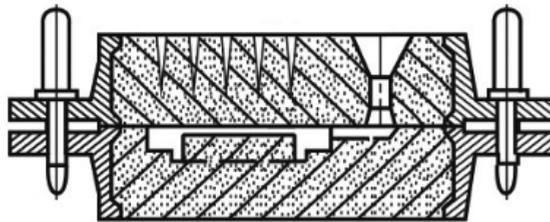
#### Descrição da situação-problema

Como engenheiro mecânico de uma grande metalúrgica, você constatou que algumas peças fundidas apresentaram defeitos, como bolhas e porosidade. Analisando a construção dos moldes de areia a verde para a produção do mancal fundido, você observou que está ocorrendo dificuldade de liberação dos gases produzidos durante o vazamento do metal líquido, mesmo considerando que o molde é de areia a verde e que a areia tem boa permeabilidade. Como podemos resolver esse problema? O que você propõe para melhorar a saída de ar e gases do molde e evitar a formação de bolhas e porosidade nas peças, inviabilizando a utilização da peça fundida?

## Resolução da situação-problema

Para evitar a formação de bolhas e porosidade nas peças, além de melhorar a liberação dos gases produzidos durante o vazamento do metal líquido, é importante considerar no projeto do modelo e confecção dos moldes de areia a verde a formação de pequenos orifícios em partes do molde, que devem permanecer abertos para a atmosfera, ou seja, esses pequenos orifícios devem ficar localizados na parte superior dos moldes, facilitando a liberação de ar e gases da cavidade do molde. Assim, minimiza-se a possibilidade de se obter uma peça fundida com defeitos de bolhas ou porosidade, garantindo um melhor resultado na estrutura do fundido.

Figura 4.12 | Molde de areia em duas partes, representando os pequenos canais para facilitar a saída de ar e gases do molde



Fonte: adaptada Titov e Stepanov (1981 apud BALDAM; VIEIRA, 2013, p. 87).

## Faça valer a pena

**1.** As areias de moldagem em fundição são classificadas quanto à sua origem em: natural, semissintética ou sintética. Quanto ao uso, as areias podem ser novas ou recicladas, sendo que as fundições que operam basicamente com areia usada (reciclada) utilizam cerca de 10% de areia nova para recompor as perdas durante a reciclagem e manter estáveis as propriedades da areia.

Leia as afirmações a seguir:

I. Quanto ao emprego, as areias de moldagem podem ser de faceamento, de enchimento ou areia de macho.

II. Devido à baixa reatividade com o metal fundido e à baixa expansão volumétrica, pode ser uma opção o uso de areia não silicosa.

III. Os aglomerantes das areias de fundição podem ser orgânicos, inorgânicos ou sintéticos, como as resinas.

IV. Quando se trata de areia reciclada, são usadas grandes quantidades de aglomerantes e água.

É correto o que se afirma em:

- a) II e IV, apenas.
- b) II, apenas.
- c) III, apenas.
- d) I e III, apenas.
- e) I e IV, apenas.

**2.** Os machos em moldes de fundição são necessários para a obtenção de furos, vazios e reentrâncias nas peças fundidas, ou seja, representará no fundido porções não preenchidas pelo metal líquido, sendo que, em peças de grande complexidade geométrica, podem ser utilizados diversos tipos de machos.

Assinale a alternativa que preenche corretamente as lacunas a seguir.

Os machos na moldagem em areia a verde devem ser constituídos de areia e \_\_\_\_\_, para que, após a secagem, tornem-se mais \_\_\_\_\_ e estáveis do ponto de vista de resistência.

- a) Água; leves.
- b) Aglomerantes; rígidos.
- c) Argila; maleáveis.
- d) Cerâmica; quebradiços.
- e) Aglomerantes; moles.

**3.** Uma das etapas do processo de fundição em areia a verde é a confecção dos modelos. Nas dimensões dos modelos, devem ser considerados os fatores de contração volumétrica das peças fundidas e, também, o sobremetal para usinagem. No projeto dos modelos, ainda se considera a utilização de massalotes e marcações de macho.

Leia as afirmações a seguir e assinale verdadeiro (V) para as corretas e falso (F) para as incorretas, escolhendo, em seguida, a alternativa correta:

( ) A confecção dos modelos inclui recomendações para ângulos de saída para facilitar a retirada dos modelos do molde de areia.

( ) Em alguns casos em que as peças são de simples substituição, a própria peça pode ser utilizada como modelo.

( ) O modelo para a confecção do molde de areia de fundição deve ter duas ou mais partes, para que se obtenha a linha de divisão na peça.

( ) Os materiais utilizados para confecção de modelos e caixas de macho podem ser madeira, como cedro, pinho e compensado, e metais, como o alumínio e o aço.

a) F – V – V – F.

b) F – F – F – V.

c) V – V – F – V.

d) F – V – V – V.

e) V – F – V – F.



## Seção 4.2

### Fundição em areia a seco

#### Diálogo aberto

Caro aluno, bem-vindo à Seção 4.2 de *Fundição e processos siderúrgicos*. Na seção anterior, você foi capaz de selecionar as opções corretas para um processo de fundição de uma peça fundida em aço-liga, considerando o volume de produção e as características da peça. Nesta seção, estudaremos os processos de fundição em moldes perecíveis, em areia seca.

A empresa TMC – Tam Metal Casting, fabricante de peças de aço, ferro fundido, alumínio e outras ligas metálicas, está iniciando a produção de peças fundidas após um longo período em que adquiria as peças fundidas e realizava outros processos mecânicos. Esta semana, a empresa recebeu uma proposta de produção de uma peça em aço inox de moderada complexidade geométrica, com muitos detalhes e exigência de tolerância dimensional e de acabamento, com massa aproximada de 2,8 kg, conforme está representada na Figura 4.13. Foi decidido que a peça será produzida por fundição, pois seria muito caro produzi-la por outro processo.

Você está atuando como consultor técnico para essa empresa e deverá indicar qual é o processo de fundição apropriado, bem como quais são as etapas desse processo. Para isso, você irá desenvolver suas habilidades no conhecimento dos processos de fundição que utilizam moldes de areia, mas, desta vez, os moldes são curados (secos), apresentando outras possibilidades para a obtenção de peças metálicas.

Figura 4.13 | Rotor de aço inox fundido



Fonte: <<http://waterpumpspareparts.sell.everychina.com/p-101421264/showimage.html>>. Acesso em: 25 nov. 2016.

Ao final desta seção, você deverá ser capaz de compreender os processos de fundição por moldagem em areia seca e conhecer as opções disponíveis para a fabricação de uma peça fundida por meio desses processos.

### Não pode faltar

Para o caso da moldagem em areia seca, as areias de fundição devem ser misturadas com aditivos orgânicos, para que, após a secagem em estufas ou, ainda, por processos em que a cura ocorre a frio, o molde possa se constituir de características, como maior rigidez, melhor forma geométrica e precisão dimensional e, também, em alguns casos, a possibilidade de produção de volumes maiores de peças fundidas.

A moldagem em areia seca é especialmente destinada à produção de peças de diversas formas geométricas e tamanhos variados, em que se deseja maior precisão dimensional e melhor acabamento, tanto para ligas metálicas ferrosas quanto não ferrosas. Em geral, a moldagem em areia seca é muito semelhante à moldagem em areia a verde, com exceção ao fato da secagem ou cura do molde, que pode ser realizada em estufas, a quente, ou por processos que envolvem apenas a reação química dos componentes, e a cura é realizada à temperatura ambiente.

As areias utilizadas nesse tipo de moldagem para fundição são do tipo sintético ou semissintético, com a adição de aglomerantes orgânicos, que proporcionam maior resistência ao molde sem prejudicar a sua colapsibilidade, melhorando ainda a permeabilidade do molde e facilitando a saída de gases.

Segundo Titov e Stepanov (1981 apud BALDAM; VIEIRA, 2013), o tempo de secagem dos moldes, normalmente, é determinado experimentalmente e pode variar na ordem de minutos ou até horas.



### Exemplificando

Algumas características obtidas com moldes de areia seca em relação aos moldes de areia a verde incluem maior resistência à erosão e à pressão hidrostática do metal líquido, maior estabilidade dimensional e maior resistência à penetração do metal.

### Areias de base, resinas e catalisadores

O uso das resinas para a aglomeração da areia de fundição pode ser dividido, de acordo com a propriedade final, em: resinas termoplásticas e resinas termoestáveis ou termofixas.

A primeira tem a propriedade de amolecimento pela ação do calor e enrijecimento, quando resfriada.

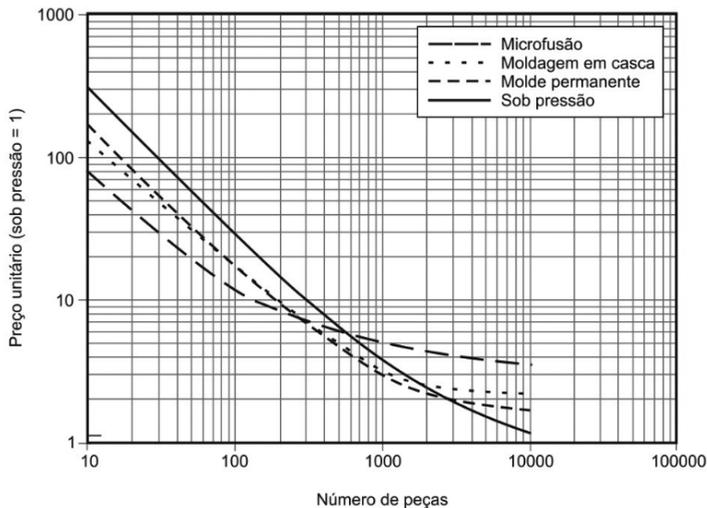
Já as resinas termoestáveis ou termofixas são compostos que têm propriedades de cura por meio de reações químicas complexas, como condensação, reticulação e polimerização. O calor e o pH são condições necessárias para que o processo ocorra.

Atualmente, essas resinas são pouco utilizadas para obtenção de areias de moldes e machos de fundição, pois surgiram as chamadas resinas sintéticas que têm melhores condições de aglomeração das areias de fundição e podem ser divididas em três grupos:

- Resinas de cura a frio e catalisador líquido: para moldagem e macharia.
- Resinas de cura a frio e catalisador gasoso: praticamente exclusiva para macharia.
- Resinas de cura a quente: praticamente exclusiva para fundição *shell* (casca).

A cura a frio, como o nome diz, ocorre quando dois ou mais componentes do ligante, combinados à areia, tornam-se rígidos à temperatura ambiente, obtendo um molde com maior resistência mecânica. A Figura 4.13, a seguir, mostra uma comparação de preço unitário em relação ao número de peças produzidos em diversos processos de fundição.

Figura 4.14 | Preço unitário comparado ao número de peças para diversos processos



Fonte: adaptada de Foundry Technology (apud BALDAM; VIEIRA, 2013, p. 40).

### Processos de fundição em areia seca – *shell molding*

O processo de fundição que utiliza a moldagem em areia seca é bastante utilizado quando há exigência de maior precisão dimensional, melhor acabamento superficial e tem o tamanho das peças compatível com a fabricação das placas-modelo e resistência dos moldes.

As areias para fundição *shell molding*, devem ser preparadas com resinas apropriadas, em geral, termofixas ou termoestáveis, mais um catalisador, que, combinados com a temperatura das estufas, tornam o molde rígido.

O processo, conforme a Figura 4.15, consiste em fabricar uma placa-modelo de metal, normalmente, aço, ferro fundido ou alumínio, que servirá para preparação do molde. Essa placa de metal é aquecida em torno de 150 a 250°C, lubrificada com silicone e montada em uma caixa onde a areia preparada é despejada. A mistura de areia e resina em contato com a placa-modelo aquecida sinteriza e forma a casca ao redor do modelo. A caixa é virada, para que a areia não sinterizada seja removida. O molde é levado para a estufa, onde é aquecido em temperaturas de 200 a 250°C.

Entre as vantagens do processo de fundição *shell molding*, podemos citar a melhor qualidade superficial e de forma das peças fundidas, precisão dimensional mais estreita, velocidade de fabricação dos moldes, menor volume de areias utilizado na moldagem, facilidade de armazenar os moldes e maior resistência do molde, quando comparada com moldagem em areia a verde.

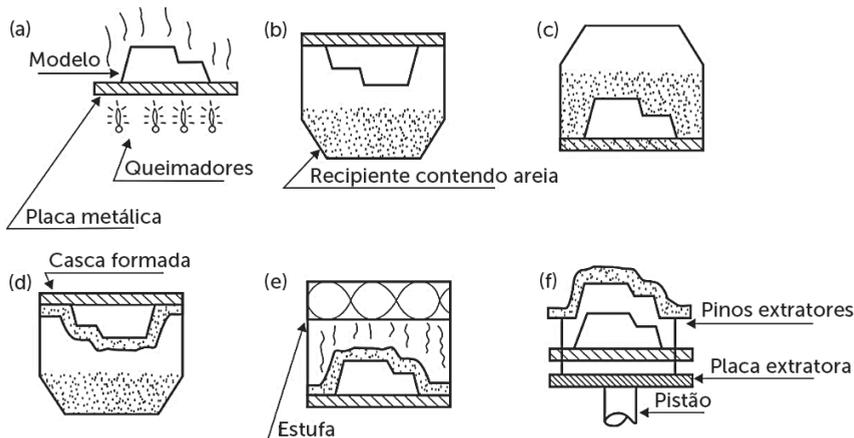
Dentre as desvantagens, destacam-se: os custos das placas-modelos e das areias; o tamanho das peças, restrito a pequenas e médias; espessuras de parede, em geral, não inferiores a 6 mm; e inviabilidade econômica para a recuperação das areias de moldagem.



### Assimile

Após a secagem do molde, ocorre a separação da placa-modelo. Após a preparação dos moldes (cascas), ocorre a união das partes do molde por meio de colagem. Então, o molde está pronto para receber o metal líquido.

Figura 4.15 | Processo de fundição por meio da moldagem em *shell molding* (casca)



Fonte: adaptada de Muelle, Masiero e Fenilli (1986 apud BALDAM; VIEIRA, 2013, p. 40).

### Processo areia óleo

O processamento da mistura inclui areia mais óleo de linhaça, sendo realizada a compactação do molde ou macho. Após isso, o molde ou macho é levado para a estufa em temperaturas de 200 a 250 °C pelo tempo de uma a quatro horas. Se a cura for realizada à temperatura ambiente, o tempo de secagem é de quatro a vinte e quatro horas.

O enrijecimento do molde, nesse processo, ocorre pela formação de uma película de óleo sobre a areia, polimerizando com a reação da temperatura ou de substâncias químicas.

Devido à baixa rigidez, esse processo é utilizado, em geral, para machos de pequeno porte e simples geometria. Também, devido à alta colapsibilidade, dispensa a utilização de aditivos, não apresentando muitos obstáculos no uso.

### Processos de macharia - cura a frio

Nesse processo, são obtidos machos e moldes, nos quais as areias são preparadas com uma mistura constituída de areia base, resina e catalisador, sendo realizada a cura à temperatura ambiente. Esse processo apresenta algumas variáveis de utilização, tais como os tempos de cura, a extração do modelo ou do macho e o tempo para vazamento.

Entre as vantagens desses processos, destacam-se:

- Possibilidade de uso de diversos tipos de areia base.
- Confecção relativamente simples de moldes e machos.
- Dispensabilidade de alto investimento em equipamentos.
- Boa estabilidade dimensional dos moldes e machos.
- Melhor acabamento superficial das peças.
- Maior capacidade de colapsibilidade.
- Maior facilidade de estocagem e manuseio.
- Maior facilidade na limpeza das peças.

Entre as desvantagens desse processo, estão:

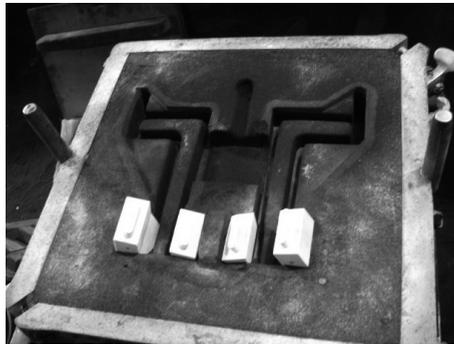
- Geração de resíduo tóxico.
- Maior tempo de cura implicando demora para o vazamento.
- Custo mais elevado da areia preparada.

## Processo CO<sub>2</sub> / Silicato de Sódio

Esse processo de fundição não utiliza a secagem em estufa, não necessitando da temperatura elevada para a cura do molde. Consiste na mistura de areia base, silicato de sódio e aditivos. A mistura é preparada, colocada na caixa de moldagem e compactada. Em seguida, é realizada a passagem de gás CO<sub>2</sub>, que reage com o silicato de sódio, endurecendo o molde, conforme Figura 4.16. O resultado dessa reação é a formação da sílica-gel, carbonato de sódio e água, acelerando o processo de enrijecimento do molde, sendo que esse molde ou macho pode ser utilizado imediatamente na fundição.

A mistura tem como composição base a areia com granulação 55 a 85 AFS – American Foundry Society –, o silicato de sódio C112 de 2,5 a 6,0%.

Figura 4.16 | Molde de areia seca pelo processo CO<sub>2</sub>/silicato de sódio



Fonte: <http://railwaybobrestorations.blogspot.com.br/2011/02/casting-patterns-day-at-alumaloy.html>. Acesso em: 23 nov. 2016.

Entre as vantagens do processo CO<sub>2</sub>/silicato de sódio, podemos citar:

- Melhor precisão dimensional.
- Maior produtividade.
- Dispensabilidade do uso de fornos e estufas para a secagem do molde.
- Baixo custo da matéria-prima.
- Flexibilidade no controle da areia.
- Utilidade para alta e baixa produção.

Já as desvantagens são:

- Maior dificuldade na desmoldagem devido à elevada resistência dos moldes.
- Necessidade de cuidados na estocagem dos moldes e machos.



### Pesquise mais

Para aprender mais sobre a moldagem em areia a seco, em especial o princípio de endurecimento do molde no processo  $\text{CO}_2$ /Silicato de sódio, leia o item 6.1.4.1 do Capítulo 6, p. 186-187, do livro:

BALDAN, R. de L.; VIEIRA, E. A. **Fundição**: processos e tecnologias correlatas. 1. ed. São Paulo: Erica, 2013.

Leia, também, o artigo:

LOPES, E. J.; FERREIRA, F. F.; DEZENA, M. L. C. Sistema de recuperação de areias alcalinas de fundição. **Revista Fundição & Matérias-Primas**, São Paulo, p. 48-59, jan. 2004. Disponível em: <<https://dl.dropboxusercontent.com/u/4824487/Sistema%20de%20recupera%C3%A7%C3%A3o%20de%20areias%20alcalinas%20de%20fundição%C3%A7%C3%A3o.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2016.

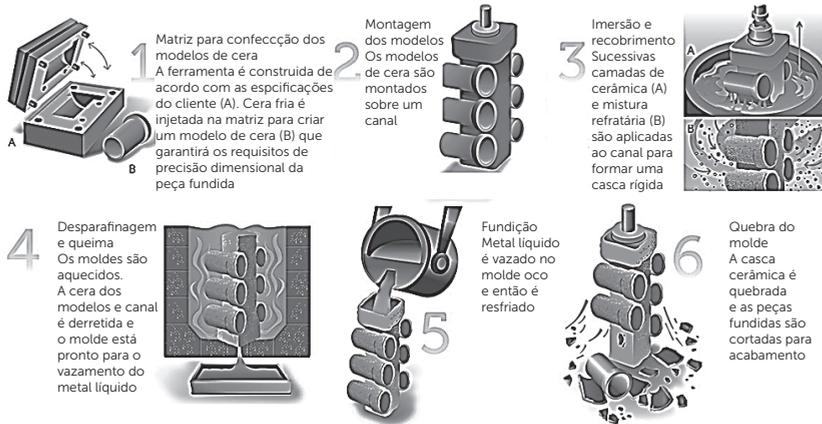
### Fundição de precisão – cera perdida

Entre os processos de fundição, a fundição de precisão por moldagem em cera perdida é um dos que apresenta maior emprego da tecnologia, concorrendo com peças produzidas por usinagem ou por processos de conformação, como a metalurgia do pó.

Para a confecção dos modelos de cera, são utilizadas ceras solúveis especiais, que derretem facilmente com o calor e podem ser trabalhadas por sistema de injeção em moldes e matrizes metálicas ou de outros materiais, como resinas, poliuretano ou silicone.

A Figura 4.17 apresenta de forma esquemática as etapas desse processo, que tem início com a fabricação do modelo em cera, montagem dos modelos em uma estrutura central, revestimento dos modelos com uma espécie de lama refratária, secagem do molde em estufa para o endurecimento do molde e derretimento da cera. Nesse processo, é possível produzir peças desde dimensões muito pequenas até médias, com ligas metálicas variadas, como os aços e suas ligas, ligas de níquel e de titânio. O molde é produzido a partir do revestimento do modelo com lamas cerâmicas de elevada refratariedade.

Figura 4.17 | Processo de fundição em cera perdida



Fonte: adaptada de <[http://ppcpinc.com/wp-content/uploads/2014/06/ppcp\\_process-graphic.jpg](http://ppcpinc.com/wp-content/uploads/2014/06/ppcp_process-graphic.jpg)>. Acesso em: 25 nov. 2016.



### Refleta

Como já apresentado nesta seção, a fundição por moldagem em cera perdida é muito utilizada quando se deseja peças fundidas com moderada à elevada complexidade geométrica e acabamento superficial superior aos produzidos por outros processos de fundição. Para a fabricação dos modelos de cera, são utilizados moldes ou matrizes.

Essas ferramentas de preparação dos modelos de cera, nesse processo, são fabricadas apenas com material metálico ou podem ser produzidas de outro material?

Para responder a essa questão, leia o Capítulo 2, itens 2.2.1 e 2.2.2, p. 31, do livro: BALDAN, R. de L.; VIEIRA, E. A. **Fundição**: processos e tecnologias correlatas. 1. ed. São Paulo: Erica, 2013.

Algumas das vantagens da fundição em cera perdida são:

- Formas geométricas das mais complexas.
- Maior produtividade.
- Melhor precisão dimensional e acabamento superficial, se comparado a outros processos em areia.
- Menor custo, se comparado aos processos de fabricação em máquinas operatrizes.
- Ausência de linhas de divisão nas peças.

- Possibilidade de praticamente todas as ligas metálicas serem fundidas por esse processo.
- Menores espessuras de parede.

Como nem tudo é perfeito, lá vão algumas das desvantagens da fundição em cera perdida:

- Limitação nas dimensões das peças, sendo economicamente inviável produzir peças muito grandes.
- Demora no processo.
- Dependência da confecção dos modelos.

### Processo caixa fria (COLD BOX)

Esta é uma opção de moldagem para fundição, em que os moldes e os machos são fabricados com uma mistura de areia e resina, mas são curados à temperatura ambiente por meio da passagem de um gás por um catalisador, seguido de uma lavagem com ar seco.

A preparação da mistura inclui a areia, com resina fenólica mais isocianato, sendo realizada a compactação dos moldes e machos e a aplicação de um catalisador, um gás,  $\text{CO}_2$  -  $\text{N}_2$  ou ar. Com a evolução tecnológica, alguns processos de moldagem estão sendo, gradativamente, substituídos pelo processo caixa fria, como é o caso do processo *shell*.

Suas vantagens são:

- Maior precisão dimensional.
- Variedade de materiais empregados no ferramental, com maior facilidade de manuseio e manutenção.
- Boa colapsibilidade e produtividade.
- Rapidez na utilização do macho.
- Acabamento superficial melhorado.
- Menor consumo de energia.

Entre as desvantagens, citamos:

- Custo elevado de aglomerantes, catalisadores, equipamentos, ferramentais e sistema de aplicação de gás.

- Maior rigor no controle da areia e da temperatura e umidade.
- Impossibilidade de longa permanência dos moldes em estoque, uma vez que a umidade pode danificá-los.

### Processo caixa quente (*hot box*)

É um dos processos de moldagem para fundição voltado, principalmente, para a produção de machos em série, com elevada complexidade geométrica e baixas espessuras. Quando os machos tiverem espessura maior, a preparação deve considerar a resina furânica, pelo fato de apresentar maior velocidade de cura, com reduzido tempo de contato com o ferramental.

Para a mistura que originará os machos, utiliza-se areia de base, mais resinas (ureia-formol/álcool furfúrico, ureia-formol/fenol-formol, fenol-formol/álcool furfúrico) e catalisador.

A caixa onde é produzido o macho tem o calor decomposto, liberando uma reação que resulta na cura do macho, sendo que o calor do ferramental dá início à reação exotérmica que endurece o macho de forma progressiva, da região superficial externa para o meio do elemento, devido à polimerização da resina.

Vantagens:

- Elevada fluidez, facilitando copiar detalhes e garantindo melhor acabamento superficial.
- Possibilidade de uso de areia de maior granulação e consumo reduzido das resinas.
- Colapsibilidade boa.
- Aumento da produtividade, quando comparado ao processo *shell molding*, sem necessidade de secagem em estufas.
- Aplicação em ligas de alumínio magnésio, ferros fundidos e aços.

Entre as desvantagens, estão:

- Maior necessidade de calor para realizar a cura.
- Maior sofisticação e, logo, maior custo dos ferramentais, sendo que o material do ferramental deve ser mais específico devido à elevada abrasão.
- Duração da mistura de aproximadamente quatro horas, apresentando, ainda, liberação de gases tóxicos na ocasião da cura.

- Maior dificuldade de cura em espessuras de paredes superiores a 30 mm.

### Sistemas de vazamento do metal líquido no molde

Em geral, a forma de vazamento das ligas metálicas nos moldes de areia a seco segue as mesmas características do vazamento do metal em moldes de areia a verde, por gravidade.

Alguns cuidados adicionais se referem às características de resistência dos moldes, como no caso do *shell molding*, em que é comum montar os moldes (cascas) em conjunto, adicionando areia com ligante para melhorar a resistência do conjunto para receber o metal líquido.



### Vocabulário

**Termoplástico:** que tem a propriedade de amolecer sob a ação do calor e de endurecer ao esfriar-se.

**Termoestável:** diz-se do corpo que não se altera pela ação do calor em determinadas condições.

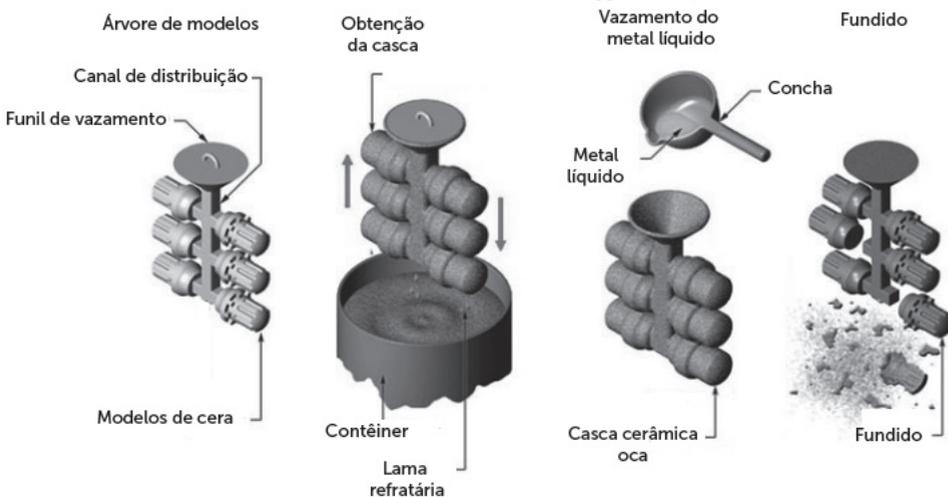
**Termofixo:** que tem a propriedade de tornar-se permanentemente duro e rígido quando aquecido ou curado. Que passa de um estado plástico ou fusível ao estado infusível ou insolúvel, por uma reação química efetuada pelo calor ou por outro meio, tal como acontece com determinadas resinas e plásticos sintéticos (DICIO, 2016, [s.p.]).

### Sem medo de errar

A empresa TMC – Tam Metal Casting recebeu uma proposta de produção de uma peça em aço inox de moderada complexidade geométrica, com muitos detalhes e exigência de tolerância dimensional e de acabamento, e com massa aproximada de 2,8 kg. Foi decidido que a peça será produzida por fundição, pois seria muito caro produzi-la por outro processo. Você está atuando como consultor técnico para essa empresa e deverá indicar qual é o processo de fundição apropriado e quais são as etapas desse processo. No decorrer desta seção, estudamos os tipos mais importantes de moldagem em areia a seco e suas particularidades, mecanismos de cura (a frio e a quente), características das peças e ligas metálicas produzidas em fundição em areia a seco, além das vantagens e desvantagens de cada um deles. Considerando as características da peça, suas exigências dimensionais e de acabamento, complexidade geométrica e massa, podemos indicar para a fabricação dessa peça por meio de fundição o processo de fundição em cera perdida. As seguintes etapas básicas são necessárias:

- Fabricação do ferramental apropriado. Nesse caso, pode ser usinada uma matriz de aço, silicone ou poliuretano com as características de dimensão e forma da peça, considerando os percentuais de contração da cera e também do aço inoxidável.
- Obtenção dos modelos de cera. Prensagem dos modelos de cera na matriz de aço.
- Montagem dos modelos de cera na árvore de modelos.
- Recobrimento da árvore de modelos com a lama refratária preparada, repetindo esse processo algumas vezes até se adquirir a espessura desejada da casca.
- Cura do molde refratário em estufa e coleta da cera derretida para a fabricação de novos modelos.
- Preparação da liga metálica nos fornos de fusão.
- Vazamento da liga metálica no molde refratário.
- Após a total solidificação das peças, realizar a quebra do molde para a remoção das peças.
- Separação das peças, rebarbação e acabamento final.

Figura 4.18 | Processo de fundição em cera perdida



Fonte: adaptada de <<http://www.radver.com/images/proceso-fundicion-a-la-cera-perdida.png>>. Acesso em: 8 nov. 2016

## Avançando na prática

### Alternativa de produção de modelos de cera para fundição de precisão

#### Descrição da situação-problema

Após a fabricação de um lote piloto dos rotores fundidos em aço inox pelo processo de fundição de precisão por moldagem em cera perdida, você acompanhou os resultados e não ficou satisfeito com a forma geométrica das peças. Notou que há muita distorção de forma e que as dimensões não atingiram a precisão desejada. Você havia estabelecido que as matrizes para a produção dos modelos fossem construídas de silicone.

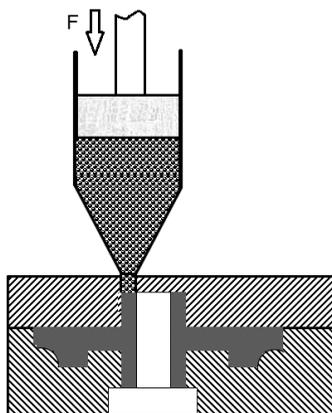
Qual é a sua sugestão para melhorar as características de forma de precisão dimensional das peças fundidas por moldagem em cera perdida?

#### Resolução da situação-problema

Na produção de modelos de cera por injeção, o material que constitui o molde ou matriz influencia na precisão das dimensões do modelo. Segundo Yarlagadda e Holck (2003 apud BALDAM; VIEIRA, 2013), existem vantagens e desvantagens na produção de modelos de cera, utilizando com molde de injeção o poliuretano ou silicone.

Modelos de cera produzidos a partir de moldes de silicone apresentam melhor acabamento superficial e são capazes de produzir modelos de cera com formas geométricas complexas. Já com relação à precisão, os moldes de poliuretano são superiores aos de silicone, resultando em modelos de cera com menos distorções e mais precisos.

Figura 4.19 | Obtenção do modelo de cera por injeção em molde de poliuretano



Fonte: adaptada de Titov e Stepanov (1981 apud BALDAM; VIEIRA, 2013, p. 31).

### Faça valer a pena

**1.** Nos processos de fundição em moldes de areia, existe a possibilidade de utilização de processos de cura, ou seja, a secagem para o enrijecimento dos moldes e machos para fundição. Um dos mecanismos de cura dos moldes e machos utiliza temperatura elevada, como é o caso da estufagem para *shell molding*.

Leia as afirmações a seguir e marque verdadeiro (V) para as corretas e falso (F) para as incorretas, e, em seguida, assinale a alternativa correta:

( ) Entre as vantagens da moldagem em areia seca sobre a moldagem em areia a verde, podemos citar a maior precisão dimensional e tolerâncias dimensionais mais estreitas.

( ) Uma das desvantagens da moldagem em areia seca em relação à moldagem em areia a verde é o aumento dos volumes de areia de moldação.

( ) A placa-modelo de metal é aquecida em torno de 150 a 250°C, lubrificada com silicone e montada em uma caixa onde a areia preparada é despejada.

( ) A mistura de areia e resina é compactada sobre a placa-modelo aquecida sinterizando e formando a casca ao redor do modelo.

- a) F – V – V – F.
- b) F – F – F – V.
- c) V – V – F – V.
- d) F – V – V – V.
- e) V – F – V – F.

**2.** Nos processos de fundição que utilizam moldes de areia seca, os machos e moldes são obtidos de areias preparadas com uma mistura constituída de areia base, resina e catalisador, e a cura (secagem) é realizada à temperatura ambiente e tem como variáveis de utilização os tempos de cura, extração do modelo ou do macho e o tempo para vazamento.

Leia as afirmações a seguir e responda.

I. A boa estabilidade dimensional dos moldes e machos produzidos por processo de moldagem em areia a seco e cura a frio é uma das vantagens desse processo.

II. No processo de fundição  $\text{CO}_2$ /silicato de sódio, após a aplicação do gás, o molde é levado à estufagem para que ocorra a cura.

III. No processo de cura a frio, ocorre a rapidez do vazamento devido

ao menor tempo de cura, reduzindo o custo da areia preparada.

IV. No processo de fundição  $\text{CO}_2$ /silicato de sódio, o molde é endurecido por meio de uma reação que origina a sílica-gel, carbonato de sódio e água.

É correto o que se afirma em:

- a) I e IV, apenas.
- b) II, apenas.
- c) III, apenas.
- d) I e III, apenas.
- e) II e IV, apenas.

**3.** A moldagem em areia seca é especialmente destinada à produção de peças de diversas formas geométricas e tamanhos variados, em que se deseja maior precisão dimensional e melhor acabamento, tanto para ligas metálicas ferrosas quanto não ferrosas.

Atualmente, as resinas termoplásticas, termoestáveis e termofixas são pouco utilizadas para obtenção de areias de moldes e machos de fundição.

Porque

Surgiram as chamadas resinas sintéticas, que têm melhores condições de aglomeração das areias de fundição, sendo divididas em resinas de cura a frio e catalisador líquido, resinas de cura a frio e catalisador gasoso e resinas de cura a quente.

- a) As duas afirmações estão corretas, e a segunda é uma justificativa correta da primeira.
- b) As duas afirmações estão corretas, mas a segunda não é uma justificativa para a primeira.
- c) A primeira afirmação está correta, e a segunda está incorreta.
- d) A primeira afirmação está incorreta, e a segunda está correta.
- e) As duas afirmações estão incorretas.



## Seção 4.3

### Fundição em moldes permanentes

#### Diálogo aberto

Olá, aluno. Chegamos à Seção 4.3 de Fundição e processos siderúrgicos. Nas seções anteriores, estudamos sobre a fundição em moldes refratários confeccionados em areia a verde e aprendemos sobre os principais constituintes da areia de fundição e as técnicas de moldagem. O cuidado desde a escolha das areias de confecção do molde ao preparo dessas areias é imprescindível para que, ao final do processo de fundição, tenhamos uma peça isenta de defeitos. Posteriormente, você aprendeu a selecionar as opções corretas para um processo de fundição de uma peça em moldes perecíveis, sendo, na primeira, em areia a verde, e, na segunda, em areia a seco.

A empresa TMC – Tam Metal Casting, fabricante de peças de aço, ferro fundido, alumínio e outras ligas metálicas, está iniciando a produção de peças fundidas após um longo período em que adquiria as peças fundidas e realizava outros processos mecânicos, e você, como consultor técnico da empresa, ficou encarregado de avaliar qual será o processo de fundição mais adequado para a produção de um grande volume de peças de liga Al-Si, com uma demanda inicial de aproximadamente 3.000 peças por mês. Foi definido que as peças serão obtidas por fundição para posterior usinagem e pintura. A peça em questão tem massa aproximada de 7,5 kg e está representada na Figura 4.20, a seguir.

Figura 4.20 | Roda de liga de alumínio para automóveis



Fonte: <<https://www.asahitec.co.jp/english/tech/wheel.html>>. Acesso em: 25 nov. 2016.

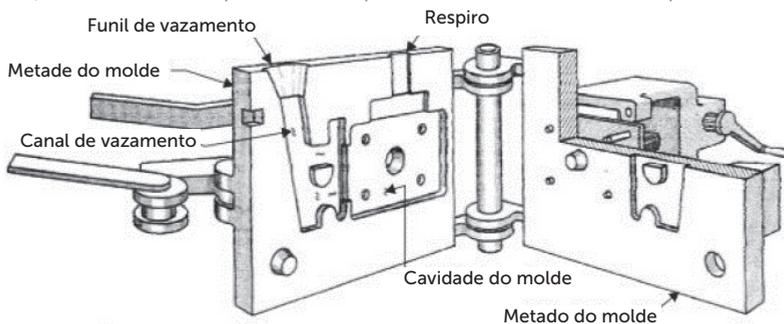
Qual é o processo mais adequado para essa produção? Ao final desta seção, você deverá ser capaz de comparar os processos de fundição por moldagem em areia e moldagem em moldes permanentes, podendo decidir entre as opções disponíveis para a fabricação de uma peça fundida, estabelecer qual é a mais indicada e que atenda aos aspectos de custo, qualidade e produtividade.

## Não pode faltar

Na fundição de metais e suas ligas, utiliza-se moldes ou matrizes para a obtenção das formas mais variadas de peças fundidas. Os moldes podem ser construídos de materiais refratários, à base de areia, ou materiais metálicos. Os moldes metálicos são normalmente conhecidos como moldes permanentes.

Em processos de fundição em moldes de metal, os chamados não perecíveis, os moldes são construídos em duas partes, conhecidas como matriz fixa e matriz móvel, nas quais um mecanismo de abertura e fechamento possibilita o enchimento do molde com metal líquido e a retirada da peça fundida após solidificação, conforme Figura 4.21.

Figura 4.21 | Molde metálico permanente para vazamento de metal líquido



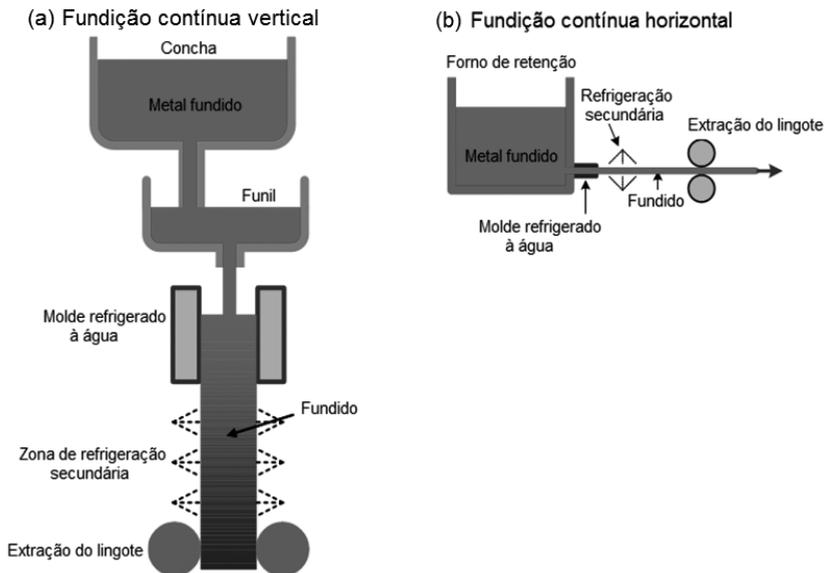
Fonte: adaptada de Machado (2006 apud BALDAM; VIEIRA, 2013).

Os moldes metálicos são construídos, geralmente, em aços tratados e também em ligas de ferro fundido. Por se tratarem de moldes metálicos e que estão sujeitos à ação da temperatura das ligas fundidas, são utilizados moldes permanentes, em fundição, principalmente para as ligas metálicas de alumínio, ligas de cobre, magnésio, zinco e ferro fundido. No caso do ferro fundido, em função da elevada temperatura de fusão, a durabilidade do molde deve ser considerada. Já os aços não são fundidos em moldes permanentes em função da temperatura de fusão do aço, que comprometeria as condições estruturais dos moldes, inviabilizando o processo. É comum que o molde seja aquecido para facilitar o fluxo de metal no molde e que ocorra a limpeza por meio de sopros de ar e aspersão de elementos lubrificantes e de recobrimento, sendo que,

assim que o metal se solidifica, o molde é aberto para que a peça fundida seja retirada, e o molde é novamente fechado, tendo início um novo ciclo de fundição. Entre as vantagens da fundição em molde permanente, podemos citar o bom acabamento superficial e maior controle dimensional, além da estrutura mais refinada e produtos fundidos com maior resistência mecânica, em função da solidificação mais rápida pelo contato do metal com o molde metálico. Algumas limitações da fundição em moldes permanentes estão relacionadas aos custos de matrizes, de moldes e dos equipamentos utilizados quando o processo é sob pressão. Contudo, se as ligas metálicas, as formas, dimensões e massa das peças forem compatíveis com os moldes metálicos, em geral, os custos são compensados pelos maiores volumes de produção e maior repetitividade do processo.

Já na fundição em moldes permanentes por gravidade ocorre o lingotamento vertical, para fundição de lingotes de aço, e horizontal, para fundição de metais e ligas não ferrosas ou fundição contínua, conforme Figura 4.22.

Figura 4.22 | Ilustração esquemática de lingotamento contínuo (a) vertical e (b) horizontal



Fonte: adaptada de <[http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=continuous\\_casting](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=continuous_casting)>. Acesso em: 2 dez. 2016.

Nessa categoria de fundição, são fundidas ligas metálicas por meio de processo contínuo, e as peças resultantes têm formas longas, com seções quadrada, retangular, hexagonal, entre outros formatos. Os fundidos por meio desse processo apresentam como característica dimensional com grande comprimento para posterior processamento em usinagem ou conformação mecânica com o material no estado sólido.

De forma simplificada, o processo é conduzido por meio do vazamento do metal líquido em um cadinho aquecido. O metal líquido escoar por matrizes de cobre com revestimento de cromo que são resfriadas a água. A barra ou placa, já no estado sólido e ainda com temperatura elevada, é agarrada por cilindros e arrastada, respeitando as velocidades de resfriamento e solidificação do metal. Na sequência, o material continua esfriando, sendo cortado com serras circulares ou maçarico.

Nesse processo, as ligas metálicas não ferrosas, o aço e o ferro fundido nodular podem ser fundidos. No caso do aço, são obtidas placas de grandes dimensões.

O lingotamento contínuo pode ser realizado por meio de máquina horizontal para a produção de perfis de ferro fundido.



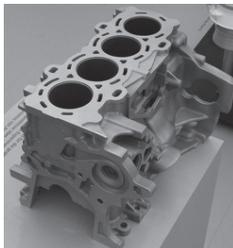
### Assimile

Outra possibilidade é que o molde, nas máquinas verticais, seja fabricado de grafite ou carbureto de silício. Um recurso para que não permita que o metal fique aderido ao molde é a oscilação da barra enquanto está sendo solidificada.

Em relação aos moldes ou matrizes utilizadas na fundição em moldes metálicos permanentes, os materiais de construção são, em geral, os aços tratados e ferros fundidos, sendo que, para a fundição sob pressão, os preferidos são aços de médio teor de carbono, aços ferramenta e aço *maraging*. O tungstênio e molibdênio apresentam boas qualidades refratárias e também têm sido empregados em tentativas de fundir sob pressão o aço e o ferro fundido.

Alguns dos produtos usuais, obtidos por meio da fundição em moldes metálicos permanentes, são: blocos de motores de automóveis (Figura 4.23); blocos de cilindros de compressores; cabeçotes; bielas e coletores de admissão (Figura 4.24). Contudo, atualmente, com o desenvolvimento dos processos de fundição e as tecnologias empregadas, as possibilidades de produção de peças por meio dos processos em moldes metálicos são vastas, e praticamente qualquer tipo de peça que atenda às exigências de forma, dimensão, tamanho e tipo de liga metálica empregada pode ser produzido por esse processo.

Figura 4.23 | Bloco de motor fundido para automóvel



Fonte: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Bloco\\_do\\_motor](https://pt.wikipedia.org/wiki/Bloco_do_motor)>. Acesso em: 2 dez. 2016

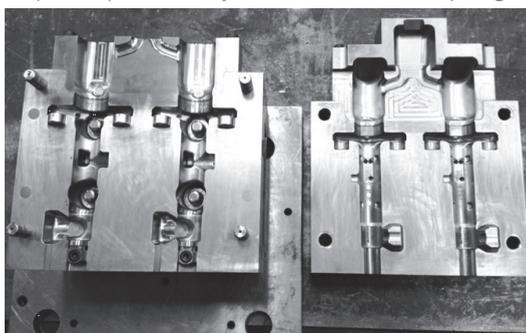
Figura 4.24 | Coletor de admissão fundido para motor de automóvel



Fonte: <[http://www.andysautosport.com/products/skunk2\\_\\_307-05-0290.html](http://www.andysautosport.com/products/skunk2__307-05-0290.html)>. Acesso em: 2 dez. 2016.

A fundição em moldes permanentes por gravidade, também chamada de fundição em coquilha, consiste no vazamento do metal líquido pela ação da gravidade em um molde ou matriz metálica, conforme a Figura 4.25.

Figura 4.25 | Matriz (coquilha) para fundição com vazamento por gravidade



Fonte: <<http://www.moldmetal.com.br/coquilha.php>>. Acesso em: 9 set. 2016.

### Fundição sob pressão

A fundição sob pressão, ou injeção, também utiliza os moldes metálicos permanentes, sendo que o metal líquido é forçado a preencher a cavidade de uma matriz sob ação de uma força gerada por pressão. As pressões típicas variam de 7 a 350 MPa, em que ocorre a manutenção da pressão durante a solidificação e, somente após a solidificação, o molde é aberto para a remoção da peça fundida.

Nesse caso, os moldes de fundição são chamados matrizes, e o processo também é conhecido como *die casting*. As operações de fundição sob pressão são realizadas em máquinas projetadas para fechar as partes do molde de forma precisa e manter o fechamento durante a pressão do metal líquido na cavidade da matriz. É comum que o processo de injeção ocorra em três fases, sendo que, na primeira fase, o metal líquido é pressionado até o canal de ataque; na segunda fase, o metal é pressionado

para dentro da cavidade do molde (matriz); e, na terceira fase, ocorre a compactação do metal na cavidade do molde por meio de um multiplicador de pressão.

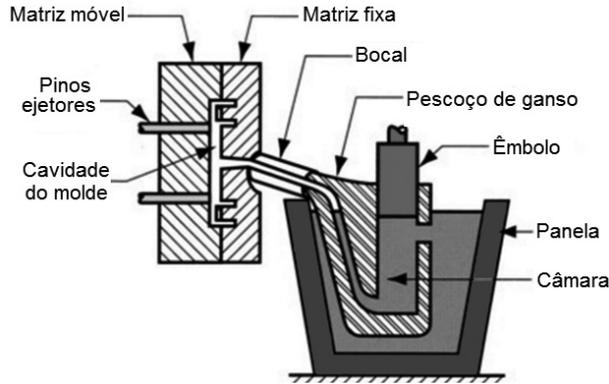
Ainda, é possível que a fundição sob pressão seja realizada por injeção à alta e à baixa pressão. O processo de fundição sob baixa pressão apresenta as seguintes vantagens:

- Maior rendimento.
- Baixas variações do processo.
- Redução de custos de usinagem.
- Excelente controle dos parâmetros do processo.
- Boa qualidade metalúrgica.
- Excelentes propriedades mecânicas e tecnológicas das peças fundidas.
- Baixa porosidade.
- Maior densidade do material, de forma geral, resultando em um fundido com melhores propriedades.

Os equipamentos para fundição que operam com a utilização da pressão se dividem em dois tipos principais: câmara quente e câmara fria.

Nas máquinas de câmara quente, conforme Figura 4.26, o metal é fundido em um recipiente junto à máquina, e um êmbolo é usado para injetar o metal líquido sob alta pressão na matriz, sendo que as pressões típicas de injeção variam de 7 a 35 MPa. Nesse processo, as taxas de produção chegam a até 500 peças por hora. A fundição sob pressão que utiliza máquina de câmara quente também provoca desgaste nos elementos do sistema de injeção, porque parte desse sistema é mantido imerso no metal fundido. Esse processo é, portanto, limitado em suas aplicações a metais de baixo ponto de fusão que não ataquem quimicamente o êmbolo e outros componentes mecânicos. Os metais incluem zinco, estanho, chumbo e, às vezes, magnésio.

Figura 4.26 | Ilustração esquemática da máquina de câmara quente



Fonte: adaptada de <<http://www.cwmdiecast.com/blog/2016/05/24/die-casting-101-hot-chamber-vs-cold-chamber/>>. Acesso em: 2 dez. 2016.

Nas máquinas de fundição sob pressão em câmara fria, conforme Figura 4.27, mais adiante, o metal líquido é vazado em uma câmara não aquecida a partir de um recipiente externo que contém o metal, e um êmbolo é usado para injetar o metal sob alta pressão na cavidade da matriz, sendo que as pressões de injeção usadas nessas máquinas variam de 14 a 140 MPa.

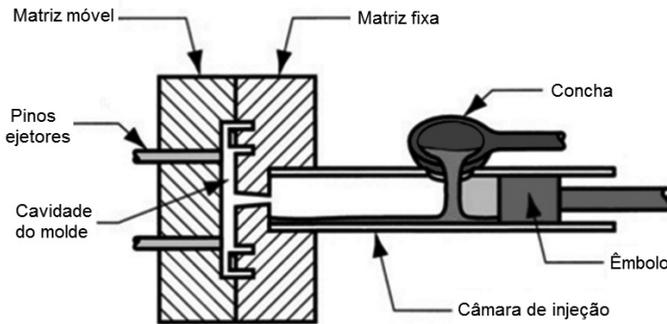


### Exemplificando

Quando comparamos as máquinas de câmara fria com as máquinas de câmara quente, os ciclos de produção são mais longos, pois existe a necessidade de transferir o metal líquido para a máquina. Contudo, a fundição em máquinas de câmara fria apresenta alta produção.

As ligas metálicas usuais nas máquinas de câmara fria são alumínio, latão e ligas de magnésio. Também é possível utilizar ligas metálicas com ponto de fusão mais baixo, como o estanho, o chumbo e o zinco, em máquinas de câmara fria. Entretanto, é mais vantajoso que essas ligas sejam fundidas em processo de câmara quente.

Figura 4.27 | Ilustração esquemática da máquina de câmara fria



Fonte: adaptada de <<http://www.cwmdiecast.com/blog/2016/05/24/die-casting-101-hot-chamber-vs-cold-chamber/>>. Acesso em: 2 dez. 2016.



### Refleta

Como já abordamos, os moldes refratários devem possuir boa permeabilidade para facilitar a saída de ar e gases do interior da cavidade do molde. Como você considera que devem ser construídos os moldes ou matrizes para fundição sob pressão em moldes permanentes do ponto de vista da possibilidade de retenção de ar e gases na cavidade das matrizes?

Entre as vantagens da fundição sob pressão, podemos citar:

- Bom acabamento superficial.
- Boa capacidade de produção.
- Menores espessuras de parede.
- Viabilidade de produção de lotes maiores.
- Tolerâncias mais estreitas, comparadas às dos processos de fundição em areia.
- Maior resistência mecânica das peças fundidas sob pressão.

Entretanto, a fundição sob pressão se limita às ligas não ferrosas, com raras exceções ao uso de ferro fundido, e também quanto ao tamanho das peças, que, nesse processo, não costumam exceder a 5 kg, existindo ainda a possibilidade de retenção de ar na cavidade das matrizes e a restrição de forma, que pode dificultar a retirada da peça solidificada da cavidade da matriz.

## Fundição centrífuga

Esse tipo de fundição emprega a rotação do molde a velocidades elevadas, nas quais a liga metálica no estado líquido é derramada e o giro do molde durante a solidificação permite a obtenção da peça fundida, sendo a força centrífuga responsável por distribuir e manter o metal líquido nas proximidades das paredes do molde e também por formar uma estrutura no fundido que seja quase isenta de defeitos.



### Pesquise mais

Que tal aprender um pouco mais sobre fundição centrífuga horizontal e o quão rápido deve girar o molde nesse tipo de fundição?

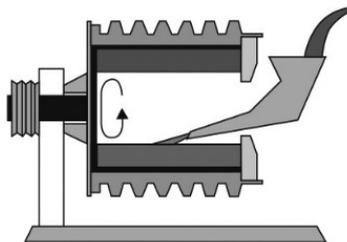
Leia o item 6.3.5, em especial o exemplo 6.1, do livro:

GROOVER, M. P. **Introdução aos processos de fabricação**. 1. ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN-LTC, 2014.

Por meio da fundição centrífuga, conforme Figura 4.28, é possível obter tubos de ferro fundido nodular utilizados na condução de água e esgoto, cilindros para laminadores e tubos para indústria petroquímica. Também é possível fundir ligas não ferrosas por centrifugação para a produção de buchas e mancais em ligas de cobre. Em geral, esse processo se limita à produção de formas geométricas cilíndricas.

O processo mais convencional de fundição centrífuga é realizado para a produção de peças fundidas tubulares.

Figura 4.28 | Ilustração do processo de centrifugação



Fonte: adaptada de Machado (2006 apud BALDAM; VIEIRA, 2013, p. 35).

Como vimos, a fundição em moldes metálicos permanentes é muito importante para a produção de peças fundidas, assim como placas, lingotes e outras formas que servem de matéria-prima para outros processos de fabricação. Entre as poucas limitações da utilização de moldes metálicos, merece destaque o tipo de liga metálica que será fundida, pois as ligas com ponto de fusão mais alto, como os aços, não são convenientes para serem fundidas em moldes metálicos. Apesar disso, o processo de

fundição em moldes permanentes possibilita obter peças com maior uniformidade, estabilidade e precisão dimensional, melhor acabamento superficial, melhores propriedades mecânicas e maior produtividade, quando comparadas às dos processos em moldes perecíveis.

### Sem medo de errar

Como você foi contratado como consultor técnico para a empresa TMC – Tam Metal Casting, será necessário que indique o processo de fundição ideal para a fabricação de um modelo de rodas para automóveis, de uma liga de alumínio silício, que tem massa aproximada de 9,2 kg.

Durante o estudo desta seção, verificamos que a fundição em moldes metálicos permanentes tem diversas formas de aplicação e é utilizada para os mais variados tipos de peças, principalmente, as ligas metálicas não ferrosas.

Ao longo desta unidade, abordamos a fundição em três tipos de moldes muito utilizados nas diversas fundições de ligas metálicas, sendo que, na Seção 4.1, o foco é moldagem em areia a verde, e a peça a ser produzida era de uma liga de aço com um volume inicial relativamente baixo e pouca complexidade geométrica. Já, na Seção 4.2, os tipos de moldes de fundição apresentados consideram a cura (secagem) dos moldes de areia, e o tipo de peça estudado é uma liga de aço inoxidável com grande complexidade geométrica e maiores volumes de produção, daí a indicação da fundição de precisão por moldagem em cera perdida.

Nesta Seção 4.3, considerando as características da peça, no caso, rodas de liga leve para automóveis, suas exigências dimensionais, volume de produção inicial, massa e processos posteriores, podemos indicar a fabricação por processo de fundição em moldes metálicos permanentes, utilizando um sistema de injeção em baixa pressão, por se tratar de um método em que o metal é forçado para dentro do molde a baixa pressão, com absoluto controle, apresentando grande vantagem sobre a fundição por gravidade, resultando em menores níveis de turbulência, com pouca ou nenhuma corrosão. Como o metal fundido estará num recipiente fechado sob atmosfera protegida, absorverá menos hidrogênio e outras impurezas, além disso, haverá menor formação de óxidos. A Figura 4.29 apresenta um exemplo de moldes permanentes de aço.

Figura 4.29 | Exemplo de molde permanente de aço



Fonte: <<http://4.bp.blogspot.com/-lAmVgBbMbJ0/VOvqov8yb4I/AAAAAAAAABI/ejKZYhg2DG8/s1600/1.2.6.jpg>>. Acesso em: 19 jan. 2017.

## Avançando na prática

### Utilizando peças fundidas em lugar de outros processos

#### Descrição da situação-problema

Depois do que você já estudou sobre fundição e processos siderúrgicos, que tal avaliar as possibilidades de substituição de peças produzidas pelos mais diversos processos, por processos de fundição que sejam economicamente e tecnicamente mais viáveis e ainda apresentem vantagens na aplicação das peças, tais como redução no consumo de energia e maior capacidade de reciclagem?

#### Resolução da situação-problema

As ligas de alumínio estão sendo cada vez mais utilizadas em peças para diversas aplicações devido à sua versatilidade e com as diversas combinações de elementos de liga que conferem ao material propriedades compatíveis e até melhores do que outras ligas como o aço. Além disso, podem ser substitutos de peças e componentes plásticos com grandes vantagens, como a alta capacidade de reciclagem.

Entre as vantagens do uso do alumínio, estão: peso reduzido, resistência à fadiga, boa ductilidade, estabilidade de forma, resistência ao desgaste e à corrosão, boa condutividade térmica e elétrica, fácil reciclagem, entre outras.

Por meio da fundição, é possível obter praticamente qualquer tipo de peça, mas quando se trata de alta produtividade em peças de pequeno porte, moderada

complexidade geométrica e redução no consumo de energia, a fundição por injeção de ligas de alumínio é uma excelente alternativa, tornando viável a produção com custos mais baixos, respeito ao meio ambiente e ótimo desempenho em campo. A Figura 4.30 apresenta um lingote de alumínio fundido com uma forma adequada para transporte e manuseio que, posteriormente, será novamente refundida e ligada a outros elementos que darão origem às ligas de alumínio.

Figura 4.30 | Lingote de alumínio



Fonte: <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d7/Lingot\\_aluminium.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d7/Lingot_aluminium.jpg)>. Acesso em: 19 jan. 2017.

### Faça valer a pena

**1.** Na fundição por injeção, o metal líquido é pressionado por meio da cavidade do molde sob alta pressão e, enquanto o metal se solidifica, a pressão é mantida, sendo a peça retirada após a abertura do molde. Nesse tipo de fundição, os moldes também são conhecidos como matrizes.

Leia as afirmações a seguir e responda.

I. Nas máquinas injetoras, são utilizados pinos extratores para produzir furos nas peças.

II. No processo de fundição sob alta pressão, as taxas de produção são as mais altas.

III. Na fundição por injeção, o metal líquido é vazado no molde por gravidade.

IV. São utilizados desmoldantes nas matrizes para evitar o travamento da peça na cavidade do molde.

É correto o que se afirma em:

- a) II e IV, apenas.
- b) II, apenas.
- c) III, apenas.
- d) I e III, apenas.
- e) I, II e IV, apenas.

**2.** No processo de fundição contínua ou lingotamento contínuo, o vazamento do metal líquido ocorre por meio de um cadinho aquecido, sendo que o metal líquido escoar por matrizes de cobre com revestimento de cromo que são resfriadas a água. Os fundidos por meio desse processo apresentam como característica dimensional um grande comprimento.

Leia as afirmações a seguir e assinale verdadeiro (V) para as corretas e falso (F) para as incorretas e, em seguida, escolha a alternativa correta:

( ) Os moldes de fundição contínua são considerados moldes permanentes.

( ) O lingotamento contínuo pode ser realizado por meio de máquina horizontal para a produção de perfis de ferro fundido.

( ) Por meio da fundição contínua, são obtidos blocos de motores.

( ) A fundição contínua pode ser realizada na horizontal, na vertical e na vertical curva.

a) F – V – F – V.

b) F – F – V – F.

c) V – V – F – F.

d) V – V – F – V.

e) V – F – V – F.

**3.** Na fundição centrífuga, é empregada uma rotação do molde em velocidades elevadas, nas quais a liga metálica no estado líquido é derramada e a força centrífuga é responsável por distribuir e manter o metal líquido nas proximidades das paredes do molde.

Por meio da fundição centrífuga, é possível obter tubos de ferro fundido nodular.

Porque

Na fundição por centrifugação, não é possível fundir ligas metálicas não ferrosas.

a) As duas afirmações estão corretas, mas a segunda não é uma justificativa para a primeira.

b) As duas afirmações estão corretas, e a segunda é uma justificativa correta da primeira.

c) A primeira afirmação está correta, e a segunda está incorreta.

d) A primeira afirmação está incorreta, e a segunda está correta.

e) As duas afirmações estão incorretas.



# Referências

BALDAN, R. de L.; VIEIRA, E. A. **Fundição**: processos e tecnologias correlatas. 1. ed. São Paulo: Erica, 2013.

BROWN, J. R. **Foseco Ferros Foundryman's Handbook**. England: Butterworth-Heinemann, 1998.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**: processos de fabricação e tratamento. 3. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

DICIO. **Dicionário Online de Português**. Disponível em: <<https://www.dicio.com.br>>. Acesso em: 25 nov. 2016.

GROOVER, M. P. **Introdução aos processos de fabricação**. 1. ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN-LTC, 2014.

LOPES, E. J.; FERREIRA, F. F.; DEZENA, M. L. C. Sistema de recuperação de areias alcalinas de fundição. **Revista Fundição & Matérias-Primas**, São Paulo, p. 48-59, jan. 2004. Disponível em: <<https://dl.dropboxusercontent.com/u/4824487/Sistema%20de%20recupera%C3%A7%C3%A3o%20de%20areias%20alcalinas%20de%20fund%C3%A7%C3%A3o.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2016.





















ISBN 978-85-8482-818-0



9 788584 828180 >