



# Fundição

*Bruno Ferraz de Oliveira*



**Belém - PA  
2013**

Presidência da República Federativa do Brasil  
Ministério da Educação  
Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica

© Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará  
Este caderno foi elaborado em parceria entre o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará – Campus Belém e a Universidade Federal de Santa Maria para a Rede e-Tec Brasil.

**Equipe de Elaboração**  
Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia do Pará – IFPA-Belém

**Reitor**  
Edson Ary de O. Fontes/IFPA-Belém

**Direção Geral**  
Darlindo Maria Pereira Veloso Filho/IFPA-Belém

**Coordenação Institucional**  
Erick Alexandre de Oliveira Fontes/IFPA-Belém

**Coordenação de Curso**  
Oscar Jesus Choque Fernandez/IFPA-Belém

**Professor-autor**  
Bruno Ferraz de Oliveira/IFPA-Belém

**Equipe Técnica**  
Carlos Lemos Barboza/IFPA-Belém  
Fabiano Darlindo Veloso/IFPA-Belém  
Gisely Regina Lima Rebelo/IFPA-Belém

**Equipe de Acompanhamento e Validação**  
Colégio Industrial de Santa Maria – CTISM

**Coordenação Institucional**  
Paulo Roberto Colusso/CTISM

**Coordenação Técnica**  
Iza Neuza Teixeira Bohrer/CTISM

**Coordenação de Design**  
Erika Goellner/CTISM

**Revisão Pedagógica**  
Andressa Rosemárie de Menezes Costa/CTISM  
Janaína da Silva Marinho/CTISM  
Jaqueline Müller/CTISM  
Marcia Migliore Freo/CTISM

**Revisão Textual**  
Lourdes Maria Grotto de Moura/CTISM  
Vera da Silva Oliveira/CTISM

**Revisão Técnica**  
Valdir Bólico Araújo/CTISM

**Ilustração**  
Marcel Santos Jacques/CTISM  
Rafael Cavalli Viapiana/CTISM  
Ricardo Antunes Machado/CTISM

**Diagramação**  
Cássio Fernandes Lemos/CTISM  
Leandro Felipe Aguiar Freitas/CTISM

Ficha catalográfica elaborada por Maristela Eckhardt – CRB 10/737  
Biblioteca Central da UFSM

**O48f Oliveira, Bruno Ferraz de**  
**Fundição / Bruno Ferraz de Oliveira. – Belém : Instituto**  
**Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – Campus Belém ;**  
**Santa Maria : Universidade Federal de Santa Maria, Colégio**  
**Técnico Industrial de Santa Maria ; Rede e-Tec Brasil, 2013.**  
**108 p. : il. ; 28 cm**  
**ISBN 978-85-915388-0-5**

**1. Metalurgia 2. Fundição 3. Metais I. Título**

**CDU 621.74**

# Apresentação e-Tec Brasil

Prezado estudante,  
Bem-vindo a Rede e-Tec Brasil!

Você faz parte de uma rede nacional de ensino, que por sua vez constitui uma das ações do Pronatec – Programa Nacional de Acesso ao Ensino Técnico e Emprego. O Pronatec, instituído pela Lei nº 12.513/2011, tem como objetivo principal expandir, interiorizar e democratizar a oferta de cursos de Educação Profissional e Tecnológica (EPT) para a população brasileira propiciando caminho de o acesso mais rápido ao emprego.

É neste âmbito que as ações da Rede e-Tec Brasil promovem a parceria entre a Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica (SETEC) e as instâncias promotoras de ensino técnico como os Institutos Federais, as Secretarias de Educação dos Estados, as Universidades, as Escolas e Colégios Tecnológicos e o Sistema S.

A educação a distância no nosso país, de dimensões continentais e grande diversidade regional e cultural, longe de distanciar, aproxima as pessoas ao garantir acesso à educação de qualidade, e promover o fortalecimento da formação de jovens moradores de regiões distantes, geograficamente ou economicamente, dos grandes centros.

A Rede e-Tec Brasil leva diversos cursos técnicos a todas as regiões do país, incentivando os estudantes a concluir o ensino médio e realizar uma formação e atualização contínuas. Os cursos são ofertados pelas instituições de educação profissional e o atendimento ao estudante é realizado tanto nas sedes das instituições quanto em suas unidades remotas, os polos.

Os parceiros da Rede e-Tec Brasil acreditam em uma educação profissional qualificada – integradora do ensino médio e educação técnica, – é capaz de promover o cidadão com capacidades para produzir, mas também com autonomia diante das diferentes dimensões da realidade: cultural, social, familiar, esportiva, política e ética.

Nós acreditamos em você!  
Desejamos sucesso na sua formação profissional!

Ministério da Educação  
Julho de 2013

Nosso contato  
[etecbrasil@mec.gov.br](mailto:etecbrasil@mec.gov.br)



# Indicação de ícones

Os ícones são elementos gráficos utilizados para ampliar as formas de linguagem e facilitar a organização e a leitura hipertextual.



**Atenção:** indica pontos de maior relevância no texto.



**Saiba mais:** oferece novas informações que enriquecem o assunto ou “curiosidades” e notícias recentes relacionadas ao tema estudado.



**Glossário:** indica a definição de um termo, palavra ou expressão utilizada no texto.



**Mídias integradas:** sempre que se desejar que os estudantes desenvolvam atividades empregando diferentes mídias: vídeos, filmes, jornais, ambiente AVEA e outras.



**Atividades de aprendizagem:** apresenta atividades em diferentes níveis de aprendizagem para que o estudante possa realizá-las e conferir o seu domínio do tema estudado.



# Sumário

<b>Palavra do professor-autor</b> .....	<b>9</b>
<b>Apresentação da disciplina</b> .....	<b>11</b>
<b>Projeto instrucional</b> .....	<b>13</b>
<b>Aula 1 – Fundição em areia</b> .....	<b>15</b>
1.1 Moldagem em areia.....	15
1.2 Confeção de moldes.....	17
<b>Aula 2 – Fabricação da areia de moldagem</b> .....	<b>27</b>
2.1 Fabricação de areias verdes aglomeradas com argila.....	27
2.2 Grãos de areia.....	28
2.3 Propriedades das areias de moldagem.....	30
2.4 Propriedades da areia base.....	32
2.5 Aglomerantes para moldes em areia.....	35
2.6 Bentonitas.....	37
2.7 Análise dos fatores que afetam a permeabilidade das misturas de areia sintética.....	39
2.8 Composição.....	40
<b>Aula 3 – Aditivos</b> .....	<b>43</b>
3.1 Função dos aditivos.....	43
<b>Aula 4 – Fusão de metais na fundição</b> .....	<b>47</b>
4.1 Equipamentos de fusão.....	47
4.2 Fornos de cadinho.....	49
<b>Aula 5 – Fornos cubilot</b> .....	<b>55</b>
5.1 Aspectos gerais.....	55
5.2 Cálculos de carga do cubilot.....	56
5.3 Balanço de carbono.....	57
5.4 Balanço de silício.....	58
5.5 Balanço de manganês.....	58
5.6 Balanço de fósforo.....	59
5.7 Balanço de enxofre.....	59

<b>Aula 6 – Fornos de indução</b> .....	<b>61</b>
6.1 Fusão em fornos a indução.....	61
6.2 Fornos de indução a canal.....	64
6.3 Forno elétrico a arco.....	66
6.4 O controle do arco elétrico.....	67
6.5 Condições que influenciam o desgaste dos eletrodos e refratários.....	69
<b>Aula 7 – O comportamento do metal fundido: resfriamento e solidificação</b> .....	<b>73</b>
7.1 Fusão e resfriamento de metais.....	73
<b>Aula 8 – Defeitos de fundição relacionados à moldagem</b> .....	<b>79</b>
8.1 Fatores causadores dos defeitos.....	79
<b>Aula 9 – Defeitos de fundição relacionados ao desprendimento de gases</b> .....	<b>83</b>
9.1 Tipos de defeitos relacionados ao desprendimento de gases endógenos.....	83
9.2 Defeitos causados por fatores exógenos à fundição.....	89
<b>Aula 10 – Segregação</b> .....	<b>93</b>
10.1 Origens da segregação.....	93
<b>Aula 11 – Combate aos defeitos de fundição</b> .....	<b>97</b>
11.1 A metalurgia do combate aos defeitos de fundição.....	97
11.2 Noções de metalurgia de panela.....	98
11.3 Dissolução gasosa em metais.....	99
11.4 Termodinâmica da dissolução do hidrogênio.....	101
11.5 Desoxidação.....	102
11.6 Defeitos de fundição relacionados com estabilidade térmica dimensional.....	103
11.7 Venulação.....	104
11.8 Penetração mecânica.....	105
11.9 Sinterização.....	105
<b>Referências</b> .....	<b>107</b>
<b>Currículo do professor-autor</b> .....	<b>108</b>



## Palavra do professor-autor

Caros alunos, parabéns por terem chegado até aqui quando iniciaremos o estudo sobre o processo de fundição. Fundição é um processo de fabricação que se baseia na conformação física dos materiais. Historicamente, é o processo de fabricação mais antigo e tecnicamente o mais importante entre os processos de fabricação, pelos seguintes motivos:

- É um processo extremamente versátil porque existe a possibilidade de se desenvolverem formas elaboradas, com variações no que se refere ao peso da peça, quantidade e qualidade das matérias-primas.
- O processo é viável para aplicação na maioria das ligas metálicas industriais.
- É o caminho mais curto entre a matéria-prima e o produto final, o que tem impacto positivo no custo final.

As indústrias de fundição se dividem em: a) mercado a que se atendem; b) ligas metálicas que produzem; c) tipo e natureza dos moldes; d) tipo de vazamento. O quadro a seguir sintetiza esta classificação.

### Organização das indústrias de fundição

Mercado	Fundição cativa: quando produz somente para a empresa. Exemplo: fundição da FIAT.
	Fundição de mercado: empresa especializada em fundição para terceiros. Exemplo: Fundições Magoteaux, fabricante de corpos moedores e revestimentos para moinhos.
	Fundição mista: uma fundição cativa que atende ao mercado, eventualmente.
Liga metálica	Ferro fundido: cinzento, branco, maleável, nodular, ligado.
	Aço: carbono, baixa liga, alta liga.
	Não Ferrosas: ligas de cobre, de alumínio, outras.
Tipo de molde	Fabricação seriada.
	Fabricação avulsa.
	Mista.
Natureza do molde	Semipermanente: areia, gesso.
	Permanentes: coquilha.
Tipo de vazamento	Gravidade.
	Pressão.
	Centrifugada.

Fonte: Autor

Peças fundidas têm propriedades específicas que podem ser metalúrgicas, físicas ou econômicas. As peças fundidas são muitas vezes a opção mais barata entre processos de forjamento ou conjuntos obtidos por solda.

Características especiais de peças fundidas:

Peças fundidas adequadamente produzidas não têm propriedades direcionais. Isso significa que a resistência à tração, por exemplo, é a mesma em todas as direções. Isso não é possível em peças obtidas por conformação mecânica, como laminação, forjamento, trefilação, etc. Essa propriedade é chamada anisotropia e é muito importante para engrenagens, anéis de pistão, camisas para cilindros de motores, etc.

Por outro lado, as peças fabricadas por forjamento, laminação, ou qualquer outra forma de conformação mecânica podem ter uma resistência mecânica maior do que a de uma peça fundida bruta. Esta é aliás, a grande alegação de profissionais que trabalham com vendas de produtos conformados mecanicamente, quando em concorrência com a mesma peça fundida. A resistência mecânica maior, dureza maior de uma peça forjada, por exemplo, se deve ao fenômeno de encruamento que inevitavelmente ocorrerá quando conformamos metais em temperaturas abaixo de sua temperatura de recristalização.

O que devemos ter em mente é que peças fundidas podem e devem ser tratadas termicamente de modo a conferir-lhes as mesmas propriedades mecânicas de uma peça conformada. Dessa forma, podemos dizer que o processo de fundição acoplado ao tratamento térmico não fica nada a dever a nenhum outro em termos de qualidades ou propriedades mecânicas.

Bruno Ferraz de Oliveira

# Apresentação da disciplina

A disciplina de Fundição se estenderá por 100 horas, período no qual haverá aulas práticas e teóricas. Nessas aulas vivenciaremos práticas e processos industriais com intuito totalmente profissionalizante.

Agora uma palavra sobre o escopo da disciplina. Como foi enfatizado anteriormente, Fundição é, entre os processos de fabricação, tais como laminação, forjamento, extrusão, o mais versátil. Permite a produção de peças com grande variedade de formas, tamanhos e ligas. Pelo processo de fundição, podemos fabricar desde uma espada de cobre até sinos de bronze; de âncoras de navio até tubos para canhões em bronze, ferro fundido e aço. Podemos fabricar desde gigantescos blocos para motores e geradores para hidroelétricas, até peças minúsculas como implantes odontológicos e ortopédicos. Em termos de precisão, podemos fabricar desde pesos para atracação de navios, bueiros, bancos de jardim, em que apenas o peso é importante, até peças altamente precisas para a indústria automobilística, aeronáutica e aeroespacial. Em termos do tamanho da indústria ou escala de produção, podemos ter desde o pequeno artesanato, como a produção unitária de peças artísticas, ourivesaria, até a produção em larga escala ou seriada, voltada para as indústrias mecânica, de mineração e de metalurgia, como revestimentos para moinhos, peças de desgaste para britadores, corpos moedores, etc. É um processo que pode ser tanto manual como automatizado.

Pela amplitude do assunto e pelas restrições de tempo, teremos de ter um compromisso entre abrangência e síntese, pois o objetivo final desta disciplina é proporcionar conhecimentos suficientes para o início de uma carreira em fundição no nível técnico.

Em resumo, ao final desta disciplina, o aluno deverá estar apto a trabalhar em fundições de moldes permanentes e semipermanentes, com ênfase na fundição de aço e ferro fundido, voltados para a fabricação de peças e componentes aplicados à indústria de mineração. A ênfase se baseia no fato de vivermos numa região que experimenta forte expansão industrial, baseada na mineração. Contudo, será propiciada ao estudante uma visão geral do campo de trabalho que lhe permitirá atuar em qualquer indústria de fundição do país e do mundo.



# Projeto instrucional

**Disciplina:** Fundição (carga horária: 100h).

**Ementa:** Fundição em areia, fabricação da areia de moldagem, aditivos, fusão de metais na fundição, fornos cubilot, fornos de indução, o comportamento do metal fundido: resfriamento e solidificação, defeitos de fundição relacionados à moldagem, defeitos de fundição relacionados ao desprendimento de gases, segregação, combate aos defeitos de fundição.

AULA	OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM	MATERIAIS	CARGA HORÁRIA (horas)
1. Fundição em areia	Apresentar o processo de moldagem em areia. Demonstrar os tempos e movimentos necessários à moldagem em areia manual. Demonstrar os tempos e movimentos necessários à moldagem em areia automática. Aplicar o balanço comparativo entre a moldagem com areia e outros métodos de moldagem.	Ambiente virtual: Plataforma Moodle. Apostila didática. Recursos de apoio: <i>links</i> , exercícios.	10
2. Fabricação da areia de moldagem	Diferenciar método pirometalúrgico do hidrometalúrgico. Conceituar processo eletrometalúrgico. Descrever os processos de obtenção do zinco. Descrever formas de refinis do zinco. Ordenar as operações dos processos de obtenção do zinco. Enumerar as principais aplicações do zinco e suas respectivas ligas.	Ambiente virtual: Plataforma Moodle. Apostila didática. Recursos de apoio: <i>links</i> , exercícios.	10
3. Aditivos	Demonstrar as relações entre qualidade de areia obtida e o uso de aditivos. Visualizar os aspectos positivos e negativos do uso de aditivos. Mostrar os limites práticos no uso de aditivos.	Ambiente virtual: Plataforma Moodle. Apostila didática. Recursos de apoio: <i>links</i> , exercícios.	10
4. Fusão de metais na fundição	Nomear os principais equipamentos de fusão de metais em fundição. Diferenciar a aplicabilidade dos diferentes equipamentos. Entender os mecanismos da operação dos equipamentos. Calcular as cargas para os diferentes equipamentos de fusão.	Ambiente virtual: Plataforma Moodle. Apostila didática. Recursos de apoio: <i>links</i> , exercícios.	10

AULA	OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM	MATERIAIS	CARGA HORÁRIA (horas)
5. Fornos cubilot	Identificar a correta operação de fornos cubilot.	Ambiente virtual: Plataforma Moodle. Apostila didática. Recursos de apoio: <i>links</i> , exercícios.	10
6. Fornos de indução	Oferecer instrumentalização teórica necessária para a eficiente operação de fornos à indução em cadinho. Oferecer instrumentalização para operação de fornos à indução em canal. Oferecer ferramental para operação de fornos elétrico a arco.	Ambiente virtual: Plataforma Moodle. Apostila didática. Recursos de apoio: <i>links</i> , exercícios.	10
7. O comportamento do metal fundido: resfriamento e solidificação	Oferecer ferramentas para o controle prático da solidificação dos metais, evitando os defeitos correlatos de fundição.	Ambiente virtual: Plataforma Moodle. Apostila didática. Recursos de apoio: <i>links</i> , exercícios.	10
8. Defeitos de fundição relacionados à moldagem	Diferenciar os principais tipos de defeitos de fundição. Identificar as causas dos defeitos de fundição. Dominar os métodos de combate aos defeitos de fundição.	Ambiente virtual: Plataforma Moodle. Apostila didática. Recursos de apoio: <i>links</i> , exercícios.	10
9. Defeitos de fundição relacionados ao desprendimento de gases	Fornecer conhecimentos necessários ao combate das bolhas. Fornecer conhecimentos necessários para o combate ao defeito de fundição conhecido como mau enchimento ou junta fria. Fornecer conhecimentos necessários para o combate ao defeito de fundição conhecido como crosta. Conhecer e evitar os defeitos de fundição causados pela explosão de metal.	Ambiente virtual: Plataforma Moodle. Apostila didática. Recursos de apoio: <i>links</i> , exercícios.	10
10. Segregação	Entender as origens da segregação e corrigir suas causas.	Ambiente virtual: Plataforma Moodle. Apostila didática. Recursos de apoio: <i>links</i> , exercícios.	05
11. Combate aos defeitos de fundição	Apresentar ferramentas necessárias à prevenção dos defeitos de fundição. Fornecer alternativas para o conserto de peças defeituosas.	Ambiente virtual: Plataforma Moodle. Apostila didática. Recursos de apoio: <i>links</i> , exercícios.	05

# Aula 1 – Fundição em areia

## Objetivos

Apresentar o processo de moldagem em areia.

Demonstrar os tempos e movimentos necessários à moldagem em areia manual.

Demonstrar os tempos e movimentos necessários à moldagem em areia automática.

Aplicar o balanço comparativo entre a moldagem com areia e outros métodos de moldagem.

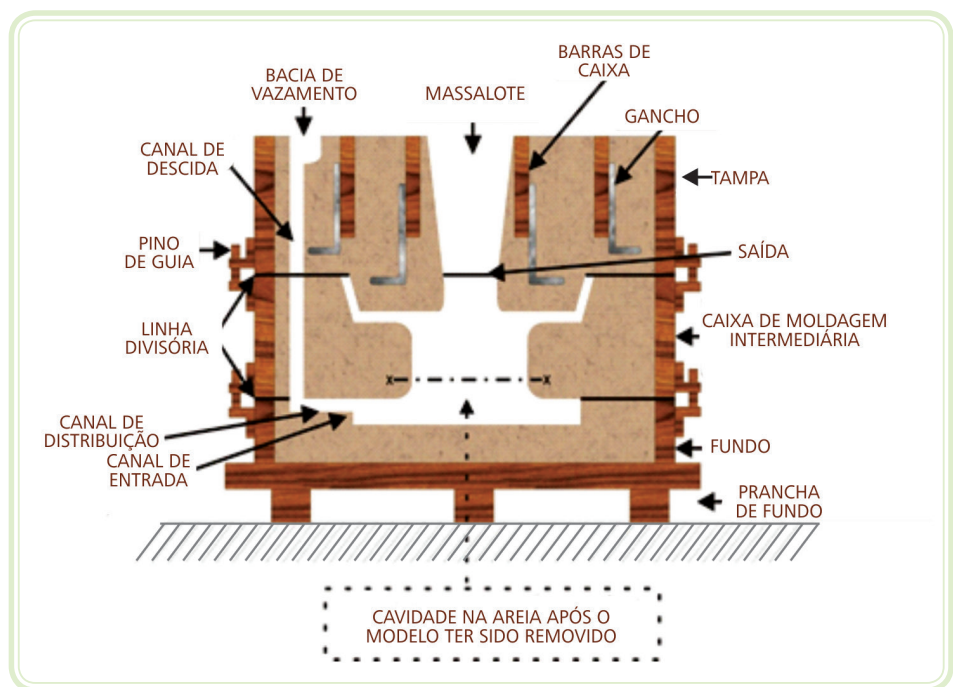
## 1.1 Moldagem em areia

Fundição em areia é um dos processos mais baratos e comuns de se praticar e, por isso, ainda muito utilizado, embora venha perdendo importância relativa em face do avanço das moldagens com resina.

Peças boas não podem ser produzidas sem bons moldes. Devido à importância do molde, os processos de fundição são muitas vezes classificados pelo material e pelo método empregado para se fazer o molde. Assim, as peças fundidas em areia podem ser feitas em:

- a) Moldes de areia verde.
- b) Moldes de areia estufada.
- c) Moldes de areia de macho.
- d) Moldes em barro.
- e) Moldes em casca (*shell molding*).
- f) Moldes aglomerados com cimento.
- g) Moldes aglomerados pelo processo silicato e  $\text{CO}_2$ , entre outros.

Os métodos principais para fazer estes moldes são chamados: moldagem em bancada, moldagem em máquina, moldagem no chão e moldagem em poço. A Figura 1.1 mostra a seção transversal de um molde. Observa-se, nesta figura, a caixa de moldação. A caixa é uma estrutura de metal ou de madeira, na qual o molde é feito. Ela deve ser forte e rígida, de modo a não distorcer quando manipulada ou quando a areia é socada. Pinos e buchas alinham as seções de uma caixa, se desgastam em serviço e devem ser checados periodicamente para evitar desencontros ou desalinhamentos. A caixa se divide em duas partes principais: tampa (seção superior) e fundo. Algumas vezes são necessárias mais que duas caixas para completar a altura do molde. Essas caixas são ditas intermediárias.



**Figura 1.1: Seção transversal de um molde de areia em três partes**

Fonte: Doyle et al., 1978

A linha x-x indica a divisão do modelo.

Um bom molde deve ter as seguintes características:

- Resistência suficiente para resistir ao peso do metal.
- Resistência à ação erosiva do metal líquido em escoamento rápido durante o vazamento.
- O molde deve gerar uma quantidade mínima de gás quando cheio de metal líquido. Gases contaminam o metal e podem romper o molde.



- d) O molde deve permitir que quaisquer gases gerados durante o vazamento de metal possam passar pelo corpo do molde propriamente dito antes de penetrarem no metal.
- e) O molde deve ser refratário o suficiente para resistir às altas temperaturas do metal e soltar-se com facilidade da peça após resfriamento.
- f) O macho deve ser colapsível suficiente para permitir que a peça se contraia, após a solidificação.

## 1.2 Confecção de moldes

Escolhe-se uma caixa maior do que a cavidade do molde que ela deve conter, a fim de haver espaços para os massalotes e para o sistema de canais. Deve haver massa de molde suficiente sobre e sob a cavidade para **revenir** qualquer escapamento de metal durante o vazamento. Caixas com metal insuficiente podem causar desde a perda da peça até acidentes pessoais. Antes da etapa de moldagem, deve-se fazer uma imagem da peça a ser fundida. Esta imagem é chamada modelo. O modelo pode ser em madeira, liga metálica ou resina, dependendo do número de vezes a ser usado. Para grandes séries, empregam-se modelos metálicos, mais caros, porém com maior resistência. O modelo que fará o fundo da peça é colocado sobre a prancha de socamento juntamente com quaisquer peças usadas para fazer o sistema de canais e de massalotes. A Figura 1.2 mostra esta etapa.

### A-Z

#### revenir

Aquecer a peça, previamente temperada ou normalizada, a uma temperatura abaixo da faixa de transformação, com o objetivo de estender a durabilidade e a tenacidade.



Figura 1.2: Colocação do modelo sobre a prancha de socamento (aula prática de fundição nos laboratórios do IFPA, Campus Belém)

Fonte: Autor

A areia de faceamento é então peneirada até uma profundidade de aproximadamente uma polegada sobre o modelo e sobre a prancha de socamento como mostra a Figura 1.3. Essa etapa confere acabamento à superfície da peça acabada, através do uso de uma areia mais fina e de distribuição granulométrica mais homogênea. Essa areia é mais apta a reproduzir detalhes. Não se deve usar areia mais fina em todo o molde porque se sacrificaria a permeabilidade, como será visto mais tarde.



**Figura 1.3: Aplicação da areia de faceamento através de peneiramento numa espessura de aproximadamente uma polegada (aula prática de fundição nos laboratórios do IFPA, Campus Belém)**

Fonte: Autor

A areia de faceamento é então compactada à mão, de modo a preencher todos os bolsões e cantos agudos, envolvendo completamente o modelo. A próxima etapa será a de colocação da areia de enchimento que irá cobrir a areia de faceamento e será socada, uniformemente, com o auxílio de alguma ferramenta como mostra a Figura 1.4, em torno do modelo. Essa etapa é crucial para que se obtenha uma peça com superfície lisa, facilmente limpa e sem penetração de metal na areia nem de areia no metal, o que provocaria defeitos de fundição.



**Figura 1.4:** Etapa de compactação da areia de enchimento, com auxílio de uma ferramenta (aula prática de fundição nos laboratórios do IFPA, Campus Belém)

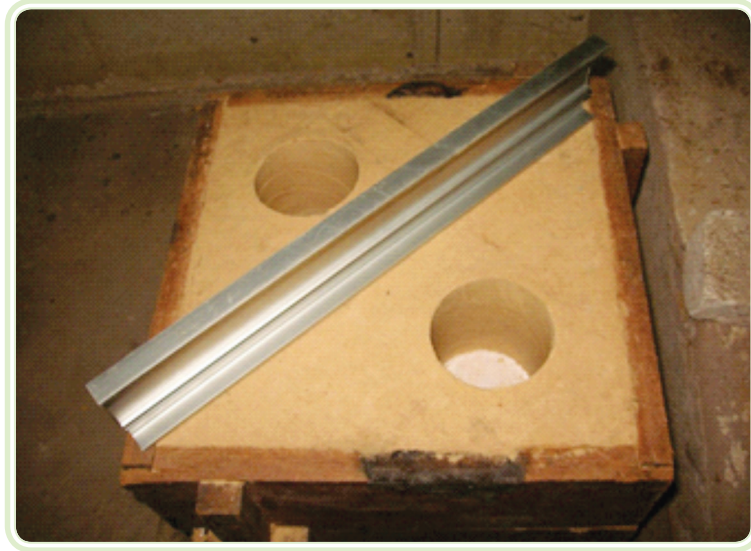
Fonte: Autor



**Figura 1.5:** Ferramentas de compactação da areia de enchimento (aula prática de fundição nos laboratórios do IFPA, Campus Belém)

Fonte: Autor

Findada a etapa de compactação, a areia em excesso é retirada com uma régua, conforme se vê na Figura 1.6.



**Figura 1.6: Remoção do excesso de areia com régua; molde para duas peças de alumínio cilíndricas (aula prática de fundição nos laboratórios do IFPA, Campus Belém)**

Fonte: Autor

Nesse ponto, a moldagem da tampa está pronta. Então, retira-se a prancha de socamento e inicia-se a confecção do molde da parte inferior da peça, chamada fundo. As etapas para a moldagem da tampa são as mesmas do fundo. Ao término da moldação da parte inferior e antes de fechar o molde, existem as etapas de limpeza da cavidade com ar comprimido e eventualmente cura a fogo para aumento da resistência superficial. Depois, o pó de proteção é colocado sobre a superfície divisória do molde e do modelo. O pó de proteção evita que a areia da tampa grude na areia do fundo. Para moldes grandes, usa-se areia silicosa fina como pó de proteção. Para moldes pequenos pode-se usar talco ou areia de sílica mais fina.

Findado o processo de compactação da tampa e do fundo, o modelo é retirado, os machos são colocados e o molde é ventilado para garantir a saída de gases que serão gerados na etapa de vazamento, conforme ilustram as Figuras 1.7 e 1.8, a seguir.



**Figura 1.7: O fundo foi invertido para a retirada do modelo (aula prática de fundição nos laboratórios do IFPA, Campus Belém)**

Fonte: Autor



**Figura 1.8: Operação de abertura de furos no molde, para prosseguir com o vazamento (aula prática de fundição nos laboratórios do IFPA, Campus Belém)**

Fonte: Autor

Por fim, o molde é fechado com cuidado. São colocados pinos que guiam a tampa para evitar desalinhamentos e os grampos são inseridos para evitar que a tampa se separe do fundo pela pressão metalostática que será criada pelo vazamento do metal. Para ajudar os grampos, pesos costumam ser colocados sobre os moldes para garantir a completa vedação do molde durante o vazamento. A Figura 1.9 mostra o molde neste estágio. A seguir observa-se a bacia de vazamento por onde se dará o enchimento do molde com metal líquido.



**Figura 1.9: O molde está pronto para o vazamento (aula prática de fundição nos laboratórios do IFPA, Campus Belém)**

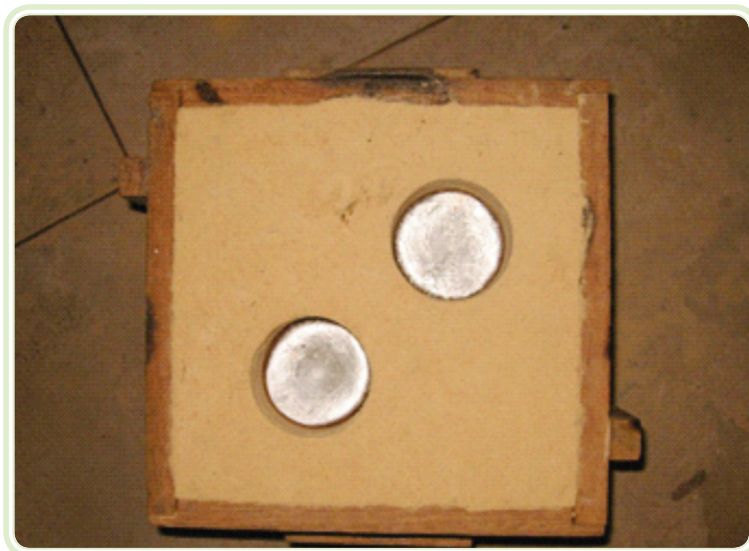
Fonte: Autor

A etapa de vazamento é ilustrada na Figura 1.10. É possível observar que a velocidade de enchimento é rigorosamente controlada. Se for muito rápida, pode causar erosões no molde devido à velocidade de escoamento do metal. Se for muito lenta, expõe o metal à oxidação.



**Figura 1.10: Momento de vazamento do metal no molde (aula prática de fundição nos laboratórios do IFPA, Campus Belém)**

Fonte: Autor



**Figura 1.11: Metal vazado no molde (aula prática de fundição nos laboratórios do IFPA, Campus Belém)**

Fonte: Autor

Após o vazamento, deve-se aguardar um certo tempo para que o metal se solidifique e esfrie. Depois, ele será desmoldado e terá uma aparência mostrada na Figura 1.12. Ali ainda são visíveis os canais de ataque, vazamento.



**Figura 1.12: Duas peças de alumínio desmoldadas, mostrando as rebarbas e os canais (aula prática de fundição nos laboratórios do IFPA, Campus Belém)**

Fonte: Autor



**Figura 1.13: Duas peças de alumínio desmoldadas (aula prática de fundição nos laboratórios do IFPA, Campus Belém)**

Fonte: Autor

A próxima etapa é o processo de rebarbação. Trata-se de uma etapa de limpeza onde serão retirados os canais e massalotes, lixadas todas as rebarbas, removidas todas as inclusões de areia. A aparência da peça acabada é mostrada na Figura 1.14. Os canais, massalotes e rebarbas são retornados para refusão.



**Figura 1.14: Uma carcaça de bomba após limpeza (rebarbação)**

Fonte: Autor

Como foi visto, até então, toda a forma da peça é conferida pelo modelo. A Figura 1.15 mostrará uma oficina de modelagem. O modelo deve contemplar acréscimos para compensar a contração, pois à medida que o metal solidifica e resfria, ele se contrai. Embora a contração seja volumétrica, ela é usual-



mente expressa linearmente, assim os números referentes às dimensões não aparecem aumentados no desenho da peça ou de modelos, mas o modelador usa como ferramenta a régua de contração cuja escala é mais longa que o padrão de uma proporção definida.

Outros acréscimos são sobre-espessura para usinagem, sobre-espessura para distorção e saídas. A sobre-espessura para usinagem é o tamanho maior com o qual as dimensões de uma peça são feitas, a fim de prever material para usinagem. A sobre-espessura para distorção é o valor a ser adicionado a peças com formas tais que impeçam o empenamento ao resfriarem. Nesse caso, podemos deslocar o modelo, de forma a compensar o empenamento. A saída é uma conicidade ou inclinação colocada nos lados de um modelo para o exterior, que permitirá a saída do modelo sem danificar o molde.



**Figura 1.15: Oficina de modelagem**

Fonte: Autor

A areia dos moldes não será descartada após o uso, mas tratada e recuperada para ser usada muitas vezes. Na verdade, areia nova é acrescentada na proporção de 2 a 5 % apenas para repor as perdas físicas inerentes ao processo.

## Resumo

Nessa aula, apresentou-se o processo de fundição e as etapas da confecção de um molde. Definiram-se o conceito de caixa de moldagem, ventilação, areia de enchimento, areia de faceamento, canais de ataque, canais de alimentação, massalotes, bacia de alimentação. Viu-se, por fim alguns princípios de fabricação de modelos, a régua de contração, e as sobre-espessuras para usinagem, distorção e saída.



## Atividades de aprendizagem

1. Quais as vantagens da fundição, comparativamente a outros processos de fabricação?
2. Quais os processos de fundição existentes?
3. Como se classificam as fundições com relação ao mercado?
4. Como se classificam as fundições com relação às ligas metálicas?
5. Como se classificam as fundições em relação à forma de vazamento?
6. O que é uma fundição cativa?
7. Quantos processos de moldagem existem?
8. Por que o processo de moldagem em areia é o mais praticado?
9. Quais características um molde deve ter?
10. Trace um esboço de um molde típico e indique suas partes principais.
11. Explique o que acontece com uma peça quando ela se solidifica e se resfria.
12. O que são ventilações?
13. O que é areia de faceamento? Estabeleça a diferença entre ela e areia de enchimento.
14. O que é um macho de moldagem e em que ele é usado?
15. Faça um fluxograma para a confecção de um molde típico, descrevendo suas etapas.
16. O que são canais de vazamento e ataque?
17. O que é bacia de vazamento?
18. O que é uma régua de contração?
19. O que é uma sobre-espessura num modelo? Para que serve?

# Aula 2 – Fabricação da areia de moldagem

## Objetivos

Apresentar uma noção geral do “estado da arte” da fabricação de areias de fundição, começando por processos mais simples até os mais sofisticados de preparação de areias.

Identificar as técnicas de preparo de areias, tratando a areia como um produto industrial com altos requisitos de qualidade.

Assegurar a qualidade de fabricação pela alteração das propriedades mecânicas e químicas das areias de fundição através de mudanças em parâmetros chave de fabricação das areias de fundição.

## 2.1 Fabricação de areias verdes aglomeradas com argila

A função de qualquer material de moldagem é manter a forma da cavidade do molde até que o metal líquido se solidifique. Areia é o material de moldagem mais barato e mais simples para isso.

As areias de moldagem se classificam conforme o aglomerante. As principais são: areias aglomeradas com argila, dentre as quais a mais usada é a bentonita; areias aglomeradas com resinas; areias aglomeradas pelo processo silicato – CO<sub>2</sub>, areias aglomeradas com cimento.

Os moldes podem ainda ser classificados em verdes ou estufados. São estufados quando levados à estufa para, através de um processo de aumento de temperatura, produzirem um aumento da resistência mecânica. São verdes, se não passarem por esse processo.

A areia de moldagem é composta por quatro ingredientes principais: a) grãos de areia propriamente; b) aglomerante, que pode ser argila natural ou com resina ou cimento, c) aditivos e, d) água para coalescer os grãos e ligá-los.

## 2.2 Grãos de areia

São os elementos que possuem as propriedades refratárias necessárias para que o molde suporte as altas temperaturas do metal líquido. As areias mais empregadas são de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), cromita ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) e, mais raramente, zirconita ( $\text{ZrO}_2\text{SiO}_2$ ), olivinas, chamotes, etc. Dentre estas, a areia de sílica é mais econômica mas menos refratária. Já as zirconitas são mais caras e usadas somente em fundições de grandes e precisas peças de aço. A seguir, uma breve apreciação comparativa entre as areias de fundição disponíveis no mercado, por ordem de importância para as indústrias de fundição.

- a) **Sílica** ( $\text{SiO}_2$ ) – as características da sílica variam conforme sua formação geológica e a jazida do qual foi extraída. As areias em geral, e, particularmente as de sílica, vêm da desagregação de rochas, principalmente pelo intemperismo. A constituição da rocha original, o tipo de intemperismo sofrido até a formação da areia e as condições a que o depósito foi submetido até a extração são fatores que determinam a constituição, sua pureza e as características de seus grãos. As rochas que dão origem às areias silicosas são os arenitos e os quartzitos, que se transformam, sob certa influência, ao longo do tempo geológico, originando os depósitos de areia ou as formações quartzitas e o sílex, que tem uma estrutura amorfa e é geralmente de menor pureza que os minerais anteriores. Uma desvantagem do uso de sílica como areia-base, além de sua elevada expansão térmica e sua reatividade com alguns metais e ligas, é o perigo da silicose (doença pulmonar causada pela inalação do pó de sílica).
- b) **Cromita** ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) – a cromita é um minério pertencente ao grupo de minérios refratários que possuem composição química e propriedades físicas regulares. Contém teores mínimos de sílica. O teor de  $\text{SiO}_2$  é muito importante, pois à medida que aumenta, favorece a penetração de metal entre os grãos de areia. Esse fenômeno é muito mais importante quando fundimos ligas de manganês (Mn). O Mn reage com a sílica do molde, provocando perda de metal e liberação de gases segundo a reação:

Equação 2.1



Nessas ligas é obrigatório o uso de areia de cromita, ao menos no faceamento.

O ponto de fusão da cromita é de aproximadamente  $2200^\circ\text{C}$ , mas sua refratariedade diminui em relação à porcentagem de impurezas presentes

na areia. No caso de areia de cromita comum, a temperatura de fusão é em torno de 1900°C. A temperatura de sinterização (início da fusão pastosa) pode variar de 1350°C a 1500°C. As boas características da areia de cromita em alta temperatura, justificam sua utilização principal que é a moldação para peças de aço em substituição à areia de sílica, o que parece ser a tendência tecnológica. Além disso, está em expansão o uso da cromita na moldação para peças de ferro fundido cinzento ou com grafita esferoidal. Estudos comparativos sobre areias de sílica, olivina e cromita nas fundições de aço mostram a superioridade das areias de cromita mesmo para o uso de aços não ligados. No campo das peças grandes a areia de cromita é usada principalmente para a fabricação de machos, notando-se, entretanto, uma tendência cada vez mais nítida de utilização na confecção de moldes.

- c) **Zirconita** ( $ZrO_2SiO_2$ ) – é um silicato de zircônio. O mineral puro contém 67,2 % de  $ZrO_2$  e 32,8 % de  $SiO_2$ . A composição química das areias varia dentro de certas faixas conforme seu grau de pureza. A temperatura de fusão da zirconita é de ordem de 2550°C e seu ponto de sinterização se situa próximo de 1400°C. A estrutura e a resistência geológica da zirconita são muito semelhantes às do quartzo, mas ela apresenta certas características mais favoráveis. Além de ser mais refratária que a sílica e apresentar um coeficiente de expansibilidade térmica muito pequeno, é menos reativa com vários metais líquidos, particularmente com o ferro. As areias de zirconita são utilizadas com ótimos resultados na moldação para peças de aço, inclusive de grande porte. O aço praticamente não molha a areia de zirconita, e só ocorre penetração de metal entre os grãos em casos particulares de elevada pressão do metal líquido e/ou superaquecimento da areia. Caso for necessária a secagem dos moldes antes do vazamento é preciso cuidado especial para evitar o aparecimento de trincas no molde, pois além da forma arredondada dos grãos, eles são de pequeno tamanho e dimensões muito próximas, o que gera um empilhamento muito compacto nos moldes.
- d) **Olivina** – é um ortosilicato de ferro e de magnésio composto de forsterita ( $Mg_2SiO_4$ ) e de faialita ( $Fe_2SiO_4$ ). As variedades mais comuns têm coloração verde-oliva, de onde vem sua denominação olivina. As areias usadas em fundição são constituídas por uma solução sólida de aproximadamente 90 % de forsterita e 10 % de faialita, com densidade entre 3,25 e 3,4. O mineral existe sob a forma de rocha natural, de origem vulcânica; é extraído, britado e classificado, dando origem à areia que

apresenta grãos de formas angulares. A temperatura de fusão da olivina situa-se entre a de seus constituintes mineralógicos, a forsterita e a faialita e na prática varia entre 1300°C e 1800°C conforme seu teor em óxido de ferro. A forsterita é muito refratária, mas esta refratariedade diminui rapidamente com o teor de sílica e de óxido de ferro. O ponto de sinterização da olivina pura é de aproximadamente 1600°C. Entretanto, sobre a forma de areia preparada, este valor cai para 1250°C a 1320°C.

- e) **Chamote** – é um material obtido através de um processo de beneficiamento de argilas cauliniticas, que inclui sua calcinação, britagem e classificação granulométrica. Essas argilas, quando aquecidas até a calcinação, transformam-se, por desidratação e outros mecanismos, em materiais refratários em cuja estrutura se encontra, principalmente, mulita e cristobalita. O ponto de fusão da chamote é variável, dependendo da origem e do modo de preparo do material, mas as boas areias dela se equiparam à sílica (1725°C) ou a ultrapassam nesse aspecto, podendo chegar a valores da ordem de 1840°C. A refratariedade aumenta à medida que diminui o teor de impurezas como óxido de ferro, de titânio, etc. É provável que o ponto de sinterização da chamote seja superior ao da sílica (1400°C). A baixa expansibilidade da chamote faz desse material uma alternativa interessante, quando se trata de fundir grandes peças em aço ou em ferro fundido. Porém, devido ao preço mais elevado que o da sílica, o seu uso só ocorre quando for indispensável uma grande redução no risco de ocorrência de defeitos devido à expansão da areia-base e à baixa reatividade da areia com as ligas vazadas. Para que suas propriedades refratárias não sejam afetadas, a areia de chamote deve ser usada com um aglomerante compatível (argila refratária), de modo que não atue como fluxante da outra a altas temperaturas.

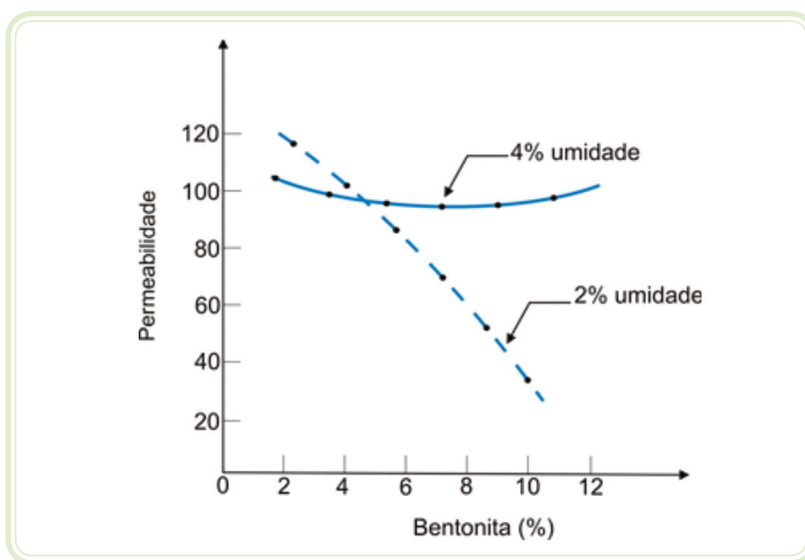
## 2.3 Propriedades das areias de moldagem

- a) **Moldabilidade** – é a capacidade que tem a areia de reproduzir as formas do modelo sob um determinado esforço de compactação, permitindo a obtenção de formas.
- b) **Resistência mecânica** – é a resistência aos esforços mecânicos que o molde deve suportar para não se deformar ou quebrar na extração do modelo, no manuseio, na colocação dos machos, no momento do vazamento, sob esforços dinâmicos e estáticos do metal líquido.

- c) **Permeabilidade** – é a capacidade que a areia tem de se deixar atravessar pelos gases formados durante o vazamento do metal líquido no molde. Se os gases não conseguem sair, ficam retidos na massa metálica, produzindo o defeito chamado bolhas. Esses gases provêm do ar contido na cavidade do molde, da queima dos produtos contidos na areia, da evaporação da água contida na areia e dos gases dissolvidos no metal e que se desprendem durante a solidificação.
- d) **Difusão térmica** – corresponde à capacidade que deve ter a areia que constitui os moldes de transmitir calor dos pontos mais quentes, como a superfície de contato com o metal líquido, para as áreas mais frias, sob um regime transiente de transmissão de calor.
- e) **Sinterização** – é a temperatura em que se observa o início do amolecimento dos seus grãos em contato com o metal líquido, provocando um mau acabamento superficial da peça.
- f) **Dureza** – é a capacidade de resistir ao atrito do metal.
- g) **Estabilidade térmica dimensional** – com o vazamento do metal nos moldes, há naturalmente algumas partes deles que são mais aquecidas que as outras. Essa propriedade está ligada diretamente ao fenômeno de dilatação da areia sob o efeito do calor. Uma areia com boa estabilidade térmica dimensional não apresenta grandes variações dimensionais das partes mais aquecidas do molde em relação às outras. O valor das variações dimensionais depende de uma série de fatores como:
- Tipo de areia.
  - Tamanho, forma e distribuição granulométrica dos grãos.
  - Difusibilidades térmica dos moldes.
  - Temperatura de vazamento do metal.
  - Tamanho e forma da peça.
  - Tempo de vazamento.
  - Compactação do molde.

- Resistência mecânica e plasticidade da areia.

A Figura 2.1 demonstra a variação da permeabilidade em função da quantidade de aglomerante tipo bentonita e do teor em umidade. A permeabilidade possui um mínimo para teores de 4% e sempre diminui para teores inferiores a esse valor. Isso se deve ao fato de que deve haver sempre uma quantidade suficiente de umidade para reagir com a bentonita. Do contrário, esta última, por ser mais fina que os grãos de areia, ocupará seus interstícios e diminuirá a permeabilidade.



**Figura 2.1: Influência da adição de aglomerante na permeabilidade**

Fonte: Doyle et al., 1978

## 2.4 Propriedades da areia base

Para determinar as propriedades da areia base, utilizada no processo de moldação, são feitos ensaios e análises, como:

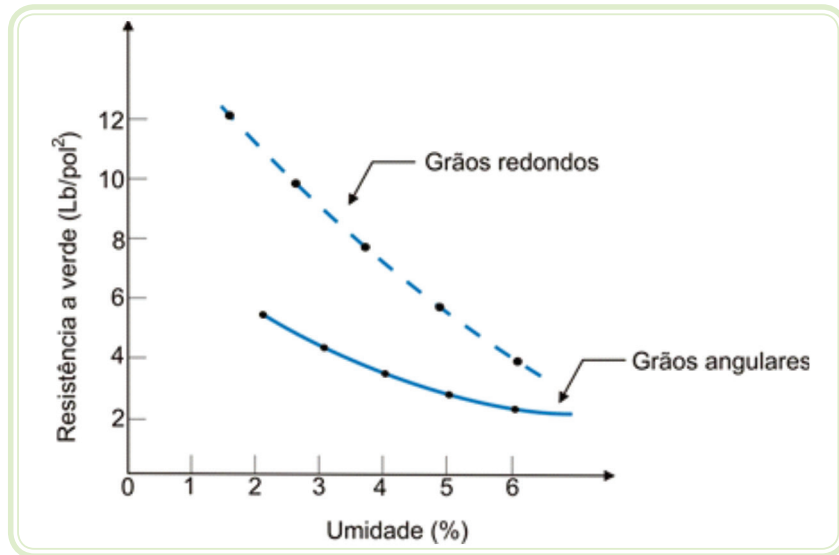
- Ensaio granulométrico.
- Ensaio de umidade.
- Ensaio de compressão.
- Ensaio de tração.
- Ensaio de permeabilidade.



### 2.4.1 Ensaio granulométrico

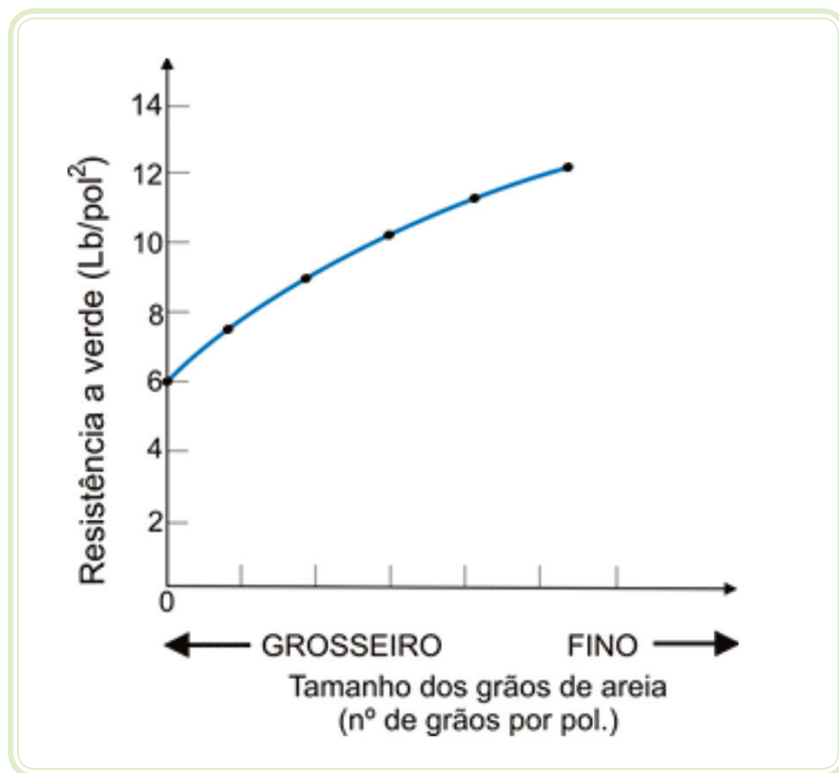
Na análise granulométrica, procura-se determinar a forma e o tamanho médio dos grãos (módulo de finuras). O módulo de finura por si só não exprime a qualidade da areia. Assim, é necessário estudar a distribuição granulométrica, que é a percentagem da areia retida em cada peneira. Para se obter a distribuição granulométrica usa-se a série padrão (USS) de peneiras padronizadas sendo: 6, 12, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 140, 200, 270, onde cada número indica o número de malhas contidas em uma polegada linear. Em função do módulo de finura que é o tamanho médio dos grãos, as areias são classificadas em grossa – módulo de finura de 30 a 50 inclusive; média – de 51 a 70, inclusive; fina – de 71 a 100 inclusive; muito fina – 101 a 150 inclusive; finíssima – acima de 150.

O tamanho do grão influencia no acabamento da peça, na resistência mecânica e na permeabilidade do molde. Quanto mais fina a areia, melhor será o acabamento. Entretanto, quanto mais fina é a areia, menor será a sua permeabilidade. Assim, recomendam-se areias grossas e médias (módulo de finura baixa) para a fundição de ligas ferrosas, pois em virtude das elevadas temperaturas de vazamento, há grande produção de gases que têm de escapar através da areia. Chama-se de fino o material que passa pela peneira de **140 malhas**. Os finos apresentam a vantagem de reduzir a expansão da areia, mas baixam sensivelmente a permeabilidade da areia. A Figura 2.2 mostra a influência da forma dos grãos e da umidade sobre a resistência a verde de moldes de areia, em função da umidade. Vê-se que os grãos redondos favorecem a resistência mecânica para qualquer umidade. Também se pode observar o efeito deletério da umidade sobre a resistência mecânica.



**Figura 2.2: Efeito da forma dos grãos e da umidade da mistura sobre a propriedade de resistência mecânica das areias de moldação**

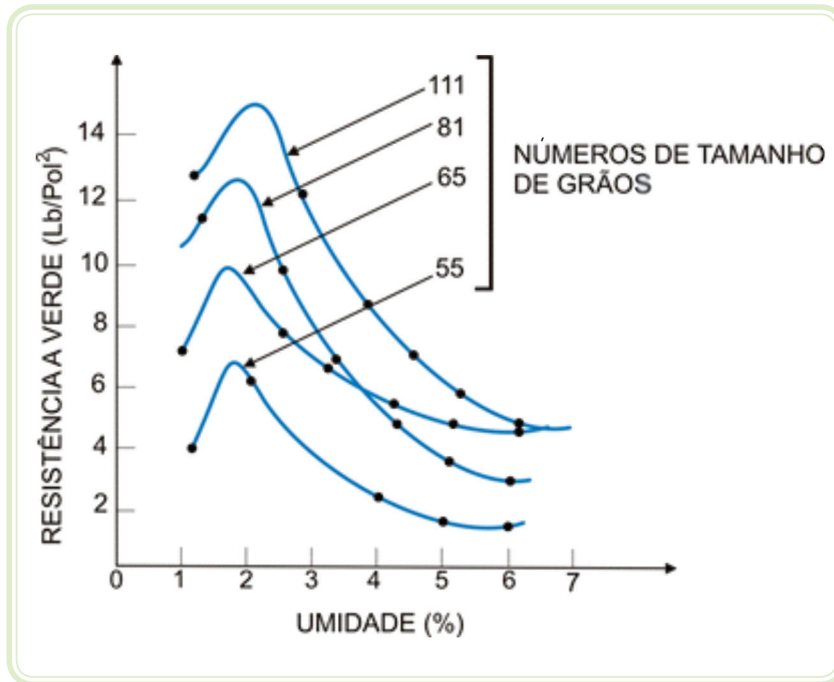
Fonte: Doyle et al., 1978



**Figura 2.3: Influência do tamanho de grão da areia na resistência mecânica de misturas de areia**

Fonte: Doyle et al., 1978

A Figura 2.4 mostra a influência do módulo de finura sobre a mesma resistência a verde de areias. Observa-se que quanto maior o módulo de finura, maior é a resistência mecânica que apresenta um máximo de 2 % de umidade.



**Figura 2.4: Influência do módulo de finura sobre a resistência mecânica a verde de areias de moldação**

Fonte: Doyle et al., 1978

A distribuição granulométrica da areia para moldes deve ser tal, que ela adquira alta permeabilidade e baixa expansão quando aquecida. Isso se consegue quando mais de 50 % e menos de 70 % dos grãos ficam retidos em três peneiras consecutivas. O valor percentual máximo da areia retida em três peneiras consecutivas da série padrão chama-se concentração. Uma areia com mais de 70 % de concentração apresenta tendência à alta expansão.

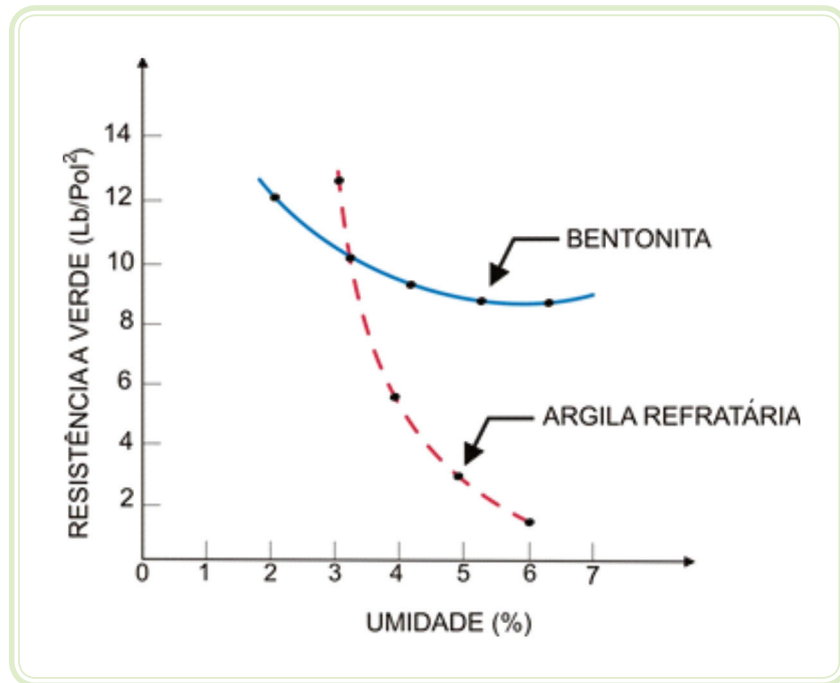
## 2.5 Aglomerantes para moldes em areia

O aglomerante é o produto que permite ligar entre si os grãos da areia base, de maneira a constituir uma mistura própria para o uso de fundição. Os aglomerantes podem ser argila, bentonita, resina, silicato, CO<sub>2</sub>, cimento, etc.

Neste caderno, por limitações de tempo e espaço, analisaremos apenas os aglomerantes mais comuns e de baixo custo: a argila natural contida na própria areia e as bentonitas.

Bentonita é um tipo de argila muito especial que, por sua elevada capacidade de inchar-se em presença de água, tem um poder aglomerante muito grande, conferindo à mistura uma resistência mecânica muito maior. De fato, como mostra a Figura 2.5, a resistência mecânica em areias aglomeradas com

bentonitas, nas faixas de umidade compatíveis com o trabalho de moldação, em torno dos 4 %, é sobremaneira mais elevada.



**Figura 2.5: Comparação entre areias aglomeradas com argila natural e bentonita**

Fonte: Doyle et al., 1978

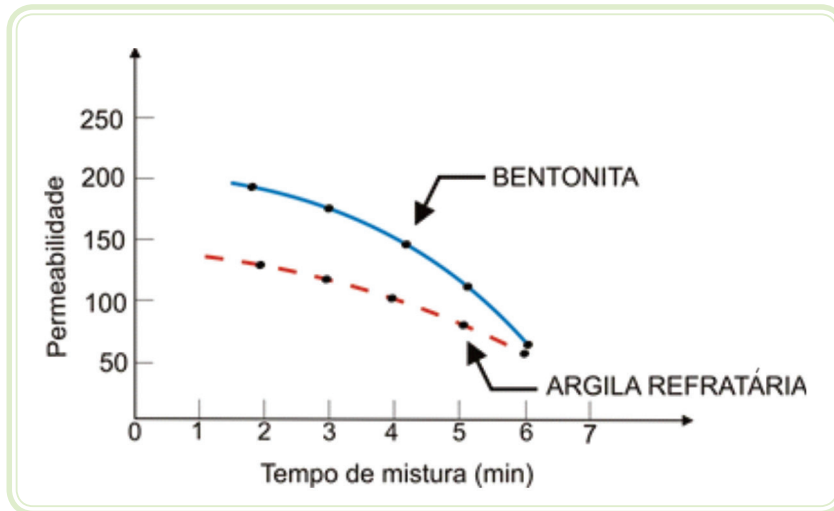
Por outro lado, sabemos que a permeabilidade é afetada pelo teor de aglomerante e de umidade. Mas quando se compara argilas com bentonitas, vemos que com o emprego desta última, a permeabilidade é menos afetada pela umidade, conforme mostra a Figura 2.6 a seguir que mostra o efeito comparativo sobre a permeabilidade em função da adição de dois aglomerantes. O teor em água é função do teor em aglomerantes. Para comparação entre diversas argilas usa-se a função rendimento da argila, definida como a relação entre a resistência mecânica obtida e a % de argila empregada ou seja:

Equação 2.2

$$\text{Rendimento} = \frac{\text{Resistência Mecânica Necessária}}{\% \text{ Argila}}$$

Desta forma temos dois rendimentos a considerar:

- Rendimento máximo, que é o maior rendimento.
- Rendimento ótimo, que é o rendimento correspondente ao teor em água, que dá máxima permeabilidade à areia.



**Figura 2.6: Efeito comparativo sobre a permeabilidade com a adição de bentonitas em comparação com a adição de argilas refratárias**

Fonte: Doyle et al., 1978

As argilas refratárias são utilizadas principalmente na fabricação de produtos refratários. Utilizam-se algumas delas para a regeneração de areias naturais usadas para a preparação de areias sintéticas especiais que apresentam algumas características de areias naturais associadas a outras areias sintéticas comuns.

Por exemplo, as argilas são um bom estabilizante térmico dimensional, porque, se num primeiro estágio elas se contraem, num segundo, devido à liberação de H<sub>2</sub>O de constituição e de envolvimento, vai existir uma dilatação que compensa a contração. Vem daí a estabilização.

## 2.6 Bentonitas

Bentonita designa uma família muito especial de argilas aglomerantes. Elas recebem esse nome porque sua descoberta se deu na localidade de Fort Benton, nos Estados Unidos, o maior produtor desse mineral. No Brasil, nossas únicas reservas viáveis de bentonita se localizam no município de Campina Grande, na Paraíba.

As bentonitas são importantes por sua capacidade de inchamento, superior em até dez vezes a de uma argila refratária comum, elas dividem-se em dois grupos: sódicas e cálcicas. As bentonitas sódicas apresentam melhores propriedades para fundição que as cálcicas. Uma dessas propriedades é a variação volumétrica que é muito maior nas cálcicas.

No Brasil, não há bentonitas sódicas; apenas cálcicas. Por esse motivo, realiza-se um tratamento com algumas bentonitas cálcicas naturais, transformando-as em sódicas artificiais, que atendem bem melhor a certas exigências para uso como aglomerante. Esse tratamento consiste essencialmente na troca de cátions ligados à bentonita e se chama desativação.

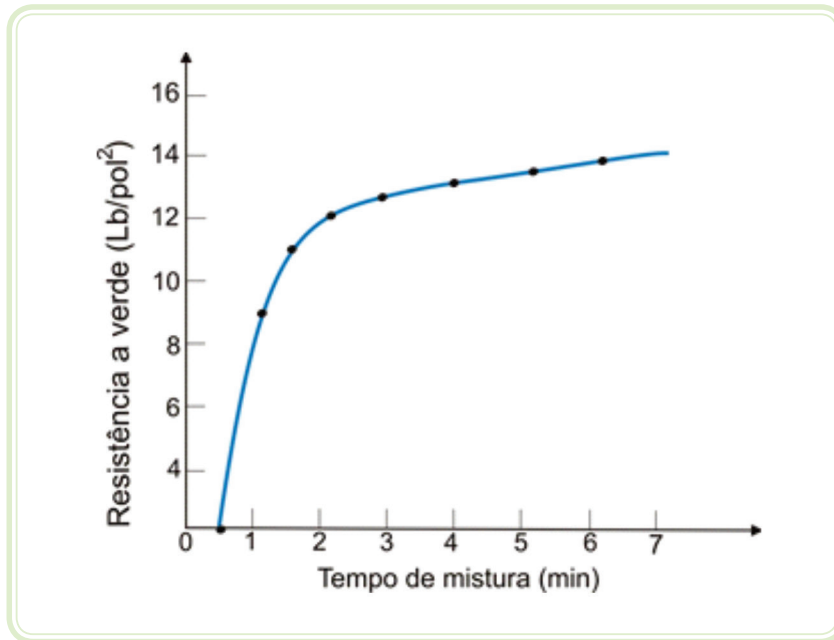
O Quadro 2.1 mostra uma comparação entre as bentonitas tipo cálcicas e sódicas no que tange a aspectos desejáveis para a indústria de fundição.

<b>Quadro 2.1: Comparação entre características das bentonitas sódicas e cálcicas interessantes para a indústria de fundição</b>	
<b>Bentonitas sódicas</b>	<b>Bentonitas cálcicas</b>
Maior inchamento	Maior facilidade de secagem da areia de moldagem
Maior contração	Maior resistência a verde
Maior capacidade de acomodação da expansão térmica da areia	Maior disponibilidade
Maior durabilidade	Menor custo
Maior plasticidade a quente	Existente no Brasil

Fonte: Doyle et al., 1978

A resistência mecânica plena não depende apenas da mistura de areia, mas do tempo de mistura. A Figura 2.7 mostra que o tempo de mistura mínimo de 2 a 4 minutos é necessário para que a areia atinja seu ponto máximo de resistência.

Outro fator que aumenta a resistência mecânica da mistura para uma mesma umidade e quantidade de aglomerante é a carga do misturador. Quanto maior a carga, menor a resistência mecânica, porque diminui a qualidade da mistura propriamente dita.



**Figura 2.7: Influência do tempo de mistura na resistência mecânica de areia**

Fonte: Doyle et al., 1978

Se a carga do misturador é menor, melhor é a mistura, embora não exista mistura perfeita.

Um dos fatores que contribuem para essa afirmação é que a carga de argila total em uma mistura se divide em dois tipos:

- **Argila efetiva** – participa da mistura como aglomerante.
- **Argila latente** – parcela da argila total que não desenvolve seu poder aglomerante.

Um aumento desta última parcela provoca redução da resistência mecânica e dificuldade na desmoldagem. Observa-se uma melhora nas propriedades da areia, à medida que aumenta o número de ciclos devido ao aumento da argila efetiva.

## 2.7 Análise dos fatores que afetam a permeabilidade das misturas de areia sintética

Sabe-se que a permeabilidade é inversamente proporcional à escoabilidade. Escoabilidade é a propriedade que a areia tem de preencher o molde.

Também sabe-se que permeabilidade depende do teor em argilas e da existência de umidade em quantidade suficiente.

Na próxima seção, serão analisadas as relações de permeabilidade e de composição da mistura e seus parâmetros com a característica geológica da areia.

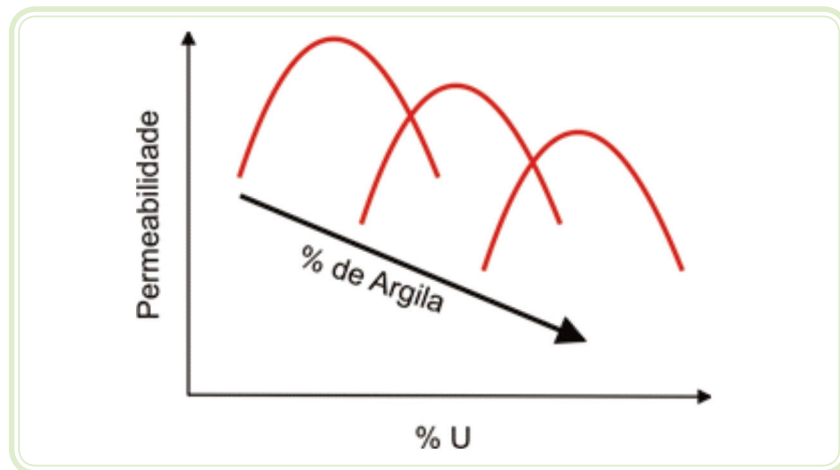
## 2.8 Composição

- Primeiro fator – teor em  $H_2O$

Quanto maior o volume de água, maior o volume intersticial. Por isso, a permeabilidade melhora com o aumento da umidade.

- Segundo fator – teor em argila

Em qualquer circunstância existe um máximo de permeabilidade em função da adição de argila, porque após este ponto a tensão superficial que mantém os interstícios se rompe, obliterando-os e, portanto, rompendo a permeabilidade. Em qualquer quantidade, o aumento do teor de argila sempre diminuirá a permeabilidade. A Figura 2.8 ilustra o processo.



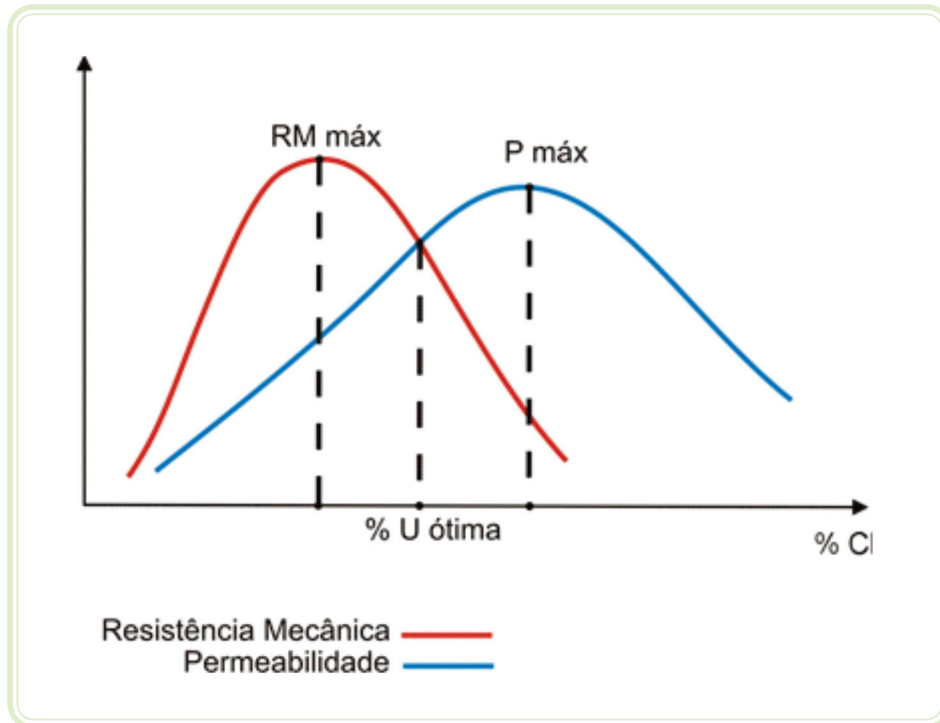
**Figura 2.8: Variação da permeabilidade em função da adição de argila**

Fonte: Encontro de fundidores, 1982

Neste caso, quanto mais argila, menor a permeabilidade.

Deve existir então um compromisso entre a permeabilidade e a resistência mecânica. O ideal é ter-se uma boa resistência mecânica e uma boa permeabilidade. Porém, uma propriedade é inversamente proporcional à outra, logo, deve haver umidade bastante para se obter o máximo das duas propriedades. A Figura 2.9 ilustra esta afirmativa.





**Figura 2.9: Determinação do ponto de umidade, resistência mecânica e permeabilidade ótima**

Fonte: Encontro de fundidores, 1982

No ponto de umidade ótima tem-se máxima resistência mecânica com mínima perda de permeabilidade.

## Resumo

Nessa aula, estudou-se a fabricação da areia artificial que servirá de material para a confecção dos moldes para fundição, levando-se em conta a forma dos grãos. Apresentaram-se os principais tipos de areia para fundição: sílica, cromita, zirconita, olivina, chamote e suas propriedades: a) moldabilidade; b) resistência mecânica; c) permeabilidade; d) difusão térmica; e) sinterização; f) dureza; g) estabilidade térmica dimensional. Viu-se que a estabilidade térmica de uma areia depende de uma série de fatores, como o tipo de areia, o tamanho, a forma e a distribuição granulométrica dos grãos; difusibilidades térmica dos moldes, temperatura de vazamento do metal, tamanho e forma da peça, tempo de vazamento, compactação do molde e da resistência mecânica e da plasticidade da areia. Foi apresentado, também, ensaios que medem as propriedades das areias sintéticas, viu-se o uso de argilas como aglomerantes e o caso especial da bentonita, dessa forma, analisou-se a influência desse aglomerante sobre as propriedades da areia.



## Atividades de aprendizagem

1. O que é areia de moldagem?
2. Cite sete propriedades da areia de moldagem e explique-as.
3. Quais são os ingredientes usados para a fabricação de uma determinada areia de moldagem?
4. Quais as areias de fundição mais comuns? Caracterize-as.
5. Quanto menor o módulo de finura de uma areia, maior a sua resistência à compressão a verde. Por quê?
6. Por que a permeabilidade da areia é um fator importante na qualidade das areias de fundição?
7. Qual é o efeito do tempo de mistura na resistência mecânica de areias de moldagem?
8. Por que a permeabilidade melhora com o aumento da umidade?
9. Explique o efeito da umidade e do teor de argila sobre a permeabilidade.
10. Quanto maior o teor de argila aglomerante, menor a permeabilidade. Por quê?
11. O que é bentonita?
12. Cite cinco ensaios de laboratório que medem as propriedades da areia de fundição.
13. O que é ponto de umidade ótimo? Por que ele ocorre?

# Aula 3 – Aditivos

## Objetivos

Demonstrar as relações entre qualidade de areia obtida e o uso de aditivos.

Visualizar os aspectos positivos e negativos do uso de aditivos.

Mostrar os limites práticos no uso de aditivos.

## 3.1 Função dos aditivos

Os aditivos são adicionados à mistura para que se obtenham propriedades especiais ou melhorem as existentes. Os principais aditivos usados em fundição de areias aglomeradas com argila são o pó de madeira, o pó de carvão, o óxido de ferro e as dextrinas.

### 3.1.1 Pó de madeira

O pó de madeira é adicionado às misturas de areia para combater o efeito da dilatação volumétrica, conferindo maior estabilidade à mistura. Quando o pó de madeira se queima devido ao calor liberado pelo metal líquido, vai liberando espaços livres.

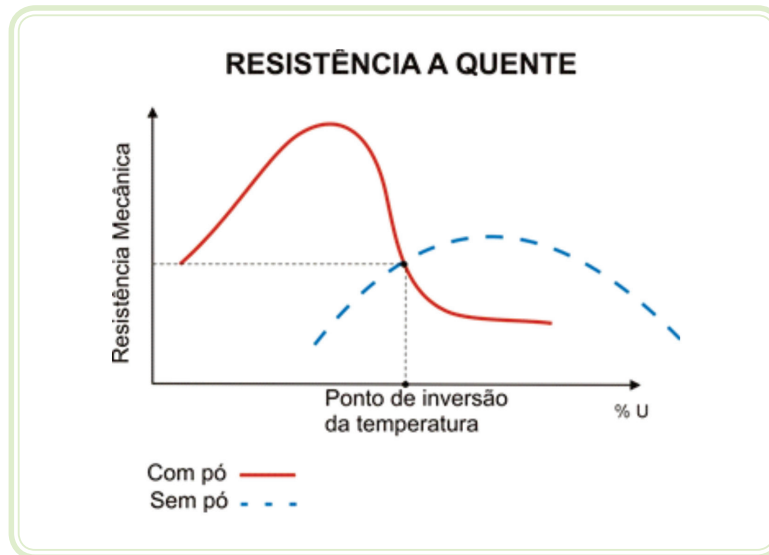
### 3.1.2 Pó de carvão

O pó de carvão queima-se da mesma forma que o aditivo anterior, mas por ter um tamanho bem menor, adiciona-se pó de carvão para obter-se aumento da permeabilidade, já que à medida que se queima o pó de carvão liberam-se espaços e porosidades por onde podem passar os gases.

O pó de carvão, ao aumentar a porosidade da areia, indiretamente, diminui a difusibilidade térmica da areia. As areias de zirconita são as que possuem maior difusibilidade térmica.

A Figura 3.1 mostra o efeito sobre a resistência mecânica, quando se adiciona pó de carvão vegetal. No caso específico da adição de pó de carvão, existe o fenômeno do ponto de inversão da temperatura. Nesse ponto, a permeabili-

dade passa a ser prejudicada pela adição de pó de carvão, isto é, diminui em relação à mistura sem aditivos, como ilustra a Figura 3.1.

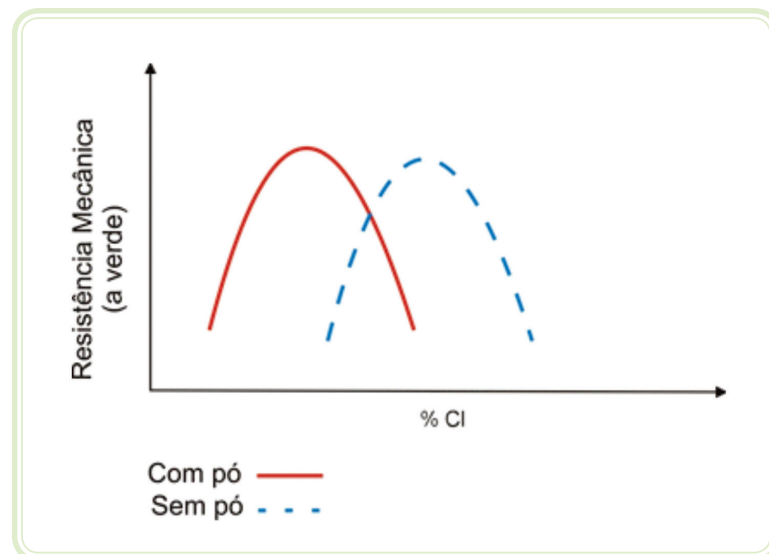


**Figura 3.1: Efeito da adição de pó de carvão sobre a resistência a quente**

Fonte: Encontro de fundidores, 1982

Já o pó de madeira tem um efeito mais discreto, fazendo com que se obtenha uma resistência mecânica equivalente com um teor de umidade ligeiramente menor, como ilustra a Figura 3.2.

Observe o ponto de inversão de temperatura quando a resistência mecânica a quente fica menor, sem adição de pó de carvão.



**Figura 3.2: Efeito da adição de pó de madeira sobre a resistência mecânica a verde de misturas de areias aglomeradas com bentonita**

Fonte: Encontro de fundidores, 1982

### 3.1.3 Óxidos de ferro

A adição de óxidos de ferro como pó de hematita, carepa, tem o efeito de aumentar a resistência à quente. Porém, esse efeito é proporcional ao número de pontos de contato dos grãos de areia. Isso significa, que se o grão for angular o efeito será menor do que se os grãos forem redondos, porque nestes o número de pontos de contato é maior.

### 3.1.4 Dextrinas

Dextrinas ou quaisquer outros cereais têm efeito similar ao do pó de madeira, entrando em combustão durante o vazamento de metal líquido, aumentando os espaços livres, prevenindo a dilatação.

## Resumo

Nessa aula foi, estudado, exclusivamente, as funções dos aditivos que podem ser empregados na confecção de areia de moldagem e suas respectivas propriedades.

## Atividades de aprendizagem

1. Quais são as funções dos aditivos na fabricação da areia de moldagem?
2. Cite os aditivos mais empregados e a função de cada um.
3. Com relação à adição de pó de carvão vegetal, explique o que é o fenômeno da inversão de temperatura.
4. Por que se adiciona pó de carvão à areia de moldagem de zirconita?





# Aula 4 – Fusão de metais na fundição

## Objetivos

Nomear os principais equipamentos de fusão de metais em fundição.

Diferenciar a aplicabilidade dos diferentes equipamentos.

Entender os mecanismos da operação dos equipamentos.

Calcular as cargas para os diferentes equipamentos de fusão.

## 4.1 Equipamentos de fusão

Os principais equipamentos para fusão de metais na fundição são o forno elétrico de indução, o forno elétrico a arco, o forno a cadinho e o forno cubilot, na ordem inversa de escala de produção.

Cada um destes equipamentos tem uma aplicabilidade industrial específica. Esta aplicabilidade depende da escala de produção e do controle metalúrgico do processo.

Assim, o forno elétrico a arco é o equipamento de fusão mais adequado quando se deseja altas taxas de produção associado a elevado controle metalúrgico do processo. Este controle pode chegar a níveis bem mais elevados se empregarmos equipamentos de fusão a vácuo, como veremos mais tarde.

O forno elétrico a indução é o estado da arte em termos de controle metalúrgico e escala de produção, sendo o equipamento mais caro em termos de custo por tonelada fundida. Pode ser adquirido em grandes unidades que elevam bastante sua capacidade de produção. Grandes corporações de fundição como a METSO em Sorocaba-SP, a FIAT em Betim-MG, entre outras tantas, utilizam-se exclusivamente deste equipamento para produzir suas ligas fundidas a altas taxas de produção em toneladas/hora, com elevado controle metalúrgico.

Nestes últimos, pode-se aumentar imensamente o controle metalúrgico agregando-lhes os dispositivos de fusão a vácuo, já citados. Esta configuração

coloca este equipamento no topo do controle metalúrgico e, conseqüentemente, em alto grau de pureza e qualidade das ligas fundidas.

Uma variação do forno elétrico a indução é o forno de indução a canal, que além das características citadas acima, nos propiciará a melhor homogeneidade do metal líquido dentre todos os equipamentos analisados.

Por exemplo, a Fundição Magotteaux, em Contagem - MG, é uma empresa voltada à produção de corpos moedores e revestimentos para moinhos, fundidos em ligas com altos teores de carbono, cromo, manganês, além de outros elementos. Toda a sua capacidade de fusão é fornecida por fornos elétricos. Seu parque de fusão é composto de:

**a)** Um forno a arco:

- Capacidade nominal de 6000 kg e capacidade efetiva de 5000 kg.
- Potência aparente 2760 kW a uma carga de 7600 A.
- Diâmetro dos eletrodos de 8 polegadas.
- A refrigeração era feita com água a vazão de 20 m<sup>3</sup>/h e pressão de 3 kg/cm<sup>2</sup>.

**b)** Dois fornos a indução:

- Capacidade por corrida de 1500 kg, com taxa de produção de 1810 kg/h.
- Potência de 1000 kW.
- O consumo energético é de 502 kWh/t para fusão de ferro fundido cinzento e 552 kWh/t para fusão de aço.

**c)** Um forno de indução a canal para homogeneização e sobre aquecimento:

- Capacidade máxima de 9600 kg, e capacidade útil de 6000 kg.
- Taxa de aquecimento de 10°C/min.

Mas a energia elétrica nem sempre está disponível nas quantidades requeridas para operar uma fundição. Neste caso, podemos recorrer ao forno cubilot.



Neste, principalmente se operado com ar quente, também se pode atingir altas taxas de produção e razoável controle metalúrgico. Hoje, existe uma grande tendência de substituição destes fornos, pelos fornos elétricos. Foi o que aconteceu com os fornos cubilot da Fundação Barbará em Barra Mansa - RJ, voltada para a produção de tubos de ferro fundido por centrifugação, ainda nos anos 80 e com as fundições Aldebarã em Itaúna - MG, voltadas à produção de tubos e conexões em ferro fundido cinzento e nodular. Hoje em dia esta tendência se confirma principalmente pelas restrições ao uso de coque com elevado percentual de enxofre. Este é de fato o grande inconveniente do forno cubilot, utiliza-se de apenas o coque como combustível. Contudo, é um equipamento ainda bastante usado em fundições pequenas e médias localizadas nos estados do Pará, mais especificamente na região de Marabá e no Maranhão, na região de Açailândia e Imperatriz. Estas empresas são voltadas, principalmente, à produção de lingoteiras para a indústria de gusa que opera fortemente nas regiões sul destes estados. Então, devem ser estudados com mais cuidado e detalhe.

Nos fornos de cadinho tem-se os mais baixos controles metalúrgicos e taxas de produção, mas são os ideais para laboratórios e pequenas fundições, razão pelas quais devem ser estudados em profundidade.

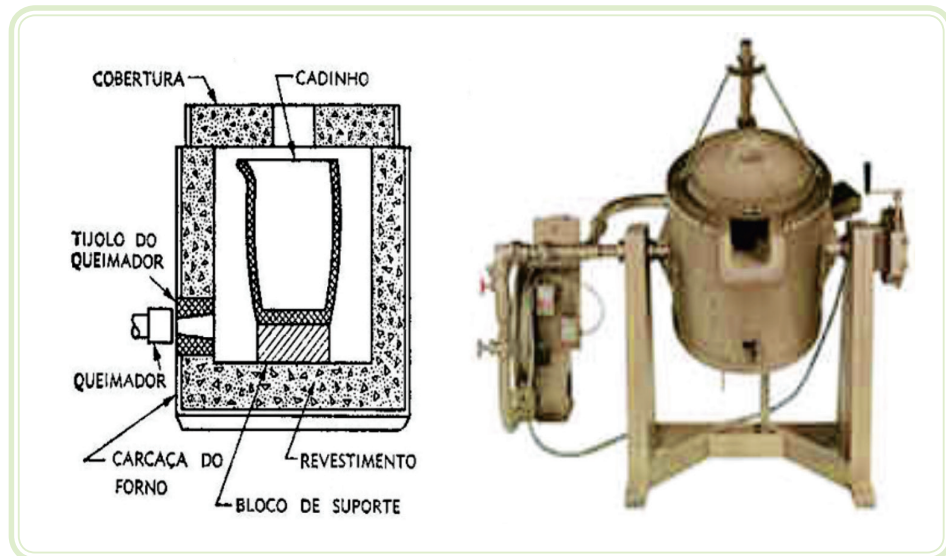
## 4.2 Fornos de cadinho

Utilizados em pequenos empreendimentos como fábricas de painéis de alumínio, laboratórios destinados a fundir ligas não ferrosas de baixo ponto de fusão e em fundições de peças de reposição para indústria pesqueira artesanal, estes fornos são empregados na fundição de ligas não ferrosas tais como chumbo, alumínio, bronze, etc. Caracterizam-se por uma forma cilíndrica, revestidos, na parte externa, por chapas metálicas. Para o problema de fusão em pequena escala, é uma solução simples e barata. Num empreendimento de pequena escala, será sempre a primeira opção.

As razões para essa preferência são a versatilidade em termos de produtividade, que varia apenas com a mudança do tamanho do cadinho. Dessa forma, podem-se fundir de pequenas a médias quantidades, alterando a escala de produção, simplesmente mudando o cadinho.

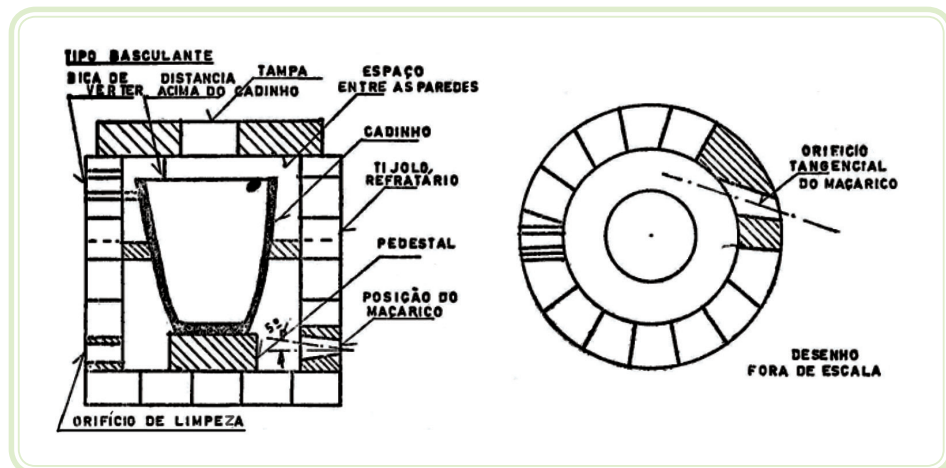
Outra vantagem é a versatilidade no uso de combustíveis, ele é capaz de queimar diferentes combustíveis como óleo queimado, gás liquefeito, óleo diesel e até óleo de cozinha. A Figura 4.1, mostra um destes fornos. A Figura 4.2 dá

um esquema construtivo, mais detalhado, onde se vê a orientação tangencial e o ângulo de ataque do maçarico bem como os tijolos refratários circulares. O interior destes fornos deve ser perfeitamente circular a fim de permitir uma distribuição uniforme de calor. No interior do revestimento refratário, observa-se o cadinho, comumente feito em grafite, ou, em casos especiais, de carbureto de silício, no qual se deposita o material que se deseja fundir.



**Figura 4.1: Esquema e foto de um forno a cadinho**

Fonte: Doyle et al., 1978

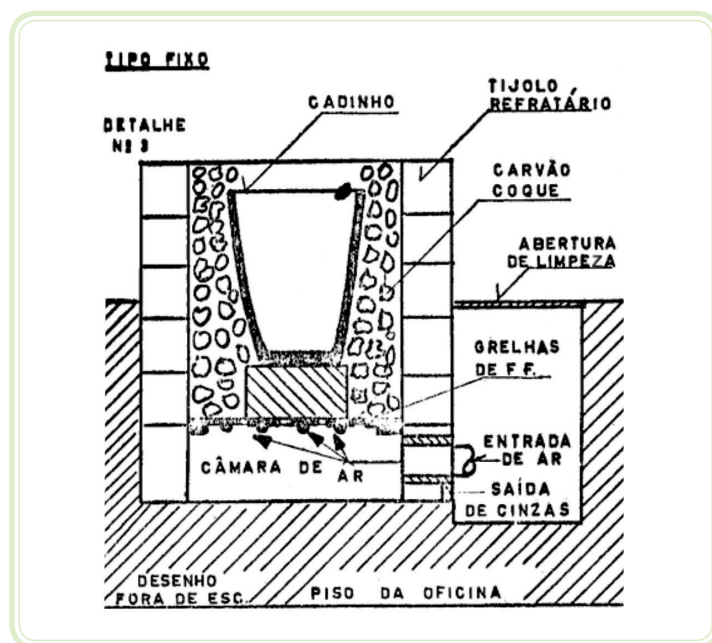


**Figura 4.2: Esquema construtivo de um forno a cadinho giratório**

Fonte: Doyle et al., 1978

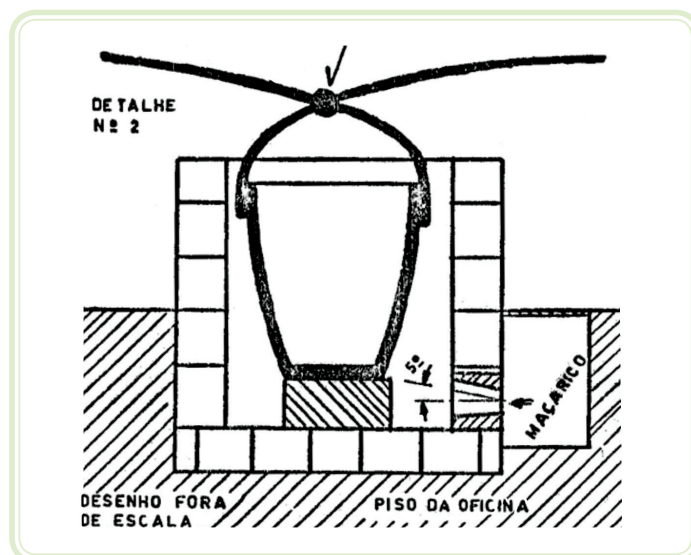
Além do forno a cadinho com movimento basculante, também existem os fornos a cadinho do tipo fixo, ainda mais baratos. A Figura 4.3 mostra um esquema de um destes equipamentos. Os fornos fixos são ainda mais comuns em pequenas indústrias pela facilidade de construção quando se abre mão do

movimento giratório. O combustível destes fornos fixos pode ser o óleo diesel, como os giratórios, ou carvão coque ou vegetal, sendo estes combustíveis sólidos os mais usados nos fornos fixos. O uso do combustível sólido induzirá a um grande aumento das dimensões das paredes do forno pois o cadinho terá de ser mantido circundado por uma coluna de carvão incandescente enquanto opera. Quando o material estiver fundido e na temperatura de vazamento, o cadinho será extraído com o uso de um garfo especial, conforme mostrado na Figura 4.4.



**Figura 4.3: Esquema construtivo de um forno a cadinho fixo**

Fonte: Doyle et al., 1978



**Figura 4.4: Esquema de retirada do cadinho de um forno a cadinho fixo**

Fonte: Doyle et al., 1978

Na base interna destes fornos encontra-se, exatamente no centro, o pedestal, onde assenta o cadinho. Este pedestal deve ser constantemente examinado, para evitar, em caso de desgaste ou trinca, rachaduras do cadinho, por falta de apoio completo, durante a fusão.

Os tijolos refratários devem ser mantidos bem ajustados na forma circular do forno, para que não produzam rachaduras ou formação de irregularidades na parte interna, as quais podem produzir, em primeira instância, perda de calor. Em um segundo momento, a incidência da chama com maior intensidade em determinados pontos do cadinho, causando a sua queima desigual, diminuindo consideravelmente a vida útil do cadinho.

Logo, acima da base refratária do forno, em sentido contrário à bica de descarga do material, situa-se, geralmente, o orifício de passagem da chama do maçarico para o interior do forno, em posição tangencial, como já dito. Isto, no caso de o forno possuir apenas um maçarico. Se existirem dois ou mais maçaricos, distribuem-se a mesma distância entre si, mas podem situar-se a diferentes alturas. Devem, contudo, ser montados de forma que sua linha de centro coincida com a meia distância entre a parede do forno e a parede do cadinho e inclinado para cima mais ou menos 5°.

No maçarico se dá o encontro do ar com o óleo diesel, para a pulverização. Quando aceso, tem-se a chama circulando nas paredes internas do forno e externas do cadinho. Quando há queima completa do combustível, tem-se uma chama dita neutra e uma queima dita estequiométrica. Dificilmente isso acontece na prática, pois o máximo que se consegue controlar é a queima com excesso de ar ou com excesso de combustível. Quando tem-se excesso de ar a chama é dita oxidante. Quando temos falta de ar ou excesso de combustível, temos uma chama dita redutora. A chama oxidante é a mais recomendada para fornos de não ferrosos. Distingue-se a chama oxidante quando a cor é brilhante, de cor verde amarelada. A chama redutora, por sua vez, aparece com uma coloração amarelo palha e com a presença de fumaça preta e densa. Uma chama redutora implica em desperdício de combustível e maior impacto ambiental. Por outro lado, a chama oxidante tem mais ar do que o necessário, elevando a quantidade de gases que saem de dentro do forno, diminuindo a temperatura de chama e conseqüentemente aumentando o consumo de combustível.

A pressão do ar para combustão é fornecida por um motor elétrico de elevada rotação afixado em um dos lados do forno. O ar é conduzido ao maçarico por tubulações. A pressão do ar é ajustada por um controle manual.

Nos fornos em que o combustível é óleo diesel, existe um depósito para esse óleo, instalado em posição elevada em relação ao forno, a fim de se conseguir a pressão desejada de combustível no maçarico.

## Resumo

Nessa aula, estudou-se os principais equipamentos para a fusão de metais na fundição. Foram citados o forno elétrico a arco, forno elétrico a cadinho, forno elétrico a canal, forno cubilot e forno a cadinho. Este último, discutiu-se com mais detalhes. Foi ressaltado a sua utilização na indústria artesanal e em laboratórios e também sua grande versatilidade, permitindo o uso de combustíveis sólidos como o carvão. Assim, conforme o estudo, uma grande importância foi dada ao controle da chama nos fornos.

## Atividades de aprendizagem



1. Quais são os principais equipamentos para fusão de metais na fundição?
2. No mercado industrial, qual é a melhor aplicabilidade? Justifique.
3. Quais as vantagens de um forno a cadinho?
4. Por que as paredes de um forno a cadinho devem ser perfeitamente circulares?
5. Quais as desvantagens da chama redutora?
6. O que é uma queima estequiométrica e que tipo de chama ela produz?
7. Por que não utilizamos a chama neutra?
8. Quais as desvantagens da chama oxidante?
9. Como se consegue a pressão de ar para combustão?



# Aula 5 – Fornos cubilot

## Objetivos

Identificar a correta operação de fornos cubilot.

### 5.1 Aspectos gerais

O forno cubilot é o equipamento mais utilizado em fundições pela sua produtividade, versatilidade e pelo baixo custo de implantação.

Em ordem de complexidade, o segundo equipamento de fusão mais popular é o forno cubilot. O forno cubilot é um sistema simples e econômico para fundir gusa e sucata de ferro. Ele é essencialmente um forno vertical, cercado por aço e revestido por refratário. A Figura 5.1 mostra um desses equipamentos montado numa instituição de pesquisa.

Os fornos cubilot são um sistema mais industrial que os fornos a cadinho. Podem ser fabricados de muitos tamanhos: de 1,2 m a 2,8 m de diâmetro externo e podem variar de 1 a 3 m de altura. Eles podem produzir de 5 a 25 t/h. Um cubilot deve ser preparado e aquecido cuidadosamente para evitar danos. O revestimento é reparado ou substituído quando necessário, e as portas do fundo são fechadas. Uma camada de areia em declive para o furo de vazamento é socada sobre o fundo.

**Combustível** – a proporção em peso entre metal e combustível varia de 8:1 até 12:1. No limite inferior economiza-se em combustível, mas perde-se em produção pelo maior tempo para fundir a carga.

**Fundentes** – utiliza-se para auxiliar na formação de escória a fim de remover as impurezas e retardar a oxidação do metal. O fundente mais comum é o calcário, mas pode-se usar o carbonato de sódio e/ou fluorita, dependendo da disponibilidade.

## 5.2 Cálculos de carga do cubilot

O cubilot pouco contribui para refinar o metal. A composição final do metal fundido é em função da carga inicial. As proporções dos metais colocados no cubilot devem ser calculadas com cuidado a fim de assegurar um produto uniforme e previsível. Esses cálculos são baseados no conhecimento das quantidades de carbono, silício, manganês, fósforo e enxofre no ferro gusa, na sucata e na natureza das reações que têm lugar no cubilot.



**Figura 5.1: Forno cubilot**

Fonte: Autor

Para fundir 1500 kg de metal, as matérias-primas disponíveis são enumeradas na Tabela 5.1 com suas respectivas análises.

Tabela 5.1: Composições de alguns metais típicos para fusão em cubilot (%)					
Metal	C	Si	Mn	P	S
Ferro gusa I	3,5	2,5	0,72	0,18	0,016
Ferro gusa II	3,5	3,0	0,63	0,20	0,018
Sucata	3,4	2,3	0,50	0,20	0,030
Retorno	3,3	2,5	0,65	0,17	0,035
Coque	90	-	-	-	0,500

Fonte: Doyle et al., 1978

Com base nos custos de cada um dos componentes da carga, a mistura de menor custo é composta de 10 % de gusa I, 20 % de gusa II, 30 % de sucata de ferro e 40 % de retorno. A quantidade esperada de cada elemento no produto pode ser acertada com base nas reações no cubilot.



Premissas válidas quando se calcula uma carga para cubilot:

- a) A quantidade de carbono no ferro permanece basicamente a mesma. Ainda que alguma quantidade de C seja oxidada durante o processo, parte equivalente é absorvida da carga de combustível durante o processo de fusão.
- b) O teor de silício deve ser reduzido em 10 % por oxidação.
- c) O teor de Mn deve ser reduzido em 20 % por oxidação.
- d) As perdas em P no cubilot são desprezíveis.
- e) O Fe quase não perde S na fusão, mas absorve aproximadamente 4 % do S do coque.
- f) A relação Fe/coque é de 8:1, e o teor de S no coque é de 0,50 %.

Passo I – cálculo da composição final do ferro fundido obtido no forno cubilot, através do balanço de massa de cada elemento.

## 5.3 Balanço de carbono

Tabela 5.2: Balanço de carbono		
Gusa I	$1500 \text{ kg} \times 10 \% \times 3,5 \% =$	5,25 kg
Gusa II	$1500 \text{ kg} \times 20 \% \times 3,0 \% =$	10,5 kg
Sucatas de ferro	$1500 \text{ kg} \times 30 \% \times 3,4 \% =$	15,3 kg
Retorno	$1500 \text{ kg} \times 40 \% \times 3,3 \% =$	19,8 kg
Total		50,85 kg

Fonte: Autor

Logo, a porcentagem final de carbono:

Equação 5.1

$$\frac{50,85}{1500} \times 100 \% = 3,39 \%$$

## 5.4 Balanço de silício

A quantidade de Si será reduzida em 10 % por oxidação.

Tabela 5.3: Balanço de silício		
Gusa I	$1500 \text{ kg} \times 10 \% \times 2,5 \% =$	3,75 kg
Gusa II	$1500 \text{ kg} \times 20 \% \times 3,0 \% =$	9,00 kg
Sucatas de ferro	$1500 \text{ kg} \times 30 \% \times 2,3 \% =$	10,35 kg
Retorno	$1500 \text{ kg} \times 40 \% \times 2,5 \% =$	15,00 kg
Subtotal		38,10 kg
Perda por oxidação	$38,10 \times 10 \%$	-3,81 kg
Total		34,29 kg

Fonte: Autor

Logo, a composição em silício no produto será de:

Equação 5.2

$$\frac{34,29}{1500} \times 100 \% = 2,29 \%$$

## 5.5 Balanço de manganês

O teor em Mn deve ser reduzido em 20 % por oxidação.

Tabela 5.4: Balanço de manganês		
Gusa I	$1500 \text{ kg} \times 10 \% \times 0,72 \% =$	1,085 kg
Gusa II	$1500 \text{ kg} \times 20 \% \times 0,63 \% =$	1,89 kg
Sucatas de ferro	$1500 \text{ kg} \times 30 \% \times 0,50 \% =$	2,25 kg
Retorno	$1500 \text{ kg} \times 40 \% \times 0,65 \% =$	3,90 kg
Subtotal		9,12 kg
Perda por oxidação	$9,12 \times 20 \%$	-1,82 kg
Total		7,29 kg

Fonte: Autor

Logo, a composição em Mn no produto será de:

Equação 5.3

$$\frac{7,29}{1500} \times 100 \% = 0,49 \%$$

## 5.6 Balanço de fósforo

Tabela 5.5: Balanço de fósforo

Gusa I	$1500 \text{ kg} \times 10 \% \times 0,18 \% =$	0,27 kg
Gusa II	$1500 \text{ kg} \times 20 \% \times 0,20 \% =$	0,60 kg
Sucatas de ferro	$1500 \text{ kg} \times 30 \% \times 0,20 \% =$	0,90 kg
Retorno	$1500 \text{ kg} \times 40 \% \times 0,17 \% =$	1,02 kg
Total		2,79 kg

Fonte: Autor

Logo, a composição em P no produto será de:

Equação 5.4

$$\frac{2,79}{1500} \times 100 \% = 0,19 \%$$

## 5.7 Balanço de enxofre

O ferro quase não perde enxofre na fusão num forno cubilot, mas absorve aproximadamente 4 % do enxofre do coque, o que significa que tem-se primeiramente que determinar o consumo específico de combustível.

Digamos que este equipamento tem uma relação de 8:1. Ou seja, 8 vezes mais ferro do que coque. Logo, para fundirmos uma carga de 1500 kg precisaríamos de  $1500/8 = 187,5$  kg de coque.

Logo, temos um aporte de S vindo do coque igual a:  $187,5 \text{ kg} \times 0,50 \% \times 4 \% = 0,0375 \text{ kg}$ .

Tabela 5.6: Balanço de enxofre

Gusa I	$1500 \text{ kg} \times 10 \% \times 0,016 \% =$	0,024 kg
Gusa II	$1500 \text{ kg} \times 20 \% \times 0,018 \% =$	0,054 kg
Sucatas de ferro	$1500 \text{ kg} \times 30 \% \times 0,030 \% =$	0,135 kg
Retorno	$1500 \text{ kg} \times 40 \% \times 0,035 \% =$	0,210 kg
Subtotal		0,423 kg
Trazido pelo coque		+0,0375 kg
Total		0,4605 kg

Fonte: Autor

Logo, a composição em S no produto será de:

Equação 5.5

$$\frac{0,4605}{1500} \times 100 \% = 0,03 \%$$

## Resumo

Nessa aula, estudou-se as características e utilizações dos fornos cubilot. Também aprendemos a calcular a carga do cubilot, com base no conhecimento das quantidades de carbono, silício, manganês, fósforo e enxofre no ferro gusa, na sucata e na natureza das reações que tem lugar no cubilot. Aplicou-se uma ferramenta que será da maior utilidade na carreira do técnico em metalurgia, ou seja, o balanço de massa. Esta maneira de calcular a carga é comum a qualquer equipamento de fusão e não só ao forno cubilot. No exemplo dado o teor de S calculado é de 0,03 %. Se o teor máximo admissível fosse inferior a este valor, teríamos de propor uma nova composição da carga, diminuindo-se as quantidades de retorno e sucata de ferro, já que elas tem maior teor de S ao mesmo tempo em que se aumenta as quantidades de gusa I e gusa II porque estes tem menor quantidade de S.



## Atividades de aprendizagem

1. Por que os fornos cubilot já foram o equipamento mais utilizado em fundições e porque está sendo substituído por outros equipamentos de fundição?
2. Cite as características dos fornos cubilot, destacando suas vantagens e desvantagens.
3. Por que as proporções dos metais colocados no cubilot devem ser calculadas? Esses cálculos são baseados em quê?
4. Que premissas são válidas quando se calcula uma carga para cubilot?
5. Por que o ferro quase não perde enxofre na fusão num forno cubilot?
6. Como se determina o consumo específico de combustível?
7. Suponha que o teor de S máximo admissível é 0,02 %. Proponha uma nova carga para produção de 1500 kg de metal.

# Aula 6 – Fornos de indução

## Objetivos

Oferecer instrumentalização teórica necessária para a eficiente operação de fornos à indução em cadinho.

Oferecer instrumentalização para operação de fornos à indução em canal.

Oferecer ferramental para operação de fornos elétrico a arco.

## 6.1 Fusão em fornos a indução

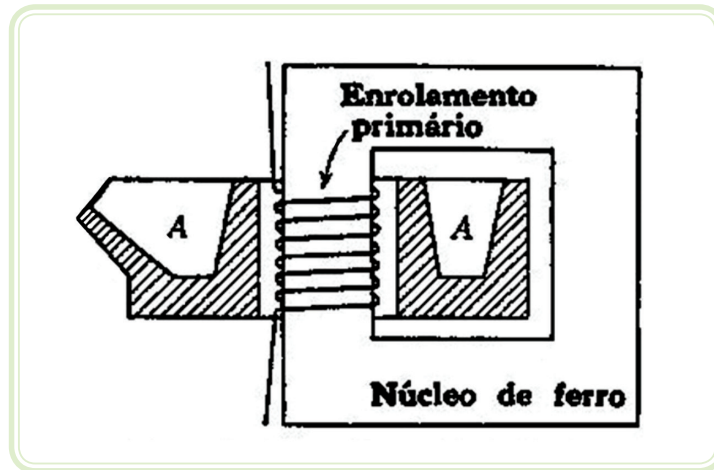
O funcionamento dos fornos de indução baseia-se na indução eletromagnética. Um condutor elétrico submetido a um fluxo magnético variável, produz uma f.e.m. tanto quanto maior for a variação  $\Delta\Phi$  do fluxo:

Equação 6.1

$$e = \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

Para que a variação do fluxo no tempo seja grande, é preciso que o fluxo  $\Phi$  seja elevado e/ou que o tempo de variação  $\Delta t$  seja pequeno. Esta última condição corresponde a uma frequência elevada.

O forno a indução é muito usado para fusão de materiais condutores. Em tais materiais formam-se correntes de Foucault (correntes induzidas em massas metálicas), que produzem grande elevação de temperatura. Se os materiais forem magnéticos, haverá também o fenômeno da histerese que contribui para o aumento de temperatura. O forno consiste basicamente num transformador com o próprio forno sendo o secundário do transformador, constituído apenas por uma espira. A Figura 6.1 mostra o esquema elétrico de um forno a indução.

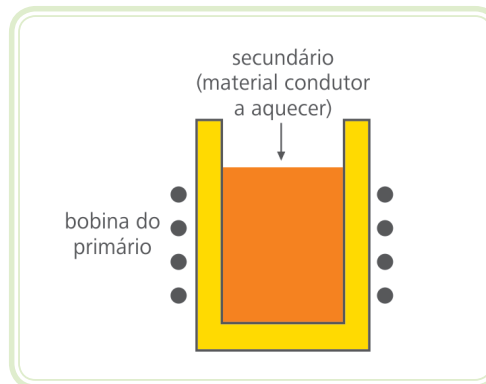


**Figura 6.1: Esquema elétrico de um forno à indução**

Fonte: Gray; Wallace, 1976

É constituído por um transformador com núcleo de ferro e pode ser usado para a frequência da rede.

Outros tipos não utilizam núcleo de ferro e podem ser usados para frequências mais altas. A Figura 6.2 ilustra esse tipo de forno.



**Figura 6.2: Esquema de um forno elétrico a indução sem núcleo de ferro**

Fonte: CTISM, adaptado do autor

Os fornos sem núcleo podem utilizar frequências desde 50 Hz a 1 kHz ou mais. Para frequências baixas, usam-se transformadores para alimentar os fornos. Já para frequências médias, usam-se na alimentação conjuntos motor/gerador ou circuitos eletrônicos estáticos.

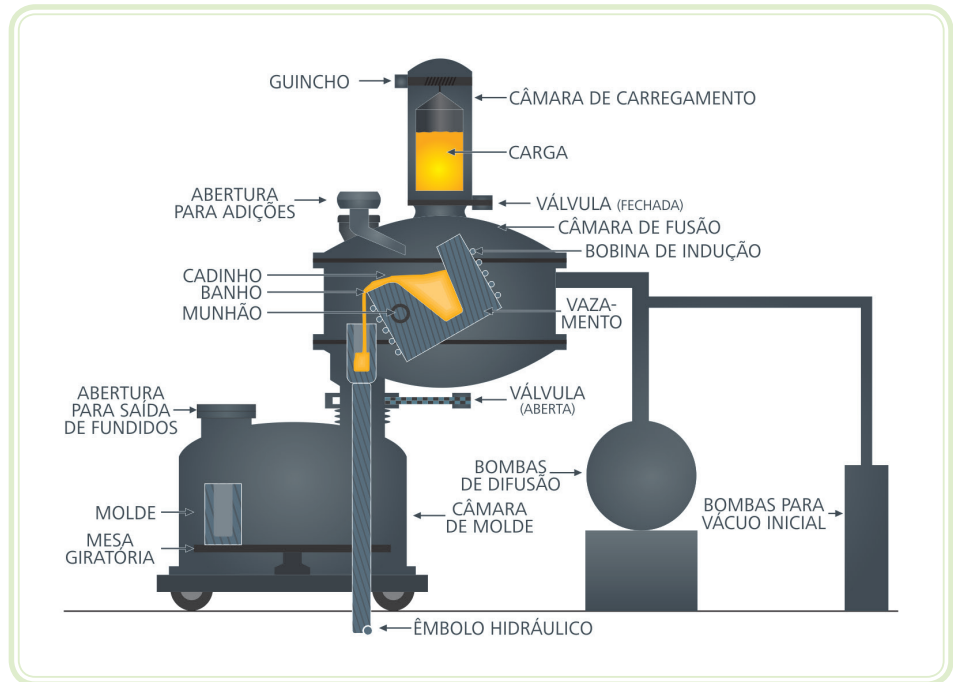
A versatilidade desse equipamento o torna preferido pelas grandes fundições. Assim, um nível de sofisticação bem elevado pode ser empregado com esse dispositivo, como mostra a Figura 6.3. Ai pode-se ver um forno elétrico de indução acoplado ao mecanismo de fusão a vácuo. O vácuo é o melhor sistema para se eliminar impurezas gasosas do seio do banho líquido, num

processo conhecido como degaseificação. Neste processo, o metal é fundido por processos convencionais, ao ar. O vácuo não necessita ser extremamente alto para retirar proporções substanciais de hidrogênio e de outros gases.

A fusão a vácuo é, principalmente, necessária para fundir metais e ligas que sejam reativas demais com oxigênio e com outros gases, para serem fundidas totalmente no ar. O urânio e o titânio, por exemplo, podem ser efetivamente fundidos apenas no vácuo. Além disso, a fusão a vácuo melhora as propriedades dos metais.

Matérias-primas de boa qualidade são naturalmente necessárias para um produto de qualidade superior. Os metais fundidos e vazados sob vácuo podem ser mantidos puros, porque eles não estão expostos à nova contaminação e podem ser purificados ainda mais porque gases são retirados deles. Nenhum desoxidante como o manganês e ou silício são necessários e nenhuma escória é formada. Na fusão a vácuo, quantidades precisas de carbono puro ou hidrogênio podem ser adicionadas para reduzir óxidos. À medida que os gases são gerados, eles são extraídos por bombas, permitindo que as reações se completem. A adição de elementos altamente reativos ao oxigênio, como o zircônio, o titânio, o alumínio, etc., podem ter sua adição retardada até que o teor de gases no banho tenha sido esgotado para efeitos práticos. Aços fundidos a vácuo terão um teor de oxigênio da ordem de 3 a 20 ppm. Isso é aproximadamente 1/20 da proporção existente em um aço fundido ao ar.

Metais puros e limpos são substancialmente mais fortes, mais dúcteis e mais resistentes à corrosão. Por exemplo, a resistência ao impacto, pelo ensaio Charpy, à temperatura ambiente, para um aço inoxidável fundido a vácuo apresenta um valor de 298 J. Compare-se com o valor de 11 J para o mesmo aço fundido pelo processo convencional, ao ar. Os benefícios foram particularmente significativos para ligas novas, à alta temperatura, tais como ligas de níquel e de cobalto.



**Figura 6.3: Sistema de forno de indução acoplado a sistema de depuração a vácuo**

Fonte: CTISM, adaptado de Doyle et al., 1978

A fusão a vácuo é especialmente indicada para produtos como lâminas de turbina, mancais, peças de queimadores e aços de ferramenta de alta qualidade.

De maneira muito particular, o processo de fundição a vácuo é importante para o desenvolvimento da indústria do cobre, pois no projeto da Unidade Hidrometalúrgica do Cobre (UHC) para produção de cobre primário, na planta de Sossego, da VALE em Canãa dos Carajás, o minério de cobre é atacado por ácido sulfúrico em atmosfera de oxigênio puro. Neste caso, não se usam em nenhuma hipótese válvulas ou equipamentos de aço, pois ele não resistiria ao ataque ácido. O material indicado é o titânio. Este tipo de material só pode ser obtido em fundições a vácuo.

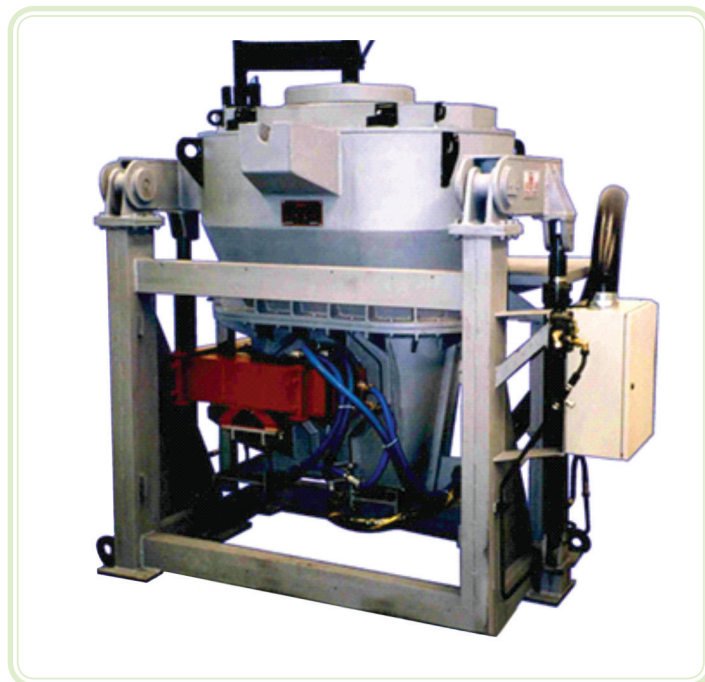
## 6.2 Fornos de indução a canal

Os fornos de indução a canal se dividem em três tipos principais:

- a) Forno de indução a canal vertical com bacia única.
- b) Forno de indução a canal com dupla bacia.
- c) Forno de indução a canal de baixa frequência.



O forno de Indução a canal vertical atinge baixas temperaturas e, por isso, é mais utilizado para fusão de metais não ferrosos. A Figura 6.4 ilustra um equipamento desse tipo.



**Figura 6.4: Forno de indução a canal vertical**

Fonte: Autor

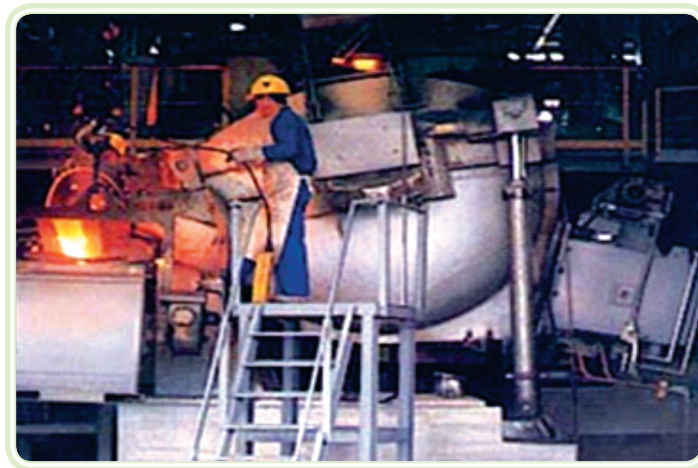
Os fornos de indução a canal tipo dupla bacia permitem dosar a carga e a descarga, podendo ter carregamento e vazamento contínuos, ininterruptamente. Os fornos de indução desse tipo operam em baixas frequências e apresentam alto custo, pequena capacidade de produção, alto grau de homogeneização e controle operacional.

Por isso, estes tipos de fornos são ideais para pequenas e sofisticadas operações, tais como fundições de precisão e centros de pesquisa. A Figura 6.5 mostra um equipamento deste tipo.



**Figura 6.5: Modelo de forno de indução a canal de baixa frequência com dupla bacia**  
Fonte: Autor

Os fornos de indução a canal, para sobreaquecimento e espera de ferro, podem, operar em duplex com fornos cubilot e/ou outros tipos de fornos, proporcionando sensível redução de custos de fusão e melhor qualidade de fundidos. Além disso, proporcionam baixas perdas térmicas e metálicas e permitem suprir o vazamento mesmo em horários de ponta, com baixo consumo energético. A Figura 6.6 mostra um forno de indução a canal de baixa frequência.



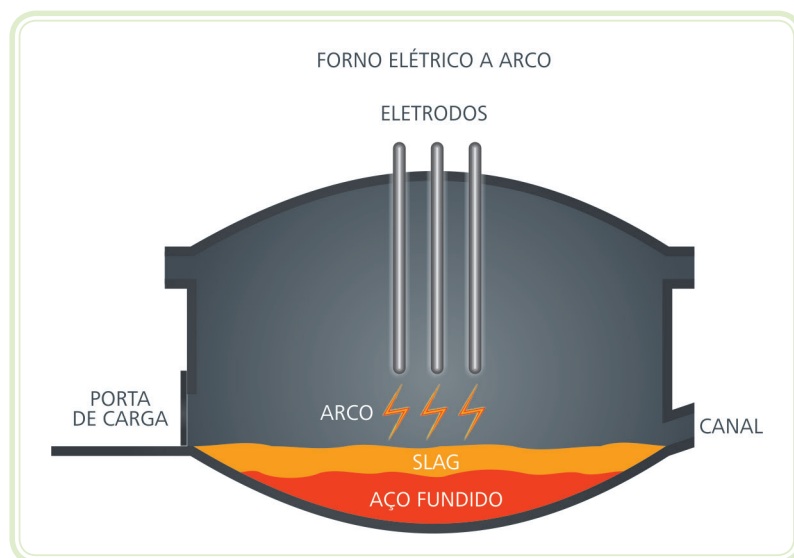
**Figura 6.6: Forno de indução a canal horizontal de baixa frequência para fundições de ferro e aço**  
Fonte: Autor

### 6.3 Forno elétrico a arco

Fornos elétricos a arco são indicados para fusão de grandes quantidades de aço. Na verdade, um forno elétrico a arco possui uma das maiores concentrações de potência 30 a 50 kW.cm<sup>3</sup>; entre todos os demais equipamentos de

fusão à eletricidade vistos anteriormente. A Figura 6.7 mostra um esquema construtivo desse equipamento.

O arco nada mais é que uma coluna de potência radiante, com flexibilidade física, cujos diâmetros e comprimentos são fixados pelos parâmetros elétricos da alimentação ditados pelo mecanismo regulador dos eletrodos e pela natureza dos materiais envolvidos.



**Figura 6.7: Esquema de um forno a arco para fundições de ferro e aço**

Fonte: CTISM, adaptado de Silveira et al., 1980a

## 6.4 O controle do arco elétrico

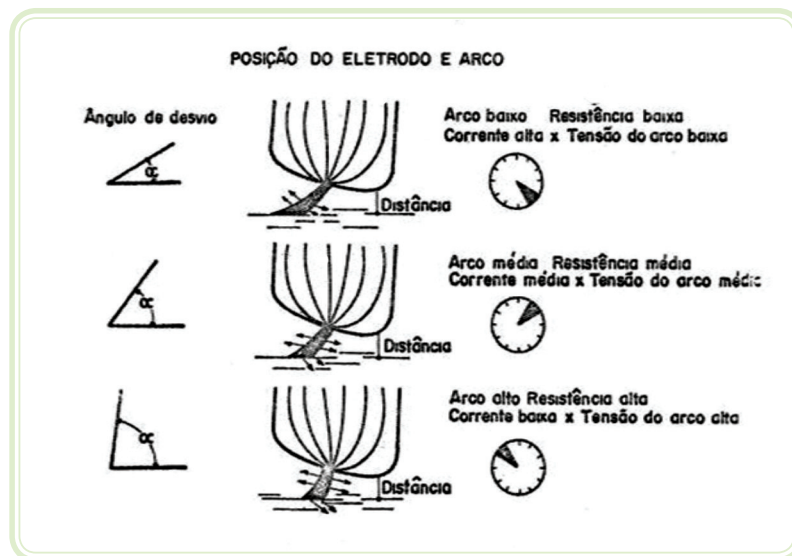
Desde que a potência no arco é o produto de sua tensão “V” existente entre o eletrodo e o banho, multiplicada pela intensidade da corrente, “I” que passa dos eletrodos para o banho ( $P = V \times I$ ), é possível controlar e dirigir a potência de um arco através destes dois parâmetros.

O arco exige um elemento estabilizador no circuito elétrico: resistência e reatância do sistema elétrico – condutores, transformadores, capacitores, linha de alta tensão entre outros. A função do lastro é limitar a corrente do arco, fixando suas dimensões geométricas. Se este lastro fosse removido, a corrente no arco “I” atingiria valores inadmissíveis para qualquer sistema elétrico na prática. A potência do arco é controlada pelo controle da tensão fornecida pelos transformadores (tap) e pelo posicionamento dos eletrodos a alturas variáveis entre a ponta e o banho ou sucata, de forma que, para cada tap, a corrente e a tensão dependam da distância do eletrodo da superfície do banho.

Em outras palavras, uma posição baixa do eletrodo, próxima da superfície do banho, resulta em uma corrente elevada do arco, com tensão relativamente baixa. Levantando-se ligeiramente o eletrodo na mesma tensão do tap, reduzir-se-a a corrente do arco e aumentar-se-a a tensão.

Dessa forma, existem três tipos de arco:

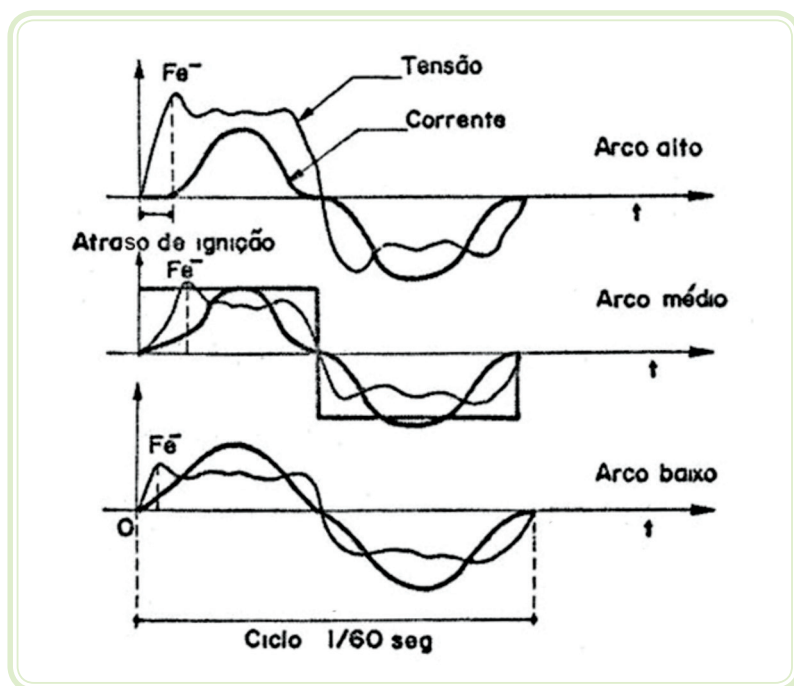
- a) **Arco baixo** – tem como características a resistência “R” baixa, a corrente “I” alta e a tensão entre o eletrodo e o banho “V” relativamente baixa. O reostato de controle da potência deve estar na posição máxima. Fisicamente, o arco apresentará um alto desvio. Essa disposição possibilita uma distribuição mais vertical e concentrada do calor do arco e é ideal após a fusão da carga, fase de sobreaquecimento.
- b) **Arco alto** – aqui se tem uma resistência do arco alta, corrente no arco “I” baixa, tensão entre o eletrodo e o banho “V” alta. Fisicamente, há um baixo desvio do arco com distribuição mais horizontal do calor. Essa disposição é ideal para as fases de fusão da carga de sucata.
- c) **Arco médio** – tem características intermediárias aos dois tipos anteriores, conforme mostra a Figura 6.8.



**Figura 6.8: Disposições do arco em um forno elétrico para fundições de ferro e aço**  
Fonte: Silveira et al., 1980a

Outro aspecto importante ligado à posição do arco é o atraso na ignição. O atraso na ignição é o tempo entre o início do potencial disponível na ponta do eletrodo e o momento em que a corrente começa a circular. Durante

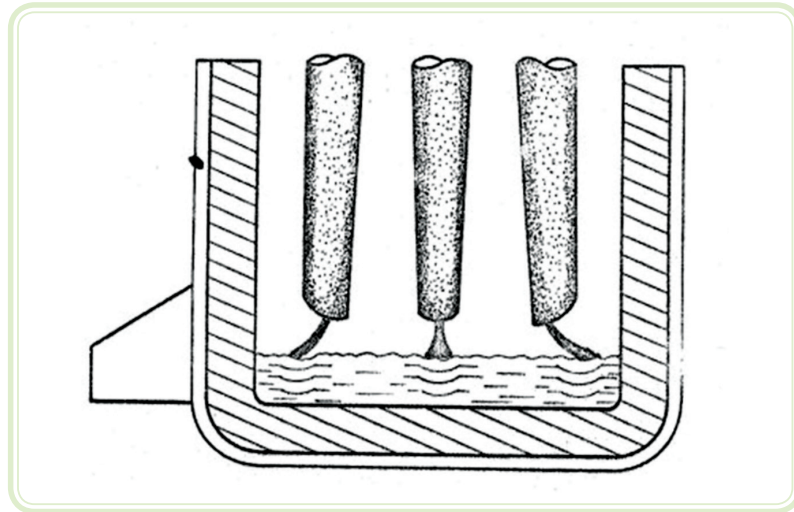
esse intervalo nenhum calor é gerado. É importante minimizar o atraso de ignição de forma a maximizar o potencial elétrico. A Figura 6.9 mostra os oscilogramas tensão x corrente para um forno elétrico pela posição do arco. Observa-se que um arco alto apresenta alta distorção com elevado atraso de ignição, quando comparado ao arco baixo.



**Figura 6.9:** Relação entre posição do arco, o atraso de ignição, distorção do oscilograma (tensão x corrente) do arco em um forno elétrico para fundições de ferro e aço  
 Fonte: Silveira et al., 1980b

## 6.5 Condições que influenciam o desgaste dos eletrodos e refratários

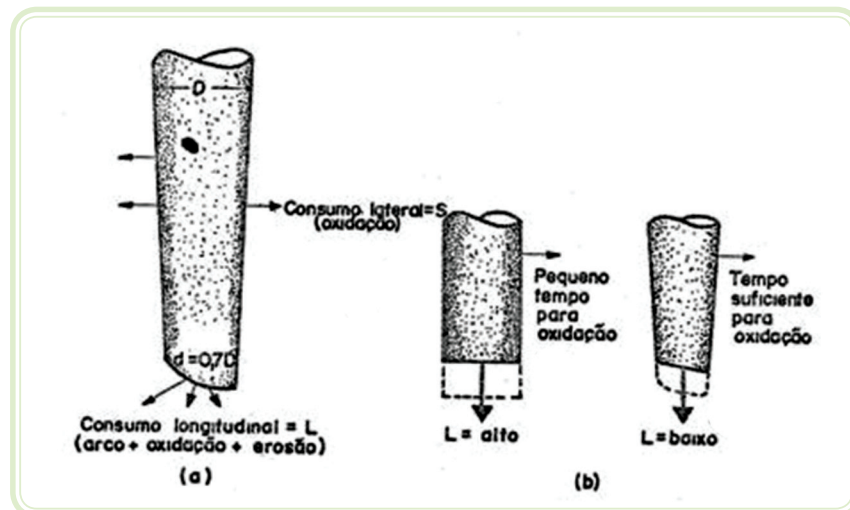
A primeira condição é o desvio do arco elétrico. O arco elétrico é dirigido para a parede lateral do forno. Forças magnéticas criam condições turbulentas em torno do arco que tendem a agitar o banho. A agitação tende a causar variações na distância entre o arco e o banho, no comprimento do arco, afetando assim a sua potência. Em síntese, na fase de fusão ocorrem flutuações na potência do arco à medida que ondas de metal escória passam sob os eletrodos. Ajustes na posição dos eletrodos podem controlar parcialmente esse efeito, conforme mostra a Figura 6.10.



**Figura 6.10: Desvio do arco em um forno elétrico para fundições de ferro e aço**

Fonte: Silveira et al., 1980b

O desgaste dos eletrodos é influenciado principalmente pela oxidação do arco. A Figura 6.11 mostra três perfis de desgaste. O da esquerda mostra um eletrodo com diâmetro inicial de 20 polegadas, decrescendo para 14. A conicidade é função da oxidação e da interação química com a atmosfera do forno, enquanto o chanfro é causado pelo desvio do arco. Observa-se que  $L$  = desgaste longitudinal na ponta, ou seja, o quanto de eletrodo é perdido em comprimento. A perda em comprimento é função da vaporização pelo arco, oxidação e erosão mecânica entre banho e eletrodo. Enquanto que  $S$  = oxidação lateral, ou seja, o desgaste lateral que provoca a conicidade característica dos eletrodos é função da composição do banho, da temperatura e da velocidade dos gases que se deslocam ao longo da superfície do eletrodo.



**Figura 6.11: Perfis de desgaste de eletrodos num forno elétrico a arco para fundições de ferro e aço**

Fonte: Silveira et al., 1980b

## Resumo

Nessa aula, estudou-se o funcionamento e as características dos fornos de indução utilizados para fusão de materiais condutores que formam correntes de Foucault e que produzem grande elevação de temperatura.

## Atividades de aprendizagem



1. O funcionamento dos fornos de indução baseia-se na indução eletromagnética. Explique-o a partir da tese de Faraday.
2. Explique por qual motivo se formam correntes de Foucault nos materiais condutores utilizados no forno à indução.
3. Quais frequências podem ser utilizadas em fornos sem núcleo? Explique-as.
4. O que se entende por fusão a vácuo e qual sua melhor aplicabilidade?
5. Quais os três tipos principais de fornos à canal?





# Aula 7 – O comportamento do metal fundido: resfriamento e solidificação

## Objetivos

Oferecer ferramentas para o controle prático da solidificação dos metais, evitando os defeitos correlatos de fundição.

### 7.1 Fusão e resfriamento de metais

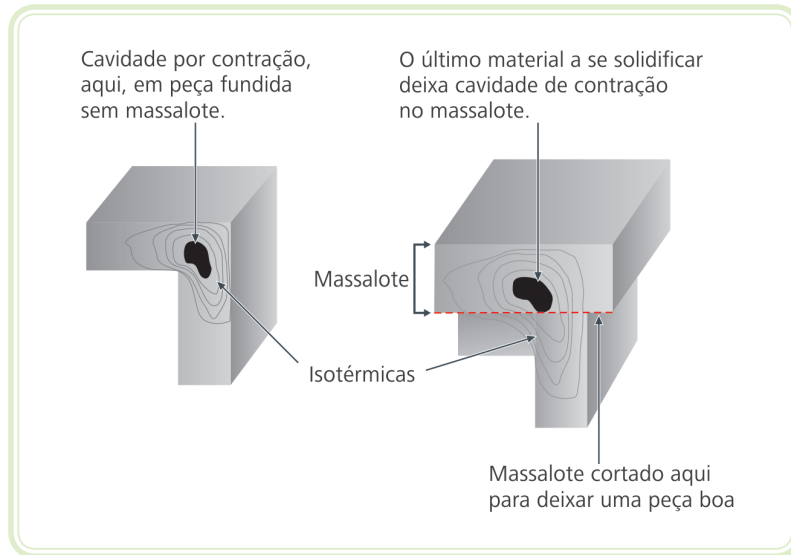
Quando um metal líquido é vazado em um molde, a peça começa a se resfriar de fora para dentro, a partir de todas as superfícies limitantes, porque o calor só pode ser transmitido para o exterior através do molde. O metal mais próximo do molde tem maior velocidade de resfriamento porque o molde sempre está mais frio que o interior do metal. Se a velocidade de resfriamento for muito severa, haverá um endurecimento superficial, além da maior probabilidade de formação de vazios. Esses vazios recebem o nome de “rechupes” e são combatidos pelas técnicas de “massalotagem”.

A solidificação de metais sempre provocará vazios, porque o volume de líquido é sempre maior que o volume de sólido.

Logo, sempre haverá contração durante a solidificação, ou seja, sempre precisaremos de mais líquido do que o que fornecemos inicialmente ao molde.

O massalote é uma reserva de metal líquido que deve alimentar a peça durante o processo de solidificação. O massalote deve ser o último lugar a se solidificar, de modo que contenha todo o vazio.

A Figura 7.1 ilustra o funcionamento do massalote, enquanto a Figura 7.2 mostra uma falha de peça de 1570 kg, grelha do moinho SAG, causada por falha no projeto dos massalotes. Sob condições normais, uma estrutura muito fina se forma na superfície das peças onde prevalece uma estrutura de grãos mais grosseiros. Logo, as seções mais próximas da parede do molde sofrem um efeito de têmpera que pode ou não ser desejável.



**Figura 7.1: Finalidade de um massalote em uma peça fundida**

Fonte: CTISM, adaptado de Oliveira, 1983

Observe que o vazio sempre deve ser localizado no massalote que, para isso, deverá estar líquido à medida que o metal no molde se solidifica.



**Figura 7.2: Exemplo de falha de material devido a rechupes**

Fonte: Oliveira, 1983

Contudo, a contração devido à solidificação não é a única que deve ser prevista pelo projetista de peças fundidas. Em primeiro lugar temos que prever a contração pelo resfriamento. De fato, o modelo sempre deve ser confeccionado maior que a peça acabada por meio dos chamados, "acréscimos para contração". Embora a contração seja volumétrica, no valor de 3 vezes a contração linear, a correção para contração é expressa em termos lineares. Num projeto de peça fundida, estes números não devem aparecer para não sacrificar o entendimento do desenho. Por isso, o modelador quando está construindo o

modelo faz uso de um instrumento chamado régua de contração. Tal régua tem uma escala que é mais longa que o padrão em uma proporção fixa e definida. Por exemplo, 1/16, 1/8 ou 3/16 de polegada por cada pé linear. O problema é que a contração é diferente para cada metal, formas diferentes de peças fundidas e diferentes métodos de moldagens e vazamento. Logo, os acréscimos para contração devem ser determinados na prática, através de fundição de algumas peças experimentais. Apenas como exemplo, uma peça fundida em aço, com desenho simples, sem machos exigiu um acréscimo de 1/4 de polegada/pé. Uma régua de contração foi confeccionada exclusivamente para a elaboração deste modelo. Por outro lado, para fundição de tubos e conexões em ferro fundido, uma régua com acréscimo de 3/16 polegadas/pé, porque os moldes e machos oferecem resistência considerável à contração. Sugestões de acréscimos típicos para contração iniciais, ou seja, como primeira tentativa, são mostrados na Quadro 7.1. Um modelo mestre, do qual modelos metálicos serão fundidos, deve ter um acréscimo duplo, para compensar a contração do modelo fundido e da peça.

**Quadro 7.1 Sugestões de acréscimos típicos para contração**

Metal	Ferro fundido cinzento	Aço fundido	Alumínio	Latão	Bronze	Magnésio
Contração (pol/pé)	1/8	1/4	5/32	3/16	1/8 a 1/4	11/64

Fonte: Doyle et all, 1978

Mas existem outros acréscimos importantes. O acréscimo de superespessura para usinagem é o valor com o qual as peças serão fabricadas, prevendo que algum material deverá ser retirado pela usinagem para acerto final de dimensões. O valor exato desta superespessura, depende do tipo de metal, da forma da peça, etc.

**Sobrespessura para distorção** – certos objetos fundidos, em formas mais complicadas, longas e/ou delgadas, se empenam com o resfriamento. Neste caso, prevê-se um deslocamento no modelo, de modo que ao se distorcer, a peça chegue ao desenho projetado.

**Saída e arredondamentos** – suponhamos que se queira fundir uma peça que tenha paredes que formem ângulos acentuados. Se projetarmos o modelo tal como a peça, o modelo terá dificuldade de sair do molde. Neste caso acrescentamos a uma saída uma conicidade ou inclinação que permita que o modelo seja removido do molde sem danificar a superfície da areia. Esta parte da peça poderá ser removida mais tarde. Outra solução é promover um

adereço ao modelo que lhe conferirá um arredondamento, permitindo a fácil saída do modelo do molde. Mais tarde, este arredondamento será consumido pelo metal quente, deixando o ângulo na peça final acaba.

**Saliências de fixação** – são partes que devem ser acrescentadas às peças somente até a fase de acabamento, permitindo que as peças sejam manipuladas nas várias fases de acabamento. Logo devem ser previstas no modelo, mas serão retiradas antes do despacho final da peça, seja por usinagem ou lixamento.

Como vimos, o modelo pode e deve ser bastante diferente da peça final acabada. Logo o projeto de novos modelos devem ser bastante minucioso porque corrigir um erro numa peça acabada é muito mais difícil e oneroso. O projeto de modelos é passo fundamental na obtenção de peças fundidas sadias.

## Resumo

Nessa aula, viu-se o processo de solidificação e contração dos metais na fundição e as distorções que estes fenômenos provocam nas peças. Viu-se noções de projetos de modelos para evitar que estas distorções afetem o projeto final da peça acabada. A primeira técnica vista foi a massalotagem para evitar defeitos de fundição, relacionados ao defeito conhecido como rechupe. Entendeu-se o que é o massalote, como deve alimentar a peça durante o processo de solidificação de modo que contenha todo o vazio e sua função no processo de solidificação que se resume justamente em evitar estes rechupes. Viu-se algumas análises de falhas em peças críticas de moinhos como exemplo da formação de rechupes, ocorrida por erro na utilização da técnica de massalotagem. Em seguida analisou-se o fenômeno da contração e a necessidade de se prever esta contração no modelo. Contudo, para ajustes dimensionais de grande precisão, será necessário recorrer ao processo de usinagem. Neste caso o modelo terá de prever esta quantidade de metal que deverá ser retirada. Por fim, analisou-se a necessidade de se prever empenamentos e uma saída suave do modelo do molde, através de superfícies no modelo chamadas de saídas e arredondamentos.

## Atividades de aprendizagem



1. Explique o processo de fusão e resfriamento.
2. O que são “rechupes”?
3. O que é massalote?
4. Como a técnica de “massalotagem” garante a sanidade das peças fundidas?
5. Onde o massalote deve se localizar?
6. A densidade do ferro líquido é  $7 \text{ g/cm}^3$ . A densidade do Fe sólido é  $7,8 \text{ g/cm}^3$ . Qual é o volume mínimo dos massalotes numa peça de 20 kg sólida, limpa e acabada.



# Aula 8 – Defeitos de fundição relacionados à moldagem

## Objetivos

Diferenciar os principais tipos de defeitos de fundição.

Identificar as causas dos defeitos de fundição.

Dominar os métodos de combate aos defeitos de fundição.

## 8.1 Fatores causadores dos defeitos

Vários fatores relacionados à areia e à moldação são causadores diretos ou indiretos de defeitos de fundição.

Entre as causas dos defeitos de fundição podemos destacar:

### 8.1.1 Dureza do molde

Um molde muito duro aumenta a tendência a defeitos.

### 8.1.2 Temperatura de moldação

Uma temperatura de moldação elevada é fator que pode aumentar a incidência de defeitos. Uma moldação pulverizada nas cavidades aliada à pintura pode amenizar ou resolver esse problema. Por outro lado, uma temperatura de vazamento mais baixa que o mínimo de 10% acima da temperatura de fusão, causará defeitos de mau enchimento, vazios e junta fria.

### 8.1.3 Tempo de vazamento

O tempo de vazamento deve ser menor que o tempo crítico, ou seja, aquele tempo em que começam a aparecer os primeiros defeitos.

### 8.1.4 Densidade insuficiente do molde

É causada por uma alta porcentagem de água. Pode gerar:

- Rechupes.
- Rugosidades.

- Inchamento – o inchamento da areia diminui o volume da cavidade do molde, logo, quando vazamos, o volume de metal líquido não será o planejado. Isso, por sua vez, gerará vazios ocasionados não pela contração de solidificação, mas pelo molde. Esse defeito também é chamado de pseudorechupe.

Para solucionar esses, pode-se tentar:

- Melhor dosagem de água.
- Melhor dosagem de argilas.
- Maior adição de areia nova.

### **8.1.5 Resistência insuficiente de molde**

A baixa resistência do molde causa inchamento, quebra de bolo, queda de areia, erosão e inclusões de areia e aderências de areia ao modelo.

São causas da baixa resistência do molde:

- Baixo teor em argila.
- Regeneração insuficiente da areia.
- Teor inadequado de água.

Independentemente da resistência do molde, a erosão também pode ser causada pelo movimento do metal no molde, que pode ser de três tipos:

- Escoamento com choque.
- Escoamento.
- Choque pleno.

A característica inconfundível do primeiro tipo de movimento é a erosão bem mais acentuada.



### 8.1.5.1 Soluções para a erosão

- a) **Teor de argila** – o teor de argila influencia diretamente na pressão à compressão que, por sua vez, é proporcional à quantidade de areia removida pela erosão.
- b) **Tamanho de grão** – quanto maior o grão maior será a erosão.
- c) **Adição de aditivos** – dextrinas, melão, chamote, etc., diminuem a erosão.
- d) **Tipo de metal** – fundição em aço é mais propensa à erosão do que fundição em ferro fundido que, por sua vez, é mais propensa à erosão do que fundição em alumínio.
- e) **Quantidade de metal vazado** – quanto maior a quantidade de metal vazado por peça, maior será a quantidade de areia removida e, portanto, aumenta a propensão à erosão. De maneira geral, tintas para moldes são um meio eficaz de combate à erosão causada pela areia e a moldação.

## Resumo

Nessa aula, diferenciaram-se os principais defeitos de fundição. Apresentaram-se as causas dos defeitos de fundição: alta dureza do molde, temperatura de moldação elevada, tempo de vazamento, densidade insuficiente do molde e resistência insuficiente de molde. Estudamos, também, as soluções para evitar esses eventuais defeitos.

## Atividades de aprendizagem

1. Cite os principais fatores relacionados à areia e à moldação causadores diretos ou indiretos de defeitos de fundição.
2. Como a dureza do molde pode afetar a fundição?
3. A temperatura de moldação pode alterar os resultados da fundição? Explique.
4. Como se mede o tempo de vazamento?
5. O que pode acontecer se a densidade insuficiente do molde for causada por alta porcentagem de água? Como solucionar os eventuais problemas?



6. Quais as causas da baixa resistência do molde?
7. A erosão pode ser causada pelos tipos de movimento do metal no molde. Quais são os tipos de movimento do metal que podem causar a erosão?
8. Quais são as soluções para a erosão?

# Aula 9 – Defeitos de fundição relacionados ao desprendimento de gases

## Objetivos

Fornecer conhecimentos necessários ao combate das bolhas.

Fornecer conhecimentos necessários para o combate ao defeito de fundição conhecido como mau enchimento ou junta fria.

Fornecer conhecimentos necessários para o combate ao defeito de fundição conhecido como crosta.

Conhecer e evitar os defeitos de fundição causados pela explosão de metal.

## 9.1 Tipos de defeitos relacionados ao desprendimento de gases endógenos

O desprendimento de gases é a maior causa de defeitos de fundição. Por isso, deve ser estudado detalhadamente.

Os principais defeitos causados pelo desprendimento de gases são:

- Bolhas.
- Mau enchimento ou junta fria.
- Crostas.
- Sopros e explosões de metal.
- Inclusões

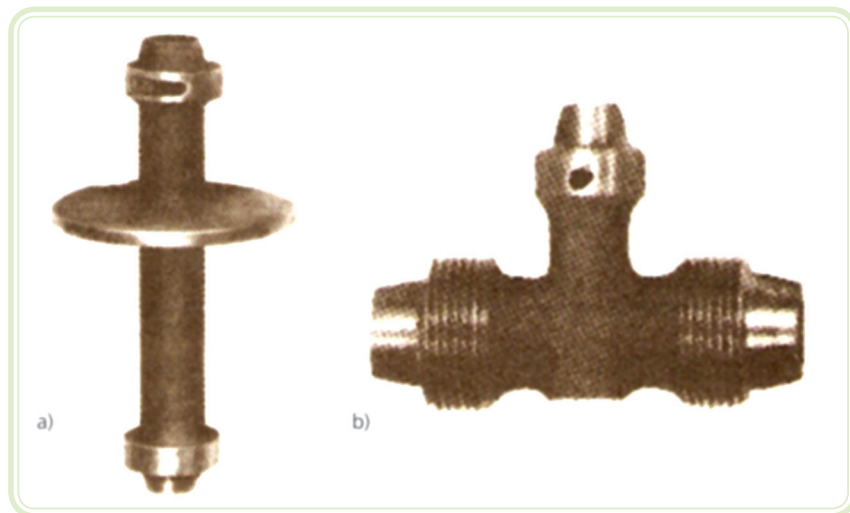
### 9.1.1 Bolhas

Bolhas são cavidades arredondadas formadas por gases não evacuados do molde.

Por sua vez, os gases dentro do metal líquido só podem ter três origens:

- a) Estavam no metal antes do vazamento, por deficiências na etapa de desoxidação.
- b) Foram aspirados do ar durante o vazamento.
- c) Foram difundidos do molde para o banho líquido após o vazamento.

A Figura 9.1 é um exemplo da aparência desse defeito.



**Figura 9.1: Peças que apresentam bolhas alongadas e arredondadas na parte superior**  
Fonte: Nazareno; Lobato, 2008

Há dois tipos de bolhas: endógenas e exógenas.

Bolhas endógenas provêm de gases dissolvidos e estão relacionadas à fenômenos de difusão para o metal líquido. A característica mais marcante dessas bolhas são as paredes internas brilhantes.

Bolhas exógenas são relacionadas ao fenômeno da aspiração de gases do molde pelo metal líquido quando vazado. São originadas pelo gás do molde. Sua característica mais marcante são paredes das cavidades oxidadas.

As bolhas, se originadas do molde, são combatidas pela adição de hidrocarbonetos ou pó de carvão. Se originadas pela aspiração, são combatidas pelo conveniente projeto de canais e massalotes e pela boa técnica de vazamento que mantém as bacias e canais sempre cheios durante todo o processo de vazamento.

Mas, a maior causa das bolhas é a má desoxidação dos gases gerados durante o processo de fabricação do metal líquido.

### 9.1.2 Vazios ou mau enchimento

Ocorrem quando a pressão dos gases atinge valores tais, que impedem a entrada do metal líquido; ou quando a temperatura de vazamento é tal, que não confere fluidez suficiente ao metal para que ele preencha todo o molde; ou quando o massalote não provê metal suficiente para alimentar toda a peça durante a solidificação. A Figura 9.2 mostra a aparência desse defeito, quando originado pelas primeiras duas razões.



**Figura 9.2: Bolha alongada, causada por excesso de gás no banho metálico**

Fonte: Nazareno; Lobato, 2008

Um caso de mau enchimento é uma caixa superior muito baixa, agravada por grande compactação e pequena altura metalostática. A maior parte desses defeitos são provocados pela temperatura de vazamento insuficiente.

O mau enchimento está sempre relacionado a dificuldades de escoamento, o que explica sua maior incidência em paredes mais finas.

Um vazio causado por deficiência de alimentação é mostrado na Figura 9.3. As Figuras 9.4 e 9.5 mostram um defeito desse tipo que ocorre numa peça de alto peso e alta criticidade: grelhas do moinho SAG no Projeto Sossego.



**Figura 9.3: Vazios originados por deficiência do projeto de massalotes**

Fonte: Oliveira, 2009

Ligas com grande quantidade de gases e com paredes espessas, também podem sofrer esse tipo de defeito. É que paredes espessas são mais capazes de acumular gases que passaram para o metal líquido, pela sua atratividade por gases, impedindo o preenchimento do molde.



**Figura 9.4: Defeito de fundição conhecido como vazio ou rechupe**

Fonte: Oliveira, 2009



**Figura 9.5: Detalhe do defeito de fundição que motivou a falha da peça mostrada em conjunto na foto anterior**

Fonte: Oliveira, 2009

Na Figura 9.4, vê-se o conjunto montado com a grelha em falha. Na Figura 9.5, mostra-se detalhe da falha onde fica óbvio que a causa é o mau enchimento.

### 9.1.3 Trincas

Têm formato irregular e são geradas quando partes do metal sólido se separam por tensões térmicas, após a remoção do molde. A Figura 9.6 mostra esse tipo de defeito.



**Figura 9.6: Peça em falha por trinca**

Fonte: Oliveira, 2009

A solução é o uso de moldes colapsíveis e de resfriadores para impedir gradientes térmicos.

### 9.1.4 Sopros e explosões

Defeitos provocados por gases provenientes do molde ou do macho.

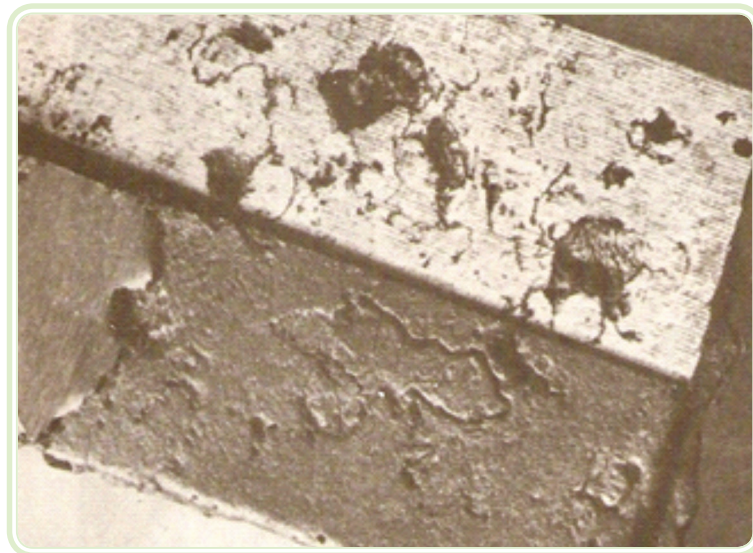
Localizam-se principalmente nas regiões de cantos, porque são regiões superaquecidas que provocam a evaporação rápida de água do molde, chegando a expulsar o metal líquido do molde, provocando rugosidades ou penetrações metálicas.

### 9.1.5 Inclusões

As inclusões podem ser de óxidos, de areia e de escórias.

As inclusões de óxidos são originadas do material gerado na desoxidação.

As inclusões de escória são produto de contaminação do metal com a escória. A Figura 9.7 mostra esse defeito.



**Figura 9.7: Inclusões de areia e escória**

Fonte: Nazareno; Lobato, 2008

A Figura 9.8 mostra um exemplo desse defeito numa placa de desgaste do moinho SAG, peça de alta criticidade para o processo de moagem de cobre.

As inclusões de escória e areia, além de prejudicarem a aparência da peça, são pontos potenciais de nucleação de trincas e, por isso, devem ser combatidas.





**Figura 9.8: Peça de alta criticidade que apresenta inclusões de areia e bolhas**

Fonte: Oliveira, 2009

Essas peças falharam prematuramente por apresentarem fratura frágil com origem em pontos de inclusões e bolhas. A troca de uma peça como essa demanda de 3 a 4 horas de parada total da planta. Cada hora de uma planta de cobre, capaz de produzir 1840 t/h de concentrado, significa US\$ 120.000, quando a tonelada de cobre está em US\$ 7000. Isso, por si só, justifica o combate aos defeitos de fundição.

## 9.2 Defeitos causados por fatores exógenos à fundição

Identificar a real causa da falha de uma peça fundida é um problema complexo. Nem sempre quando se encontra um defeito de fundição numa peça, significa que ele foi realmente a causa da falha. Esse fato tem implicações econômicas de grande monta, o que cria uma situação delicada para o profissional fundidor. No caso de revestimentos de moinhos, peças fundidas de alta tecnologia, responsáveis pelo funcionamento das plantas de tratamento de minérios, há três causas de falhas:

### 9.2.1 Falha de fabricação

São os defeitos discutidos anteriormente.

Nesse caso, cabe ao fornecedor o ônus de repor a peça com falha, de arcar com todos os prejuízos, inclusive uma eventual compensação extra ao cliente devido ao lucro cessante causado.

### 9.2.2 Falha de montagem

Durante a montagem, várias falhas podem ocorrer como uma montagem desbalanceada ou um torque maior nos parafusos de fixação, o que aumentará a tensão e propiciará uma falha prematura.

### 9.2.3 Falha de operação

Operar um moinho vazio, com excesso de carga de bolas ou com excesso de velocidade pode gerar impactos sobre o revestimento que levarão a falhas.

Contudo, sob o ponto de vista do cliente, a prática diz que, se uma peça apresenta defeitos de fundição, a causa principal da falha é atribuída ao fornecedor, cessando-se maiores investigações, ou seja, mesmo que tenha havido má operação ou má montagem, a causa principal ainda será a presença do defeito de fundição. Daí, por quê então eles precisam ser evitados a todo custo.

A Figura 9.9 mostra um resultado de investigação de falhas em que uma peça trincada tem sua causa determinada por bolhas e inclusões, onde se pode traçar o início da fratura nesses defeitos.



**Figura 9.9: Cavidades superficiais na extremidade da peça em regiões de início das trincas, observadas nos pedaços da peça quebrada**

Fonte: Oliveira, 2007

## Resumo

Nessa aula, viu-se as características das bolhas e como combatê-las. Pode-se verificar o que são os vazios ou mau enchimentos e como evitá-los. Viu-se o fenômeno dos sopros e explosões e como evitar este acidente. Por último, vimos que uma peça que falha em serviço, nem sempre é resultado de um defeito de fundição. Mas se ela falhar e nela for encontrado um defeito, certamente este será apontado como causador da falha, independentemente de que também tenham existido falhas na operação e na montagem.

## Atividades de aprendizagem



1. Cite os principais defeitos ao desprendimento de gases.
2. O que são as bolhas na fundição?
3. Cite os tipos de bolhas na fundição. Quais são suas características?
4. O que são os vazios ou mau enchimento na fundição e a que estão relacionados?
5. Como são geradas as trincas? Como evitá-las?
6. O que provoca sopros e explosões? Onde se localizam?
7. Explique o que são as inclusões na fundição.
8. Um revestimento de moinhos pode falhar por três motivos. Quais são? Explique.



# Aula 10 – Segregação

## Objetivos

Entender as origens da segregação e corrigir suas causas.

### 10.1 Origens da segregação

Qualquer banho metálico contém impurezas dissolvidas. As impurezas podem ser sólidos macroscópicos como o  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , produto da desoxidação; líquidas como no caso das escórias, ou microscópicas como os elementos químicos Si, Mn, P, S, etc.

No estado líquido, essas impurezas estão distribuídas uniformemente.

Essa homogeneidade não pode perdurar durante o processo de solidificação porque as impurezas não são tão solúveis no estado sólido como no estado líquido.

Logo, ao longo do processo de solidificação, as impurezas serão expelidas do sólido para o líquido. Como a solidificação se processa da superfície para o centro, essa última região estará líquida por mais tempo e, por isso, conterá mais impurezas, ou seja, as impurezas tendem a ser segregadas para essas regiões.

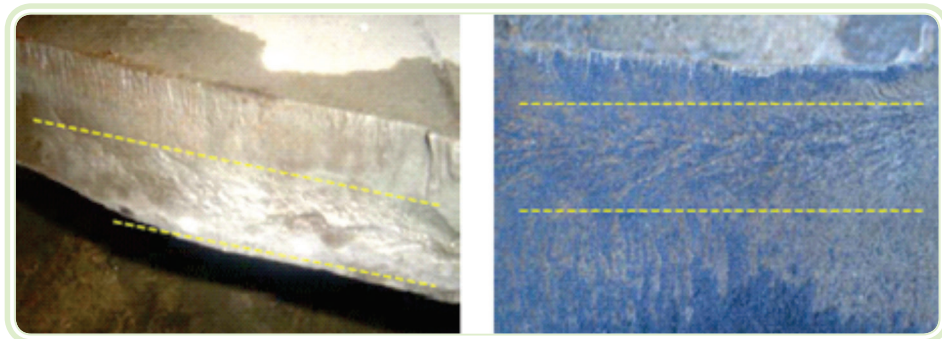
A Figura 10.1 mostra um trilha com intensa segregação de impurezas e bolhas. Observa-se também uma fissura, resultado do enfraquecimento originado pela segregação.



**Figura 10.1: Seção transversal de um trilho com intensa segregação e bolhas e uma fissura interna no boleto**

Fonte: Colpaerth, 1974

A composição química da peça pode variar ao longo da seção longitudinal da peça, principalmente em relação a dois elementos deletérios ao aço: fósforo e enxofre. A segregação não pode ser completamente evitada, mas apenas reduzida. O meio mais radical de remover segregações é a fusão à vácuo. A Figura 10.2 mostra uma análise de falha em que uma segregação parece contribuir ou catalisar uma falha.



**Figura 10.2: Aparente linha de segregação na base de uma linha de fratura**

Fonte: Oliveira, 2007

A segregação constitui um gradiente na concentração de certos elementos de liga e normalmente ocorre em maior ou menor grau, na estrutura de fundidos. Uma linha forte de segregação pode promover uma fragilidade no material e, geralmente, é mais acentuada nas primeiras peças fundidas de uma série, devido à maior temperatura de vazamento. A fragilidade ocasionada por segregação deve ser adequadamente confirmada por uma análise metalográfica e ensaios mecânicos.

## Resumo

Nessa aula, viu-se as origens da segregação, entendemos o processo da solidificação e seu mecanismo. Pode-se dizer que uma linha forte de segregação pode promover uma fragilidade no material e que essa fragilidade deve ser adequadamente confirmada por uma análise metalográfica e de ensaios mecânicos.

## Atividades de aprendizagem



1. Quais as origens da segregação?
2. Que impurezas pode conter qualquer banho metálico?
3. Como a fragilidade está relacionada à segregação?
4. Durante o processo de solidificação, para que regiões as impurezas tendem a ser segregadas?
5. Qual é o meio mais radical de remoção de segregações? Explique.





# Aula 11 – Combate aos defeitos de fundição

## Objetivos

Apresentar ferramentas necessárias à prevenção dos defeitos de fundição.

Fornecer alternativas para o conserto de peças defeituosas.

## 11.1 A metalurgia do combate aos defeitos de fundição

Para executar o vazamento de peças que resultem em bom estado, algumas providências devem sempre ser tomadas:

- Carregar somente matérias-primas previamente selecionadas e calculadas.
- Proceder à desoxidação e à limpeza do banho, momentos antes do vazamento.
- Respeitar a temperatura e o tempo de vazamento.
- Haver um projeto adequado de canais de ataque que evitem erosões e explosões.
- Aumentar os cuidados quanto a permeabilidade e diminuição do desprendimento de gases.

Qualquer providência que aumente a permeabilidade e diminua o desprendimento de gases é benéfica.

A primeira providência de combate aos defeitos de fundição é evitar o contato do metal com a umidade ao longo de toda sua elaboração, pelo aquecimento das panelas de vazamento com estufamento adequado dos moldes, evitando condensação da umidade devido ao contato entre areia quente e macho frio (a areia quente contém vapor de água que se condensará ao entrar em contato com o macho frio, evitando o arrastamento de ar pelo sistema de canais

com projetos bem feitos, com funil de vazamento e canal de descida sempre cheios durante todo o tempo de enchimento do molde com metal líquido.

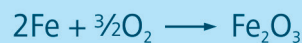
Mas nem todos os defeitos podem ser combatidos apenas usando o senso comum. É importante que se tenham noções de metalurgia da panela para evitar alguns defeitos de causas mais sutis.

## 11.2 Noções de metalurgia de panela

### 11.2.1 Introdução: termodinâmica x cinética química

Uma equação química só dá as relações quantitativas entre os reagentes. Na verdade, a coisa é bem mais complexa. Por exemplo, a Equação 11.1 não nos informa que:

Equação 11.1



- a) Esse processo se dá por difusão de oxigênio pela superfície do ferro.
- b) O processo demanda o estabelecimento de reações predominantemente iônicas.
- c) Deve haver difusão dos átomos de ferro e de oxigênio por 3 camadas superpostas de FeO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

A Equação 11.1 nada nos informa a respeito da cinética da reação, ou seja, a velocidade com que a reação química se processará.

A velocidade da reação é medida por:

Equação 11.2

$$K = A \times e^{-\frac{Q}{RT}}$$

Onde: K = constante cinética, adimensional. Quanto maior o valor de K, maior a velocidade da reação

A = constante de proporcionalidade

Q = energia de ativação da reação em joules/mol

R = constante universal dos gases em J/mol K

T = temperatura absoluta em K

Em reações que dependem da difusão, a velocidade passa a ser controlada pela Lei de Fick:

Equação 11.3

$$D = D_0 e^{-Q/RT}$$

Onde: D = velocidade de difusão

$D_0$  = constante de proporcionalidade

Q = energia de ativação da reação de difusão

T = temperatura em K

Processos de elevada energia de ativação são influenciados pela temperatura. De fato, a Lei de Gibbs – Helmholtz, citada por Silveira, 1980b mostra que:

Equação 11.4

$$\int_{K1}^{K2} d\ln K = \frac{\Delta H^0}{R} \int_{T1}^{T2} \frac{dT}{T}$$

Onde:  $d\ln K$  = variação diferencial do logaritmo natural da constante de equilíbrio, quando a temperatura passa de  $T_1$  para  $T_2$

$\Delta H^0$  = variação de entalpia, análogo à energia de ativação

R = constante universal dos gases

T = temperatura absoluta

## 11.3 Dissolução gasosa em metais

A quantidade de gases dissolvidos nos metais sólidos ou líquidos é função:

- a) Da solubilidade nos metais sólidos.
- b) Da difusão desses metais durante a solidificação.
- c) Dos processos de eliminação conhecidos como desgaseificação, ou, no caso específico do oxigênio, desoxidação.

Uma pergunta muito importante é: como os gases entram no banho líquido?

Em temperaturas normais, os gases aderem à superfície dos sólidos por adsorção. A adsorção é função das forças de Van Der Waals.

Os gases com maiores forças de Van Der Waals são os de moléculas grandes e baixos pontos de ebulição. A quantidade de gás adsorvida diminui com a temperatura, mas aumenta com a pressão, daí a grande importância do estufamento na pressão atmosférica, para manutenção de baixas contaminações gasosas.

**Carepa** – antigamente chamadas de camada de adsorção ativa, as carepas nada mais são que uma capa de gás adsorvido que forma um composto químico na superfície do metal. Porém, acima de 400°C ocorre a absorção de gases por difusão, mas diminui a adsorção. Os gases só se difundem em átomos. Se a absorção é controlada pela difusão, sua equação cinética passa a ser:

Equação 11.5

$$J = \frac{1}{A} \times \frac{dm}{dt} = -D \times \frac{dC}{dx}$$

Onde: J = fluxo de difusão em unidades de massa por tempo, por área

A = área superficial sobre a qual haverá a difusão

D = velocidade de difusão

dC/dx = variação da concentração ao longo da distância da superfície absorvida até o centro

Lembrando que D é dado pela Equação 11.3.

A difusão varia com:

- A natureza do átomo do soluto.
- O tipo de estrutura do átomo solvente.
- A temperatura.

Varia segundo a natureza do átomo de soluto porque quanto menor o átomo mais rápido ele se difunde e maior é o coeficiente de difusão  $D_0$  e D.

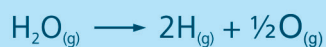
Varia com a natureza do átomo solvente por questões ligadas a ligações interatômicas e questões relacionadas aos interstícios. Por exemplo, solventes CCC difundem sempre com maior velocidade, porque têm o maior espaço intersticial. Pela mesma razão, o desarranjo atômico ajuda na difusão. Por isso, a difusão é sempre maior na região dos contornos de grão.

A difusão é beneficiada com o aumento da temperatura porque, aumentando-se a temperatura, aumenta-se a probabilidade do átomo ter energia térmica necessária para o salto e também se aumenta o número de lacunas.

Assim, o hidrogênio é o gás de menor raio atômico. Portanto, é mais absorvível no ferro sólido e dissolvível no metal líquido.

## 11.4 Termodinâmica da dissolução do hidrogênio

Equação 11.6



A esta reação, no equilíbrio, está associada a energia de Gibbs:

Equação 11.7

$$\Delta G^0 = 47.530 + 0,86T [=] \text{ cal/mol}$$

Mas,

Equação 11.8

$$\Delta G^0 = -RT \ln \frac{\%H^2 \times \%O}{P_{\text{H}_2\text{O}}}$$

Segue-se que:

Equação 11.9

$$2RT \ln \%H = -RT \ln (\%O/P_{\text{H}_2\text{O}}) + \Delta G^0$$

Então:

Equação 11.10

$$\ln \%H = \frac{1}{2} \left( \ln \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{\%O} \right) + \frac{\Delta G^0}{RT}$$

Esse equacionamento permite concluir:

A oxidação elimina %H.

Equação 11.11

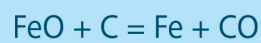
$$2 \ln (\%H) + \ln (\%O)H = \ln P_{\text{H}_2\text{O}} + \frac{\Delta G^0}{RT}$$

Ou seja, para eliminar hidrogênio e oxigênio simultaneamente é necessário que se produza um abaixamento na pressão parcial de vapor d'água. Isto se consegue com uma diluição das misturas gasosas em um gás inerte como o argônio. Por isso, borbulham-se gases inertes dentro de um metal para purificá-lo, ou seja, desgaseificá-lo.

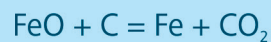
Para que uma bolha se forme é preciso que ela tenha pressão interna igual ou superior à pressão metalostática, mais a pressão decorrente da tensão superficial.

Principais reações responsáveis pela evolução dos gases nos metais.

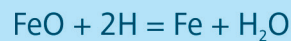
Equação 11.12



Equação 11.13



Equação 11.14



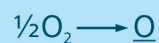
É o grau de oxidação que determina a quantidade de gases desenvolvidos durante o resfriamento e solidificação. Portanto, é a quantidade de oxidação que determina o tipo de forma e distribuição dos vazios.

O CO, CO<sub>2</sub>, e H<sub>2</sub>O têm muito baixa solubilidade no metal e isso determina seu desprendimento. Porém, como este desprendimento se dá durante a solidificação do metal, muito gás fica preso nele antes de escapar.

## 11.5 Desoxidação

Existe um equilíbrio entre o oxigênio gasoso, capaz de sair do metal, e o oxigênio dissolvido, preso ao metal.

Equação 11.15



Ao qual se associa uma variação da energia de Gibbs no equilíbrio:

A pressão de oxigênio gasoso no equilíbrio é notada com  $\mu_{O_2}$

Equação 11.16

$$\Delta G^0 = -RT \ln \frac{\%O}{P_{O_2}^{1/2}}$$

Logo,

Equação 11.17

$$\mu_{O_2} = 2 \times (\Delta G^0 + RT \ln \%O)$$

Seguindo o programa para fabricação de aço, no final do sopro, o potencial de oxigênio é muito elevado, o que possibilitaria a incorporação ou retenção de gases, afetando sua qualidade final, caso não fossem eliminadas.

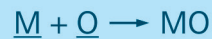
A desoxidação se faz no sentido de diminuir o potencial de oxigênio.

Esse potencial de oxigênio final é determinado pelo agente desoxidante.

A desoxidação se dá em duas etapas:

- a) Elemento desoxidante determina a porcentagem de oxigênio em equilíbrio com ele, pela Equação 11.18:

Equação 11.18



À qual se associa um  $\Delta G^0$  que, por sua vez, determinará a % de oxigênio em equilíbrio.

- b) De posse da % de oxigênio em equilíbrio, calcula-se o potencial de oxigênio,  $\mu_{O_2}$  ao qual está associado um novo  $\Delta G^0$  pela Equação 11.15.

## 11.6 Defeitos de fundição relacionados com estabilidade térmica dimensional

O quartzo dilata-se anormalmente. Quando há vazamento do metal, a areia que entra em contato com metal líquido sofre:

- Choque térmico por contato, principalmente na parte inferior do molde.
- Choque térmico por radiação, principalmente na parte superior do molde.

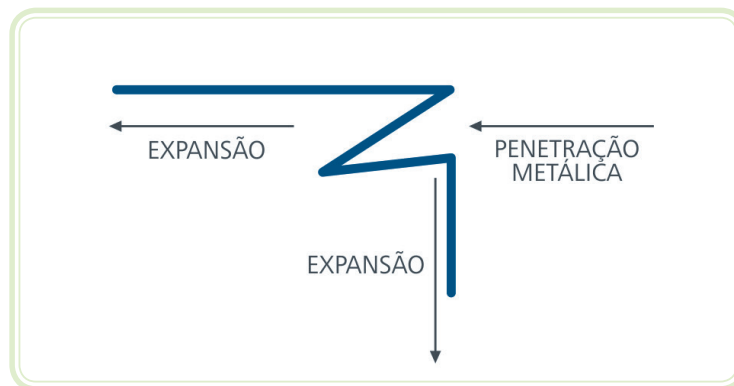
O quartzo se dilata bruscamente entre 500°C e 600°C devido a mudanças de sua estrutura cristalina. É essa dilatação que provoca defeitos conhecidos como: estrias, enrugamento, rabo de rato, escamas, descascamento, chagas, etc.

O mecanismo do defeito pode ser dividido em quatro partes:

- Choque térmico.
- Ressecamento da areia em contato com o metal.
- Recondensação da umidade proveniente da areia de contato a alguns centímetros de distância do ponto original de geração da umidade.
- Dilatação da areia ressecada.

## 11.7 Venulação

São finas excrescências metálicas ou rebarbas. Esse defeito é originado pela expansão da areia, conforme esquema da Figura 11.1:



**Figura 11.1: Esquema de formação do defeito de fundição conhecido como venulação**  
Fonte: CTISM, adaptado de Oliveira, 1983

Esse defeito também pode ser originado por estufamento inadequado, sendo mais comum em areias aglomerada com óleos e produtos afins.



## 11.8 Penetração mecânica

Causada pela explosão de água.

Solução:

- a) Reduzir da quantidade de água de moldagem.
- b) Secar superficialmente.
- c) Evitar a compactação excessiva.

## 11.9 Sinterização

Defeito relacionado à areia.

Causas:

- a) Impurezas.
- b) Teor excessivo de óxidos de ferro.
- c) Alta porcentagem de argila inerte.
- d) Alta porcentagem de cálcio nas argilas.
- e) Porcentagem elevada de silicatos na areia.

Soluções:

- a) Evitar a adição de areia nova.
- b) Adotar o uso de tintas.
- c) Usar areias com boa sinterização.
- d) Adotar maior porcentagem de pó de carvão para fundições de ferro fundido.

## Resumo

Nessa aula, estudamos as regras necessárias à prevenção e solução dos defeitos de fundição. Estudamos também os defeitos e soluções relacionados com estabilidade térmica dimensional.



## Atividades de aprendizagem

1. Cite as providências que devem ser tomadas para a prevenção dos defeitos de fundição.
2. Que cuidados devem ser tomados para evitar o contato do metal com umidade ao longo de toda a sua elaboração?
3. Quais os defeitos de fundição relacionados com estabilidade térmica dimensional? Esses mecanismos do defeito podem ser divididos em quatro partes. Quais são?
4. O que se deve entender por venulação?
5. Como ocorre a penetração mecânica?
6. Cite os defeitos relacionados à areia, as causas e soluções?

## Referências

COLPAERTH, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 3 ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1974.

DOYLE, L. E. et al. **Processos de fabricação e materiais para engenheiros**. São Paulo: Edgar Blucher, 1978.

ENCONTRO DE FUNDIDORES. Areias de fundição aglomeradas com argila, **Anais...** Hilton Hotel. Belo Horizonte: SENAI de Itaúna, 1982. 470 p.

GRAY, A.; WALLACE, G. A. **Eletrotécnica**: princípios e aplicações. 7 ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1976.

NAZARENO, J.; LOBATO, J. **Defeitos de fundição**. Notas de aula. IFPA, 2008.

OLIVEIRA, B. F. **Fundição**. Notas de aula. EEUFMG, 1983.

OLIVEIRA, Eugênio Teixeira de. **Avaliação da quebra prematura de uma placa central do espelho de descarga do moinho SAG**: relatório técnico. Gerência de controle de qualidade, Sossego, maio de 2007. 14 p.

OLIVEIRA, B. F. **Análise de falhas no moinho SAG em 05/12/2009**: relatório interno. Projeto Sossego. VALE, Canaã dos Carajás - PA, 2009. 10 p.

SILVA, W. **Apresentação Fornac**: relatório interno. Rio de Janeiro, setembro, 2010.

SILVEIRA, R. C. et al. **Tecnologia de fabricação do aço líquido** – fundamentos. Belo Horizonte, Jose Martins de Godoy, auxílio financeiro do CNPq, processo 40.2472/79, 1980a. 1 v.

SILVEIRA, R. C. et al. **Tecnologia de fabricação do aço líquido** – aciaria elétrica. Belo Horizonte, Jose Martins de Godoy, auxílio financeiro do CNPq, processo 40.2472/79, 1980b. 3 v.

## Currículo do professor-autor



**Bruno Ferraz de Oliveira** é engenheiro metalurgista formado pelo Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DMET/EEUFMG), em julho de 1983. Mestrado e Doutorado em Engenharia Metalúrgica Extrativa pelo CPGEMM-EEUFMG. Professor no IFPA – Departamento de Materiais e Metalurgia onde é coordenador dos Cursos Técnicos em Metalurgia e Engenharia de Materiais. É professor efetivo nas cadeiras de Metalurgia dos Ferrosos, Metalurgia dos não Ferrosos, Tratamento de Minérios, Operações Unitárias, Agentes Metalúrgicos e Fundamentos da Engenharia de Materiais.