



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
BACHARELADO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS**

**FUNDIÇÃO EM AREIA A VERDE: UMA  
ABORDAGEM EXPERIMENTAL**

**PAULO JOSÉ CARVALHO MASCARENHAS FILHO**

**CRUZ DAS ALMAS  
2016**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
BACHARELADO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS**

## **FUNDIÇÃO EM AREIA A VERDE: UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia com  
parte dos requisitos para obtenção do título de  
**Bacharel em Ciências Exatas e Tecnológicas.**

Orientador: Prof. Dr. Vitor Pinheiro Ferreira

**PAULO JOSÉ CARVALHO MASCARENHAS FILHO**

**CRUZ DAS ALMAS  
2016**

FILHO, Paulo José Carvalho Mascarenhas Filho.

Fundição em areia a verde: uma abordagem experimental./  
Paulo José Carvalho Mascarenhas Filho .– Cruz das Almas –  
BA, 2016.

57 f. : il.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
BACHARELADO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS**

## **FUNDIÇÃO EM AREIA A VERDE: UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL**

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

EXAMINADORES:

Prof. Dr. Vitor Pinheiro Ferreira

---

Prof. Msc.

---

Prof. Msc.

---

**PAULO JOSÉ CARVALHO MASCARENHAS FILHO**

**CRUZ DAS ALMAS  
2016**

Dedico este trabalho aos meus  
pais Paulo José Carvalho  
Mascarenhas e Paula France Oliveira  
Mascarenhas.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Paulo e Paula Mascarenhas.

A todos os meus familiares por me apoiarem e sempre acreditarem no meu potencial.

Ao professor Vitor Pinheiro Ferreira pela orientação, suporte, confiança e dedicação na confecção deste trabalho.

A todos os professores do curso de Bacharelado em Ciências Exatas e Tecnológicas da UFRB por passarem toda a bagagem e conhecimento necessário até aqui.

Aos amigos sempre presentes e colegas da UFRB, em especial Mauricio Torres Correia Junior e Adriano Ferreira Dos Santos, companheiros de projeto.

A UFRB pela acolhida.

A todos que de alguma forma incentivaram, agregaram conhecimento e fizeram parte da minha vida acadêmica, o meu eterno obrigado.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível. ”  
Charles Chaplin

## RESUMO

A metalurgia desde sua invenção foi determinante no desenvolvimento do homem como espécie. Iniciada no Brasil há mais de 100 anos, hoje a indústria brasileira de fundidos gera muitos empregos e receita para o país. No ramo metalúrgico existem diversos tipos de fabricação mecânica por fundição. O processo mais comum e versátil é o de fundição por areia a verde que tem sua produção de peças através de moldes feitos em areia umedecida. Nesse estudo é apresentada uma visão experimental do processo de fundição por areia a verde, onde uma peça foi preparada de alumínio utilizando-se um modelo em madeira. O trabalho teve como objetivo fazer uma abordagem prática do processo de fundição por areia a verde, explicitando cada etapa e técnica para se chegar a peça final. O metal foi fundido em um forno a cadinho fixo e como molde foi utilizada uma areia preparada em laboratório. Foi obtida uma peça com aparência física e variações dimensionais adequadas possibilitando assim, futuros estudos na área de fabricação metalúrgica outros projetos na instituição (UFRB).

**Palavras-chave:** Fundição; metalurgia; areia verde.

## **ABSTRACT**

The metallurgy since its invention has been instrumental in the development of the human beings. Begun in Brazil for over 100 years, and today the Brazilian industry of fused materials generates many jobs and profit for the country. In the metal industry there are various types of mechanical manufacturing casting. The most common and versatile process is the green sand casting which has its production parts by using models made in wet sand. This research is presented an experimental view of the casting process for green sand where a piece of aluminum was produced using a wooden model. The work aims to make a practical approach to the casting process by sand green, explaining each step and technique to get the final piece. For this reason, it was necessary a gas burner, an oven, boxes and sand casting and raw material to melt. The metal was melted in a crucible furnace and the fixed mold was used as a sand composed in the laboratory. Was obtained a piece with physical appearance and appropriate dimensional variations thus enabling future studies in metallurgical manufacturing area other projects in the institution (UFRB).

**Keywords:** Foundry; metallurgy; sand.

## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Primeira etapa da compactação. ....	20
Figura 2.2 - Dutos de alimentação na caixa de areia.....	20
Figura 2.3 – Despejo de metal no molde de areia .....	21
Figura 2.4 - Fluxograma da Produção de Peças Fundidas.....	21
Figura 2.5 – Processo de aquecimento do molde no processo shell molding .....	23
Figura 2.6 – Processo de fabricação do modelo .....	23
Figura 2.7 – Molde para produção de virabrequim pelo processo de shell molding.....	24
Figura 2.8 - Etapas do processo de fundição por cera perdida.....	25
Figura 2.9 – Moldes permanentes: lingoteiras. ....	26
Figura 2.10 – Maquinário responsável pela injeção do metal em moldes permanentes .....	28
Figura 2.11 – Processo de fundição por centrifugação .....	29
Figura 2.12 – Marcação de macho no modelo .....	34
Figura 2.13 – Três opções de posicionamento do massalote.....	35
Figura 3.1 (a) – Associação do queimador e forno. ....	43
Figura 3.1 (b) – Cadinho. ....	44
Figura 3.2 (a) – Caixa inferior. ....	45
Figura 3.2 (b) – Caixa superior. ....	45
Figura 3.2 (c) – Parte da caixa mostrando os apoios usados para aderência da areia. ....	45
Figura 3.3 – Aplicação do desmoldante (talco) sobre a peça. ....	46
Figura 3.4 – Areia de faceamento sobre a peça. ....	47
Figura 3.5 – Compactação da areia.....	47
Figura 3.6 – Caixa virada com a face do modelo.....	48
Figura 3.7 – Em primeiro plano o molde e os canais de alimentação; no fundo, o modelo utilizado. ....	48
Figura 3.8 – Parte superior da caixa com os massalotes. ....	49
Figura 3.9 – Retirada do cadinho do forno.....	50
Figura 3.10 – Apoio do cadinho. ....	50

Figura 3.11 – Alumínio líquido vertido no molde.....	51
Figura 3.12 – Início da remoção da peça.....	51
Figura 4.1 – Modelo com representações das áreas.....	52
Figura 4.2 – Resultado final da peça. ....	54
Figura 4.3 – Detalhe da rugosidade da peça.....	55
Figura 4.4 – Detalhe da peça com porosidade e erosão. ....	56

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Durabilidade média dos modelos. Fonte: Metals Handbook, vol. 15.....	33
Tabela 2.2 – Contração de metais referente a espessura. Fonte: Metals Handbook, vol. 15 .....	33
Tabela 2.3 – Tipos de ferro fundido e microestrutura típica. Fonte: SERBINO, 2005. ....	37
Tabela 4.1 – Comparação dimensional entre modelo e peça em mm. ....	53

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	10
LISTA DE TABELAS .....	12
1. INTRODUÇÃO .....	15
1.1 Objetivos.....	16
1.1.1 Objetivos Gerais.....	16
1.1.2 Objetivos Específicos .....	16
1.2 Justificativa .....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	17
2.1 Revisão histórica .....	17
2.2 Processos de fundição .....	18
2.2.1 Fundição por areia a verde.....	19
2.2.2 Fundição por shell molding.....	22
2.2.2 Fundição por cera perdida.....	24
2.2.3 Fundição por gravidade em molde permanente .....	26
2.2.4 Fundição sob pressão .....	27
2.2.5 Fundição por centrifugação .....	28
2.3 Composição e características da areia verde .....	30
2.3.1 Grãos de areia.....	30
2.3.2 Propriedades da areia .....	31
2.4 Tipos de areia .....	31
2.4.1 Areia de faceamento .....	31
2.4.2 Areia de enchimento .....	32
2.5 Produção de modelos e moldes .....	32
2.6 Características de metais e suas aplicações na fundição .....	35
2.6.1 Ferro fundido .....	35

2.6.2 Alumínio .....	38
2.6.3 Cobre.....	38
2.6.4 Zinco.....	39
2.7 Variáveis do processo de fundição .....	40
2.7.1 Resfriamento e solidificação.....	40
2.7.2 Falhas e defeitos .....	41
2.7.3 Acabamentos superficiais e tratamentos térmicos .....	42
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
.....	48
4. RESULTADOS .....	52
4.1 Avaliação dimensional .....	52
4.2 Avaliação superficial .....	53
4.3 Análise geral do processo .....	56
5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	57
5.1 Conclusões.....	57
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	57
REFERÊNCIAS.....	59

# 1. INTRODUÇÃO

A siderurgia brasileira iniciou sua trajetória de desenvolvimento no início do século XX e consolidou uma importante posição no cenário internacional, ao ser reconhecida como uma das mais competitivas do mundo. Teve sua origem no processo de substituição das importações e, hoje, além de assegurar o pleno abastecimento do mercado interno, contribui de maneira decisiva para a balança comercial. As exportações brasileiras de aço, no primeiro trimestre de 2004, representaram 39% das vendas (JOHANNPETER, 2003).

De acordo com o Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES), a produção brasileira de fundidos é de 3 milhões de toneladas anuais, o que coloca o Brasil na sétima posição do ranking entre os maiores produtores globais. A indústria brasileira de fundição gera, aproximadamente, 60 mil empregos diretos. De forma isolada, a indústria de fundição responde por 3% do PIB industrial brasileiro, mas adquire maior relevância quando se consideram as principais indústrias que abastece, com destaque para a automotiva, que representa 23% do PIB industrial. Essas informações só reforçam o quão importante o processo é para a indústria em geral.

Segundo a PwC Brasil, os parques de produção de aço estão instalados em dez estados brasileiros. Entre eles, destacam-se os da Região Sudeste (Espírito Santo, Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo), que respondem por 94% do aço produzido no país e apresentam a maior concentração de empresas que atuam no setor. O Brasil tem o maior parque industrial de aço da América do Sul, composto por 29 usinas. O país é o maior produtor da América Latina e ocupa o 7º lugar como exportador líquido de aço. O Brasil exporta aço para cerca de 100 países tendo como maior concorrente a China, que é líder do mercado mundial de aço com uma produção equivalente a 46,3% do aço consumido no mundo em 2012.

Dentre os processos de fabricação, a fundição se destaca por permitir a produção de peças com grande variedade de formas e tamanhos (ex.: sinos, âncoras, tubulações, implantes ortopédicos, bloco de motor, miniaturas); peças de extrema responsabilidade como as que se destinam à indústria aeronáutica e aeroespacial (turbinas, por exemplo) e outras peças como por exemplo:

bueiros, bancos de jardim. A produção pode ser unitária (joias, implantes e peças artísticas) ou seriada, voltada principalmente para as indústrias mecânica e automobilística (GLORIA, 2000).

Este trabalho abordará o processo de fabricação de peças por fundição em areia a verde. Processo que é assim chamado por fabricar peças em moldes de areia umedecida. Nele será estudado e descrito todo o processo - desde a produção da areia, dos moldes até o tratamento final da peça - e os resultados assim obtidos experimentalmente em laboratórios da instituição (UFRB).

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivos Gerais**

O trabalho tem como objetivo central fazer uma abordagem prática do processo de fundição por areia a verde.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Estudar a produção de areias de moldagem a verde;
- Descrever o uso de caixas de moldagem para o processo de fundição por areia verde;
- Definir técnicas de produção de moldes e machos para fundição de metais;
- Caracterizar a utilização de aditivos para melhoramento da qualidade peça fundida.

## **1.2 Justificativa**

A principal matéria-prima desse projeto é o alumínio. O alumínio leva entre 100 e 500 anos para se decompor no solo, a poluição gerada pelo alumínio de material seria imensa com grandes prejuízos ambientais. Portanto, a reciclagem é de fundamental importância para o meio ambiente. A reciclagem não é vantagem só ambiental; ela traz consigo vantagens sociais e econômicas. Milhares de catadores de materiais recicláveis, organizados em cooperativas,

vivem atualmente desta atividade. Grande parte da renda destes trabalhadores tem como origem a reciclagem de latinhas de alumínio. A transformação de lixo em matéria-prima para o projeto, além de ajudar o meio ambiente, tem impacto direto na vida de quem vive da reciclagem. Vários segmentos de uma comunidade podem participar do programa de coleta seletiva. Cada um faz sua parte e se beneficia dos resultados. Exemplo disso é a parceria entre as prefeituras e as cooperativas ou associações que receberão os materiais selecionados. Empresas, escolas e condomínios também podem fazer parcerias com cooperativas e associações que, muitas vezes, podem se encarregar da retirada dos materiais (COELHO, *et al.*).

A iniciativa de trabalhar na área de fabricação mecânica é mais que enriquecedora. Tanto para a instituição (UFRB) quanto para os discentes que podem usufruir dessa experiência. Com o desenvolvimento da técnica de fundição em areia a verde na Universidade do Recôncavo da Bahia, possibilita a contextualização do conhecimento prático e especializado de metalurgia dentro da própria instituição, possibilitando o contato com esse tipo de fabricação. A participação de alunos em projetos como esse é essencial para a formação de um engenheiro mais competitivo para o mercado de trabalho.

O uso dos laboratórios dentro do curso de Engenharia, em especial Engenharia Mecânica, tem um papel fundamental na formação do aluno uma vez que permite, possibilita e aprimora a capacidade de tornar real o teórico, de tornar viável o problema e de se adaptar às mais diversas condições que se apresentarão quando do exercício da profissão.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Revisão histórica**

Antes de saber como obter o ferro pela fusão de seus minérios, o homem fazia ferramentas e armas de pedaços de meteoritos de ferro batidos. A fusão começou a existir na Ásia Menor por volta de 1500 a.C. e a arte se tornou amplamente conhecida por volta de 1000 a.C. Com o tempo, o homem aprendeu

como tornar o fogo mais quente soprando-o com um fole e a construir um forno permanente de tijolos em vez de meramente fazer um buraco no chão. Entre os outros aperfeiçoamentos estavam o acréscimo de um fundente, como a pedra calcária, à mistura de minério e carvão, para absorver as impurezas do minério, a invenção dos tenazes e marretas para trabalhar os tarugos de metal e a têmpera dos objetos de metal pelo seu aquecimento até à temperatura adequada com o esfriamento subsequente pelo mergulho na água. Até o fim do século XVIII, a maior parte das máquinas industriais era de madeira. O rápido desenvolvimento dos métodos de refinação e de trabalho do ferro abriu caminho a novas utilizações do metal e à construção de máquinas industriais e, por consequência, à produção em quantidade de objetos metálicos de uso geral. Em meio às guerras napoleônicas desenvolve-se a técnica do aço de cadinho, em 1815, cuja patente é reivindicada por Krupp (BRAGA).

A utilização de metais no Brasil começou no Século do Ouro do Brasil (século VXIII) após descobertas de jazidas de ouro, principalmente em Minas Gerais. Por determinação do Rei de Portugal houve uma taxação sobre a extração do ouro. Este imposto era cobrado nas Casas de Fundição. A primeira Casa de Fundição foi estabelecida em São Paulo, por volta de 1580, para fundir o ouro extraído das minas do Jaraguá e de outras jazidas nos arredores da vila. Sua função era recolher o ouro extraído pelos mineiros, purificar e o transformar em barras. A descoberta de ouro e o início da exploração das minas nas regiões auríferas, cidades começaram a surgir e o desenvolvimento urbano e cultural aumentou muito nestas regiões. Vários empregos surgiram diversificando o mercado de trabalho<sup>1</sup>.

## **2.2 Processos de fundição**

Os processos de fundição caracterizam-se por serem eventos em que está envolvida uma série de transformações físico-químicas. Estas transformações ocorrem tanto nas mudanças de fase, a que são submetidos os materiais utilizados no preenchimento do molde, quanto nas substituições de matéria. Considera-se, como substituição de matéria, a alternância de materiais, nas passagens de forma ou geometria: do modelo para o molde e do molde para o

produto, ou seja, as passagens da forma positiva para forma negativa e, novamente, para a positiva, com o cuidado de transferir ao material solidificado no interior do molde a exatidão da forma do modelo (GUILIANO, 2008).

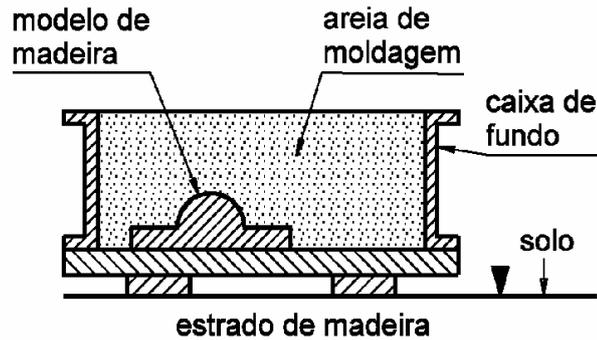
A escolha do processo para a fabricação de uma determinada peça fundida depende de muitos fatores como: quantidade de peças que serão fabricadas, tamanho/peso da peça, grau de complexidade, necessidade de precisão dimensional, acabamento superficial e, principalmente, o custo com equipamentos e tratamentos térmicos posteriores. E cada processo de fundição consegue fabricar peças completamente diferentes do outro. Cada processo tem sua particularidade que os dá a capacidade de produzir diversos tipos de peças que tem inúmeras funcionalidades.

### **2.2.1 Fundição por areia a verde**

De acordo com a Sinto Brasil Produtos Limitada (SINTO), a técnica de fundição mais comum é a moldagem em areia verde, que consiste em uso do molde feito em areia úmida e, em seguida, compactada.

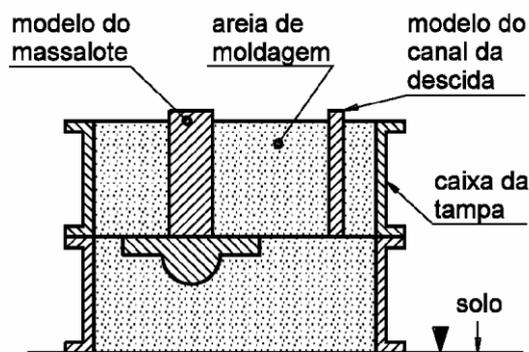
O Termo “verde” significa que a umidade foi acrescentada na areia e aglomerantes. Essa técnica é largamente utilizada devido à sua facilidade de uso, baixo custo e abundância de matéria-prima. A areia verde é a combinação da areia sílica com os agentes aglomerantes, em geral a argila, componentes estes normalmente baratos.

O processo de fundição consiste em liquefazer o metal desejado utilizando um cadinho (recipiente onde é depositado o metal), um forno e um queimador. A etapa inicial é a escolha da peça a ser reproduzida. A areia utilizada na compactação é uma mistura de areia de sílica a uma série de elementos: bentonita, pó de carvão, amido de milho e água. Essa areia é compactada por cima da peça numa caixa feita de madeira criando assim um negativo de areia, visto na figura 2.1.



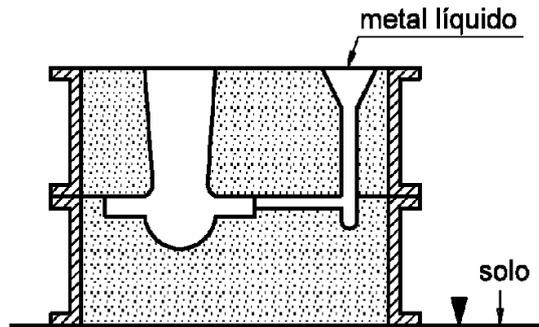
**Figura 2.1** – Primeira etapa da compactação (COSTA).

Essa caixa é facilmente desmontada para facilitar a remoção da peça final. A peça é removida e então o molde é criado pela compactação. Na caixa de areia vão também os dutos de alimentação (figura 2.2). Esses dutos levam o metal fundido até o negativo do molde. Os dutos são importantes para se ter certeza que todo o molde foi preenchido uniformemente, além de evitar deformidades na peça final.



**Figura 2.2** - Dutos de alimentação na caixa de areia (COSTA).

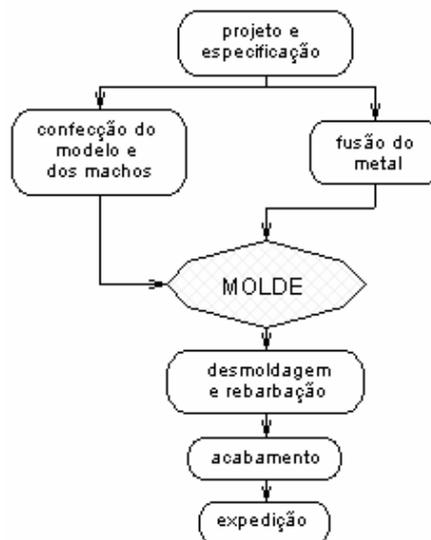
O metal então é despejado na caixa através dos dutos de alimentação no molde feito de areia a verde e por gravidade, o metal desce e preenche todo o espaço do molde conforme apresentado na figura 2.3.



**Figura 2.3** – Despejo de metal no molde de areia (COSTA).

O tempo de solidificação é influenciado pelo tamanho da peça fundida. Após o tempo de resfriamento, o molde é destruído; porém sua matéria prima não é desperdiçada e a peça final então é removida. Depois da desmoldagem, a peça vai para processos de acabamentos superficiais que incluem tratamentos térmicos e usinagem.

O fluxograma abaixo mostra o processo prático da confecção de uma peça pelo processo de fundição por areia.



**Figura 2.4** - Fluxograma da Produção de Peças Fundidas. (GLÓRIA, 2000).

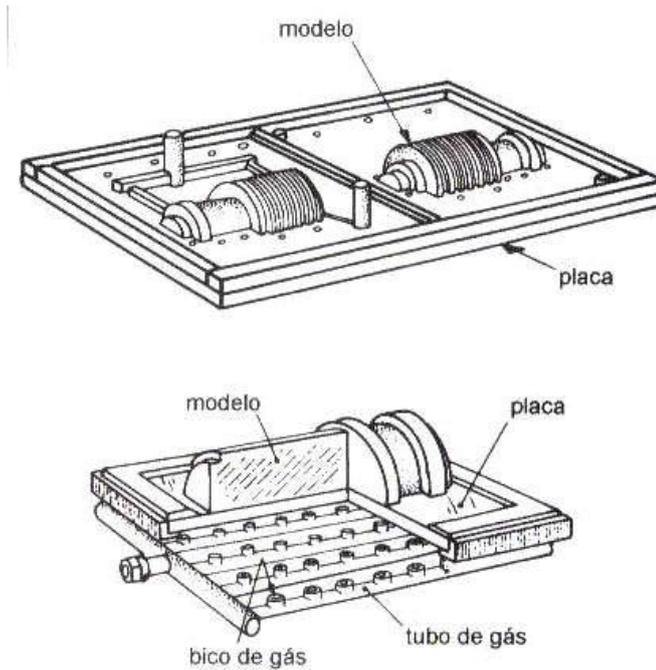
Após a utilização, praticamente toda a areia (98%) pode ser reutilizada. As vantagens do processo são: tem o mais baixo custo dentre todos os métodos, facilidade de reparo dos moldes e possui equipamentos mais simples. As desvantagens são: A areia natural é normalmente heterogênea, ou seja, sua

composição varia para cada parte, influenciando na qualidade das peças; acabamento superficial inferior que resulta em uma peça rugosa e uma maior deformação do molde (erosão) com peças de maior tamanho (MORO; AURAS, 2007).

### **2.2.2 Fundição por shell molding**

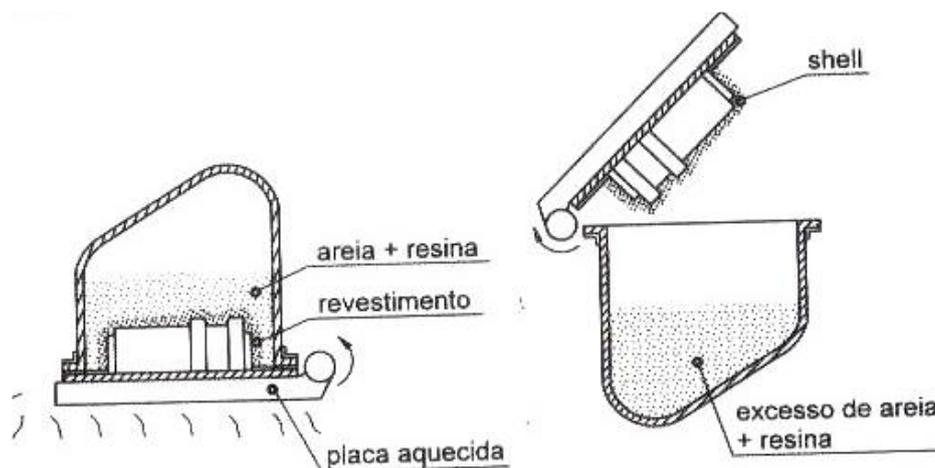
Shell Molding, ou moldagem em casca, é um processo usado para fundir com excelente precisão e baixo custo, desenvolvido em 1941 por Johannes Croning. O uso das resinas foi um grande aperfeiçoamento na utilização de areia para a produção de moldes de fundição. Por consequência da utilização de aglomerante, que é muito parecido com uma cola, a areia não precisa mais ser compactada pois esse aglomerante atua de forma a manter os grãos de areia juntos. A cura, também chamada de secagem, pode ser a quente ou a frio. A cura a frio é mais caro e utiliza substâncias ácidas e corrosivas como catalisadores da reação química, que exigem muito cuidado na manipulação porque são tóxicas. Por estas desvantagens é pouco utilizado. A cura a quente é chamada de “shell molding” (moldagem em casca). As resinas empregadas são normalmente do tipo poliéster, ureia formaldeído ou fenolformaldeído. A resina constitui-se de 3 a 10% do molde, sendo o restante constituído de areia-base, que deve ser isenta de argila ou impurezas e ser fina. Quanto mais fina a areia, maior será a permeabilidade da casca (MORO; AURAS, 2007).

Os moldes são feitos de metal para resistir ao calor e ao desgaste. Os moldes são presos em máquinas e são aquecidos através de bicos de gás até atingir a temperatura ideal para trabalho (entre 200 e 250°C), conforme a figura 2.5.



**Figura 2.5** – Processo de aquecimento do molde no processo shell molding (MORO; AURAS, 2007).

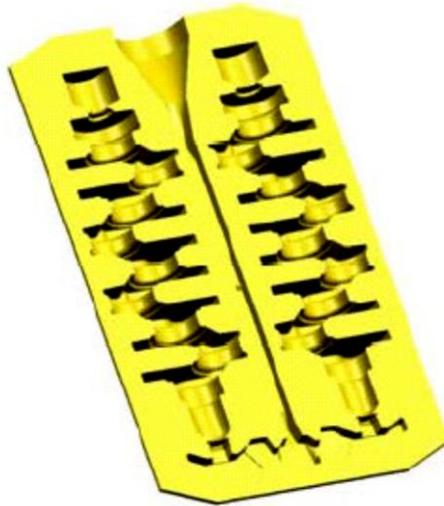
Em seguida, a placa é presa e girada junto com um reservatório que contém a mistura de areia e resina, fazendo com que a mistura envolva todo o modelo. Após algum tempo, o calor funde a resina sobre o molde formando assim uma casca com espessura de até 15mm. Esse processo pode ser visualizado na figura 2.6.



**Figura 2.6** – Processo de fabricação do modelo (MORO; AURAS, 2007).

A cura é feita numa estufa para o endurecimento completo da resina e após 2 ou 3 minutos a casca é extraída e está pronta para receber o metal

fundido e fabricar peças. Na figura 2.7, é possível ver um molde feito pelo processo de shell molding.

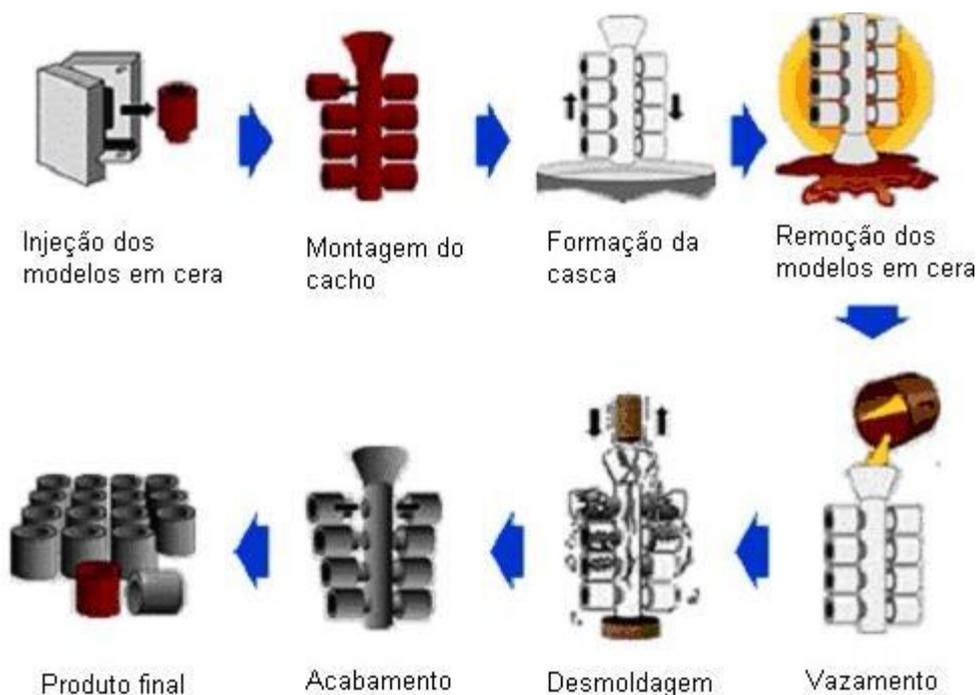


**Figura 2.7** – Molde para produção de virabrequim pelo processo de shell molding.

O processo de fundição por shell molding possui melhor acabamento que a moldagem em areia e é indicado para peças pequenas e complexas, porém exige maiores investimentos de equipamento e manutenção.

### **2.2.2 Fundição por cera perdida**

No processo de fundição por cera perdida um modelo é confeccionado diretamente em cera e, sobre este modelo, é construído um molde com material refratário, que depois de concluído, permitirá a remoção do modelo em cera de seu interior por fusão. Assim é formada a cavidade do molde, com a forma em negativo. Dentro da cavidade do molde é vazado o líquido, que irá solidificar, formando a peça em positivo. O molde é então destruído para a remoção da peça fundida (GLORIA, 2003). Esse processo é descrito na figura 2.8 abaixo.



**Figura 2.8** - Etapas do processo de fundição por cera perdida.

A fundição por cera perdida é um processo de moldação precisa que tem ganho uma importância crescente a nível mundial por razões econômicas. O método tem sido usado para fabricar peças cada vez maiores e ligas cada vez mais difíceis de fundir. Graças às vantagens econômicas, a fundição por cera perdida tem sido cada vez mais ponderada em análises comparativas de valor. Nenhum outro processo de fundição permite formas tão perfeitas. O design orientado pela fundição por cera perdida oferece muitas vezes soluções técnicas que de outra forma não seriam possíveis ou apenas a um preço superior. A fundição por cera perdida é utilizada principalmente para peças leves. Estas oscilam entre 1g e 10 kg. Permite pesos mais elevados de até 150 kg. O processo de fundição por cera perdida caracteriza-se por: liberdade de concepção quase ilimitada das peças fundidas, praticamente sem restrições em termos de materiais, elevado grau de precisão das dimensões devido à eliminação da linha de partição dos moldes que conduz muitas vezes a imprecisões, possibilidade de contornos internos de formas complexas pelo uso de núcleos de cerâmica, acréscimo mínimo de material nas superfícies a trabalhar além da elevada qualidade das superfícies.<sup>3</sup>

### 2.2.3 Fundição por gravidade em molde permanente

Os processos de fundição por molde permanente usam moldes metálicos para a produção das peças fundidas. Por esses processos realiza-se a fundição por gravidade ou por pressão. Usar um molde permanente significa que não é necessário produzir um novo molde a cada peça que se vai fundir. A vida útil de um molde metálico permite a fundição de até 100 mil peças. Um número tão impressionante deveria possibilitar a extensão de seu uso a todos os processos de fundição.

A utilização dos moldes metálicos está restrita aos metais com temperatura de fusão mais baixas do que o ferro e o aço. Esses metais são representados pelas ligas com chumbo, zinco, alumínio, magnésio, certos bronzes e, excepcionalmente, o ferro fundido. O motivo dessa restrição é que as altas temperaturas necessárias à fusão do aço, por exemplo, danificariam os moldes de metal. Os moldes permanentes são feitos de aço ou ferro fundido ligado, resistente ao calor e às repetidas mudanças de temperatura. Moldes feitos de bronze podem ser usados para fundir estanho, chumbo e zinco. Os produtos típicos da fundição em moldes permanentes são: bases de máquinas, blocos de cilindros de compressores, cabeçotes, bielas, pistões e cabeçotes de cilindros de motores de automóveis, coletores de admissão e principalmente lingotes. A figura 2.9 mostra tipos de lingoteiras feitas de metal.

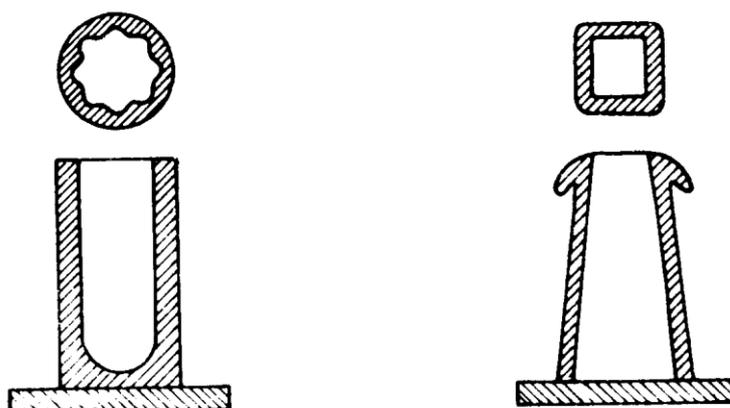


Figura 2.9 – Moldes permanentes: lingoteiras (CHIAVERINI,1986).

Esses produtos, se comparados com peças fundidas em moldes de areia,

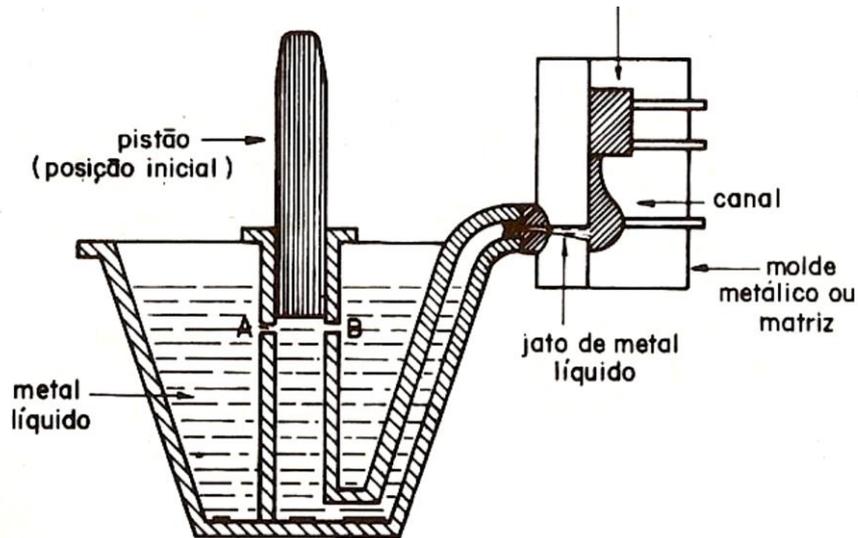
apresentam maior uniformidade, melhor acabamento de superfície, tolerâncias dimensionais mais estreitas e melhores propriedades mecânicas. Por outro lado, além de seu emprego estar limitado a peças de tamanho pequeno e produção em grandes quantidades, os moldes permanentes nem sempre se adaptam a todas as ligas metálicas e são mais usados para a fabricação de peças de formatos mais simples, porque uma peça de formas complicadas dificulta não só o projeto do molde, mas também a extração da peça após o processo de fundição.

Para fundir peças em moldes metálicos permanentes, pode-se vaziar o metal por gravidade. Nesse caso, o molde consiste em duas ou mais partes unidas por meio de grampos para receber o metal líquido. Isso pode ser feito manualmente. A montagem dos moldes também pode ser feita por meio de dispositivos mecânicos movidos por conjuntos hidráulicos, que comandam o ciclo de abertura e fechamento dos moldes. Tanto os moldes quanto os machos são cobertos com uma pasta adesiva rala feita de material refratário cuja função, além de proteger os moldes, é impedir que as peças grudem neles, facilitando a desmoldagem.<sup>4</sup>

#### **2.2.4 Fundição sob pressão**

O processo de Fundição sob Pressão (Die Casting) é o processo de manufatura que consiste na transferência do metal líquido para o interior de um molde metálico sob a ação de um pistão a elevadas pressões, obtendo-se, com isso, peças de alta característica mecânica e com tolerâncias dimensionais restritas. Através deste processo, paredes de espessura de até 1 mm podem ser conseguidas, além de uma baixa rugosidade superficial, proporcionando peças com excelente aparência, reduzindo em muito as operações complementares de acabamento superficial. Exatidão e intercambiabilidade é uma das principais vantagens do processo de fundição por pressão.

A figura 2.10 caracteriza uma máquina de injeção de metal fundido. O movimento vertical do pistão gera pressão sob o metal líquido que sobe e preenche toda a matriz metálica. O molde então é aberto e a peça é retirada.



**Figura 2.10** – Maquinário responsável pela injeção do metal em moldes permanentes (DEMARCHI).

Pela natureza desse processo se obtêm uma reprodução fiel de detalhes muito finos e uma exatidão das dimensões de todos os contornos. Em muitos casos após a fundição não é necessária usinagem de acabamento o que acaba baixando o custo da produção. O aspecto das peças fundidas por pressão se caracteriza pela sua limpeza e brilho. Porém podem aparecer falhas superficiais devido a um desenho incorreto além de ocorrer na superfície das peças pequenos desenhos os quais não são relevantes pois são apenas fluxo de metal líquido.

A Indústria automotiva têm sido as maiores consumidoras da fundição sob pressão, a maior parte das peças são à base de zinco, já a indústria aeronáutica recorre a grande quantidade de fundições com ligas de alumínio e magnésio. Esse processo tem como vantagens características a rapidez e baixo custo de produção, a alta precisão dimensional e possibilidade de automação do processo. Por outro lado; os moldes têm custo elevado, há uma limitação de peças com peso entre 0,25 a 25kg e limitação quanto as ligas utilizadas no processo (COSTA).

### 2.2.5 Fundição por centrifugação

É um processo de fabricação de tubos (mecânicos ou não), rolos, buchas,

onde o aço líquido é vazado em um molde metálico pré-aquecido e em movimento, se conformando nas paredes do mesmo em razão deste estar em movimento circular e sendo exercida sobre o metal a força centrífuga. A força centrífuga atua expulsando o metal (fuga do centro) para a extremidade, formando peças tubulares com seus diâmetros concêntricos, como está representado na figura 2.11. Esta última qualidade depende sempre das condições do molde (coquilha) e local de instalação da máquina de centrifugar, pois eventuais irregularidades nas rodas da máquina ou nas pistas de apoio da coquilha são automaticamente transferidas para o tubo, face as rotações de trabalho serem em média acima de 1000 rpm.

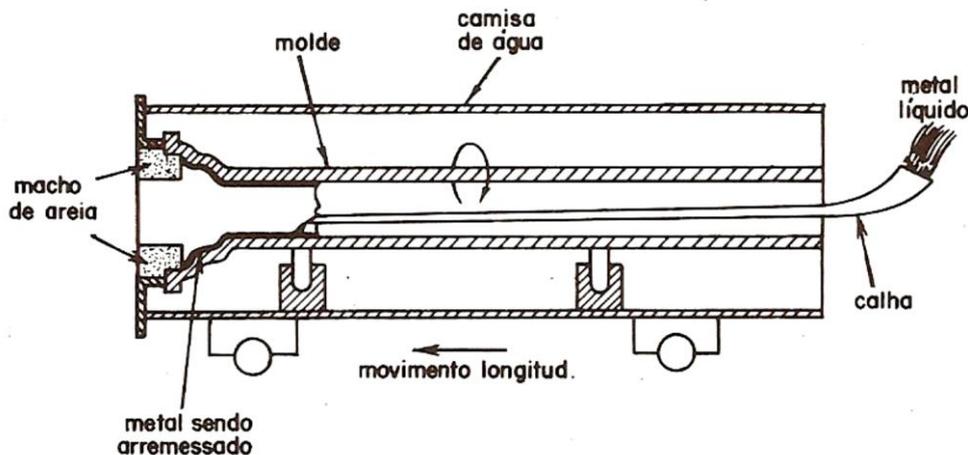


Figura 2.11 – Processo de fundição por centrifugação (DEMARCHI).

Em razão de se tratar de um processo que tem como característica principal a expulsão do metal (centrifugação) com o metal ainda líquido, a solidificação e contração se dão de forma rápida e homogênea, sempre de fora para dentro. Com isso o resultado é um material de acordo com as características mecânicas exigidas e isento das porosidades ou gases normalmente encontrados em materiais fundidos estaticamente. Uma das características mais marcantes desse processo é a velocidade, por isso é absolutamente possível e seguro organizar prazos de entregas mais curtos. Dependendo do peso e dimensão do tubo é possível se produzir 30 unidades por turno, a rotatividade é extremamente elevada. O vazamento do metal líquido no molde se dá em aproximadamente 28 Kg/seg. Portanto para um tubo de 200 Kg emprega-se 7 segundos apenas para fundição, somados a um tempo de centrifugação e solidificação não superior a 3

minutos. Já no caso de uma peça fundida em areia com o mesmo peso, o vazamento não tem a mesma velocidade, para uma fundição de boa qualidade emprega-se no mínimo 23 segundos para concluir a operação (VIANA, 2002).

## **2.3 Composição e características da areia verde**

Depois do metal fundido, a areia é o material mais importante no processo de fabricação. Seu processo de preparação é fundamental para o resultado final da peça desejada. 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 –  $CO_2$ , areias aglomeradas com cimento. A areia de moldagem é composta por quatro ingredientes principais: grãos de areia propriamente; aglomerante, que pode ser argila natural ou com resina ou cimento, aditivos e, água para ligar os grãos.

### **2.3.1 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 ( $SiO_2$ ), cromita ( $Cr_2O_3$ ) e, mais raramente, zirconita ( $ZrO_2SiO_2$ ), olivinas, chamotes, etc. Dentre estas, a areia de sílica é mais econômica, mas menos refratária. A Sílica ( $SiO_2$ ), principal componente da areia utilizada nesse trabalho, tem características que variam conforme sua formação geológica e a jazida do qual foi extraída. As areias em geral, e, particularmente as de sílica, vem 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 as 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 quartzitos 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) (OLIVEIRA, 2013).

### **2.3.2 Propriedades da areia**

A areia utilizada tem como principais propriedades: moldabilidade, resistência mecânica, permeabilidade difusão térmica e dureza.

Define-se por moldabilidade a capacidade que tem a areia de reproduzir as formas do modelo sob um determinado esforço de compactação, permitindo a obtenção de formas. 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. 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 provem 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. Difusão térmica, corresponde a 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. Dureza é a capacidade de resistir ao atrito do metal. O controle dessas propriedades garante um ótimo resultado final da peça (OLIVEIRA, 2013).

## **2.4 Tipos de areia**

### **2.4.1 Areia de faceamento**

Trata-se de uma areia que tem por finalidade cobrir o modelo, isto é, acaba por entrar em contato direto com o metal, motivo pelo qual deverá ter uma qualidade adequada não só para resistir ao seu ataque, mas também à extração do modelo, à colocação de machos, ao fechamento do molde e ao seu transporte até a linha de vazamento.

#### **2.4.2 Areia de enchimento**

Essa areia é usada unicamente para preenchimento da caixa de fundição e como não entra em contato direto com o molde, sua qualidade e refinamento pode ser inferior à areia de faceamento. Embora haja fundições que preparem esta areia tão bem quanto o faceamento, em grande parte dos casos somente se adiciona água à mesma e, muitas vezes, a sua preparação nem sequer é efetuada em misturador, e sim, diretamente no chão. Apesar de não entrar em contato com o molde, a areia de enchimento entra em contato com os canais de alimentação. Canais esses que são responsáveis por levar o metal fundido até o vazio criado pelo modelo, conseqüentemente, logo de imediato o metal acaba mesmo é atingindo a areia de enchimento, provocando a sua erosão (arraste; lavagem) e a sua posterior inclusão na peça e o aparecimento de outros defeitos na mesma. Portanto, o enchimento deveria ter a mesma composição do faceamento para garantir a qualidade final da peça fabricada (ROMANUS).

### **2.5 Produção de modelos e moldes**

A produção de modelos pode ser terceirizada por uma empresa especializada ou confeccionada pelo próprio responsável pela fundição. A terceirização é recomendada por haver presença de modeladores especialistas que tem a capacidade de produção otimizada. Apesar de tudo, é necessário que aja uma condição mínima de infraestrutura para manutenção e reparo dos componentes do modelo. Geralmente são utilizados para modelos e caixas de macho materiais como madeira (cedro, pinho e compensado, entre outros), metais (alumínio e aço, principalmente) e resinas do tipo epóxi (podem ser reforçadas com pó de alumínio, por ex.). A escolha dos materiais se diferenciam

quanto ao acabamento e durabilidade que conferem ao modelo. A durabilidade depende da complexidade e cuidado no manuseio e armazenamento. Como uma aproximação, a tabela 2.1 dá a informação do quanto, em média, um modelo, de um determinado material pode produzir (GLÓRIA, 2000).

**Tabela 2.1 – Durabilidade média dos modelos. Fonte: Metals Handbook, vol. 15**

<b>Material</b>	<b>Número de moldes</b>
Madeira	200-300
Madeira reforçada com metal	Até 2000
Alumínio ou resina epóxi	Até 6000
Ferro fundido/ aço	Até 100.000

Alguns processos de fabricação, como a fundição em casca, exigem trabalhar com o modelo pré-aquecido, assim o modelo tem que ser confeccionado numa liga metálica. Caso não exista nenhum tipo de restrição quanto ao material do modelo, sua escolha depende basicamente da quantidade de peças a serem fabricadas, das tolerâncias dimensionais e de acabamentos para a peça fundida. O custo do molde deve ser aplicado por todo o lote encomendado e assim a duração do modelo escolhido deve ser compatível com o número de peças a fabricar (GLÓRIA, 2000).

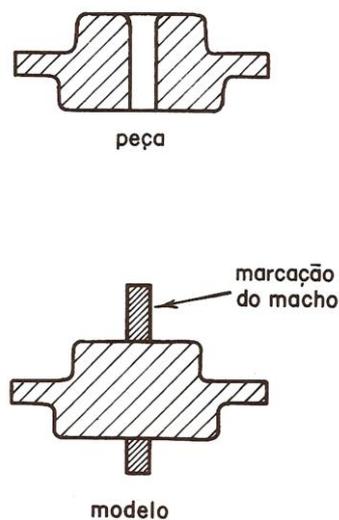
A contração é uma característica de praticamente todos os metais durante o resfriamento. Após a solidificação da peça, esta contração será responsável por alterações nas medidas originais do projeto e podendo até ocasionar trincas na peça. A tabela 2.3 apresenta valores de contração no estado sólido para alguns metais e espessuras de peça.

**Tabela 2.2 – Contração de metais referente a espessura. Fonte: Metals Handbook, vol. 15**

<b>Espessura aproximada da peça (mm)</b>	<b>Acréscimo médio na superfície do modelo (mm)</b>		
	<b>Aço</b>	<b>Ferro fundido</b>	<b>Não-ferrosos</b>
<b>Até 150</b>	2,3	2,4	1,6
<b>De 150 a 300</b>	4,8	3,2	1,6
<b>De 300 a 500</b>	6,4	4,0	2,4
<b>De 500 a 900</b>	6,4	4,8	3,2
<b>De 900 a 1500</b>	6,4	4,8	3,2

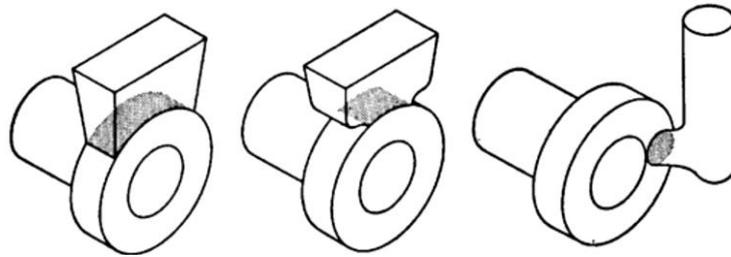
Dessa forma, o dimensionamento do modelo deverá levar em conta que haverá contração e o jeito mais simples de fazer isto é utilizar correções nas réguas métricas para cada tipo de metal.

Um componente importante na confecção dos moldes é o macho. O macho corresponde às cavidades que são necessárias nas peças fundidas (principalmente orifícios). Sua função no molde é formar uma seção cheia onde o metal não penetrará de modo que a peça apresente um vazio na região do macho (ROSSITI). Na figura 2.12, vem a marcação do macho para formação de um furo passante na peça que será fundida.



**Figura 2.12** – Marcação de macho no modelo (CHIAVERINI, 1986).

Quando o metal se resfria e contrai, a peça fica incompleta. Essa falta de material é concentrada numa região denominada rechupe. Para evitar ocorrência de rechupes, utiliza-se um sistema de alimentação que será mais necessário quanto mais maciça for a peça. Esse sistema de alimentação é chamado de massalote. Para ser eficaz, o massalote deve estar localizado junto à região que se solidifica por último, para que assim, o rechupe se localize no massalote e não na peça (GLÓRIA, 2000). Na figura 2.13, vemos diferentes opções de posicionamento de massalotes.



**Figura 2.13** – Três opções de posicionamento do massalote (FOUNDRY TECHNOLOGY).

## **2.6 Características de metais e suas aplicações na fundição**

Um conceito importante na fundição é a fundibilidade. Essa característica é definitiva na escolha do processo de fundição. Uma liga pode não ser fluida o suficiente para preencher, por gravidade, um molde de areia a verde, por exemplo. O conceito de fundibilidade engloba fluidez e tensão superficial, uma vez que o metal líquido terá que escoar dentro dos canais até chegar à cavidade do molde. De uma forma geral quanto maior a fluidez da liga maior será a tendência a que ela apresente boa fundibilidade.

É importante se conhecer as propriedades físicas como temperaturas de fusão e de vaporização, tendência à oxidação e densidade dos metais ou ligas metálicas pois estas influenciam na ordem de adições e na forma pela qual estas adições serão feitas.

### **2.6.1 Ferro fundido**

Pode-se definir ferro fundido como uma liga ferro-carbono, onde o carbono possui teores maiores que 2%, apresentando-se na forma de carbono combinado e carbono grafítico. O ferro fundido é considerado como uma liga ternária Fe-C-Si, uma vez que o silício aparece naturalmente junto com o carbono muitas vezes em porcentagem similar ou maiores que o próprio carbono (PUC-RIO).

A fusão de ferros fundidos é feita a partir de um carregamento consistindo basicamente de ferro-gusa, retorno de fundição (ou sucata interna) e sucata de aço, devidamente balanceados para obtenção da composição desejada. Além

disso são adicionadas ferro-ligas para correção de teores dos diversos elementos, sendo que o forno mais indicado para a preparação do metal é o forno de indução (GLÓRIA, 2000).

As propriedades destes produtos podem variar consideravelmente alterando a relação carbono-silício, adicionando elementos de liga metálicos e não-metálicos e variando seu processamento, bem como realizando tratamentos térmicos posteriores a solidificação (SERBINO, 2005).

. Existem 3 tipos de ferro fundido que serão classificados e descritos na tabela 2.3 abaixo.

**Tabela 2.3** – Tipos de ferro fundido e microestrutura típica. Fonte: SERBINO, 2005.

Tipo de ferro fundido	Microestrutura típica	Comentários
Branco	Todo carbono presente na liga encontra-se na forma de cementita ou outros carbonetos metálicos.	A sequência de solidificação e a microestrutura desses materiais podem ser interpretadas pelo diagrama de equilíbrio metaestável (Fe-Fe <sub>3</sub> C), com as modificações
Cinzento	As fases formadas na solidificação são austenita e grafita, conforme diagrama de equilíbrio estável, onde se obtém grafita em forma de veios.	Distinguem-se os teores de carbono grafítico e carbono combinado, cuja soma fornece o teor total de carbono desses ferros fundidos.
Mesclado	Quando a solidificação resulta na formação de regiões de ferro fundido branco e cinzento.	A região com ferro fundido cinzento se solidificou conforme o sistema estável (austenita-grafita) e a região com ferro fundido branco segundo o metaestável (austenita-carboneto).
Nodular	A grafita se apresenta na forma de nódulos no estado bruto de fusão.	Esta forma é decorrência da adição de certos elementos químicos ou condições particulares de fabricação, que modificam a forma de crescimento da grafita, não se obtendo grafita em veios como nos ferros fundidos cinzentos.
Maleável	Solidificam como nos ferros fundidos brancos, sendo posteriormente submetidas a um tratamento térmico (maleabilização), onde a cementita se decompõe em grafita e austenita.	Recebem, também a designação de ferros maleáveis de núcleo preto ou americano, e, ferro maleável de núcleo branco ou europeu.
Vermicular	Obtém-se, no estado bruto de fusão, através da adição de elementos de liga, a chamada grafita vermicular.	Esta morfologia é um produto intermediário entre a grafita em veios e a nodular.

### **2.6.2 Alumínio**

O alumínio, por suas excelentes propriedades físico-químicas – entre as quais se destacam o baixo peso específico, a resistência à corrosão, a alta condutibilidade térmica e elétrica e a infinita reciclagem - apresenta uma ampla variedade de utilização, que o torna o metal não-ferroso mais consumido no mundo. O alumínio puro, com o ponto de fusão 660°C, pode ser facilmente transformado, através de todos processos metalúrgicos normais, sendo assim viável à indústria manufatureira em qualquer forma que seja requerida.

Um dos aspectos que tornam as ligas de alumínio tão atraentes como materiais de construção mecânica é o fato do alumínio poder combinar-se com a maioria dos metais de engenharia, chamados de elementos de liga, formando ligas e a partir dessa combinação ser possível obter características tecnológicas ajustadas de acordo com a aplicação do produto final. O grande alcance das ligas oferece à indústria uma grande variedade de combinações de resistência mecânica, resistência à corrosão e ao ataque de substâncias químicas, condutibilidade elétrica, usinabilidade, ductibilidade, formabilidade.

O alumínio é amplamente utilizado no mundo moderno devido à sua excelente performance e propriedades superiores na maioria das aplicações, pois suas técnicas de fabricação permitem a manufatura do produto acabado a preços competitivos além de ser 100% reciclável. É utilizado em construção civil por ser um material leve, durável e resistente; em esquadrias e revestimentos; utilizados também na indústria automotiva, aeronáutica e marítima (ABAL).

### **2.6.3 Cobre**

O Cobre e suas ligas são o terceiro metal mais utilizado no mundo, perdendo apenas para os aços e para o alumínio e suas ligas. Suas principais características são as elevadas condutividades elétrica e térmica, boa resistência à corrosão e facilidade de fabricação, aliadas a elevadas resistências mecânica e à fadiga. Sua densidade é de 8,94 g/cm<sup>3</sup>, um pouco acima da do aço, e sua temperatura de fusão é de 1083°C. Existem vários tipos de liga de cobre. Os elementos de liga são adicionados ao cobre com o intuito de melhorar

a resistência, a ductilidade e a estabilidade térmica, sem causar prejuízos à formabilidade, condutividades elétrica e térmica e resistência à corrosão característica do cobre. As ligas de cobre apresentam excelentes ductilidade a quente e a frio, ainda que um pouco inferiores às do metal puro.

As ligas de cobre podem ser encontradas como produtos trabalhados mecanicamente, fundidos e metalurgia do pó. Entre os produtos trabalhados estão os arames, planos (placas, chapas, tiras e folhas), tubos, fio-máquinas, perfis extrudados e forjados. Já os produtos fundidos podem ser produzidos por vários métodos, tais como em areia, contínua, centrífuga, sob pressão, cera perdida, gesso e coquilha. O Cobre e suas ligas encontram aplicações nos mais diversos setores: construção civil, elétrica, automobilística, arquitetura, eletroeletrônica, mecânica, objetos decorativos, bélica, mineração, construção naval e exploração petrolífera, entre outras (INFOMET).

#### **2.6.4 Zinco**

As ligas de zinco geralmente utilizadas na indústria são denominadas de Zamac. Ligas metálicas cujo elemento principal é o zinco. Os principais elementos que são adicionados ao zinco para produção destas ligas são o alumínio, o cobre e o magnésio. Os teores destes elementos afetam diretamente as propriedades mecânicas das peças fundidas nestas ligas de zinco. Dependendo dos percentuais destes elementos adicionados ao zinco e do uso final, obtêm-se as principais e mais utilizadas ligas de Zamac.

O zinco é um metal relativamente denso, que apresenta excelente durabilidade. As ligas de zinco para fundição também são mais resistentes mecanicamente do que a maioria dos outros materiais. O alumínio é o elemento mais eficiente para acrescentar-se ao zinco, para aumentar a fluidez, produzir um refino de grão desejado na estrutura da liga fundida. O cobre aumenta a resistência mecânica, dureza e resistência a fluência. O magnésio é utilizado em baixas concentrações cujo objetivo principal é compensar os efeitos das impurezas metálicas e reduzir a corrosão intergranular. Também resulta em uma maior dureza e uma pequena redução na ductilidade. As peças fundidas em ligas de zinco, além de excelente resistência a várias condições agressivas, possuem

ótima qualidade e baixo custo de produção. Elas apresentam resistência considerável à corrosão e ao desgaste (ZINC METAIS).

## **2.7 Variáveis do processo de fundição**

### **2.7.1 Resfriamento e solidificação**

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 provocara 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. O modelo sempre deve ser confeccionado maior que a peça acabada por meio dos chamados, “acréscimos para contração”, ou seja, deve-se projetar a peça considerando essa dilatação. Embora a contração seja volumétrica, no valor de 3 vezes a contração linear, a correção para contração é expressa em termos lineares (OLIVEIRA, 2013).

A nucleação, que é o início da solidificação, é um fenômeno que pode ocorrer com a formação de núcleos diretamente a partir do líquido (nucleação homogênea) ou com a formação de núcleos sobre superfícies pré-existentes (nucleação heterogênea).

Na nucleação homogênea, o início da solidificação ocorre com a formação de núcleos sólidos estáveis que posteriormente crescem. Qualquer núcleo

momentaneamente formado com um certo tamanho tende a crescer. Este tamanho mínimo recebe o nome de raio crítico ( $R_c$ ).

A nucleação heterogênea se dá quando a solidificação ocorre a partir de superfícies pré-existentes, tais como as paredes do molde ou quando da presença de substratos, que são partículas sólidas no líquido (impurezas) (MORO; AURAS, 2007).

### **2.7.2 Falhas e defeitos**

Segundo Glória (GLÓRIA, 2000), a solubilidade dos gases tende a diminuir com a queda de temperatura, obrigando o gás a se recombinar durante o resfriamento, gerando bolhas e porosidades na peça fundida. Se as medidas tomadas visando a minimização da absorção de gases não forem suficientes para eliminar os defeitos citados, pode ser preciso desgaseificar o metal líquido antes do vazamento. Gases como o hidrogênio e o nitrogênio, causam um defeito chamado de pinholes. Os pinholes, de uma maneira geral, assemelham-se a pequenas bolhas arredondadas, de aspecto brilhante. No caso específico dos pinholes de hidrogênio, estes são detectados após a limpeza e durante a usinagem das peças, geralmente situam-se nas regiões em contato com o molde e o exame microscópico revela cavidades com um filme contínuo de grafita. Para esse processo de desgaseificação, utiliza-se aditivos, também chamados de fluxos, específicos para cada metal fundido. Uma outra saída para evitar gases é através do controle da umidade da areia do molde. Se a areia tiver permeabilidade adequada, os gases não criarão problemas.

Um outro defeito bastante comum é causado pela erosão do metal ao entrar em contato com a areia do molde. Essa erosão é comumente causada pelo uso de areia excessivamente seca, aliada a uma elevada velocidade de confecção dos moldes. O defeito aparece sob a forma de projeções irregulares na superfície do fundido, geralmente rugosas e normalmente situadas nas proximidades de ataques ou então na parte inferior da peça. O controle da granulometria, umidade e compactabilidade da areia solucionam esse problema (ROMANUS).

Se certos cuidados não forem tomados, a peça pode apresentar em sua totalidade ou localmente uma deformação, em relação ao que se esperava do

modelo. Essas deformações podem se repetir regularmente, sobretudo em regiões de diferentes espessuras. Essa deformação é consequência da contração do metal, causada por técnicas de desmoldagem malfeita ou muito rápida além de massalotes e moldes mal projetados. Ao adotar uma técnica de vazamento de maneira que a temperatura seja uniformemente distribuída, respeitar o tempo de resfriamento e projetar com cautela a peça, esse tipo de problema será evitado (JÚNIOR).

### **2.7.3 Acabamentos superficiais e tratamentos térmicos**

Após a solidificação as peças são desmoldadas e encaminhadas ao setor de acabamento. A desmoldagem pode ser feita manualmente com martelos e vergalhões ou com o auxílio de desmoldadores vibratórios. As etapas de acabamento compreendem o seccionamento dos canais (por impacto, prensa ou corte); a limpeza da peça por jateamento de areia ou de granalha de aço, seguido de rebarbação, tratamento térmico (opcional) e acabamento propriamente dito (usinagem, furação, etc.). Após cada uma dessas etapas as peças são inspecionadas e as com defeitos visíveis são separadas do lote. Dependendo da extensão dos defeitos e da especificação da peça, essas falhas podem ser reparadas por solda, por exemplo. Caso não haja alternativa, significa que a peça vai para o sucateamento e posterior refusão da peça (GLÓRIA, 2000).

Conhecer a temperatura de realização do tratamento térmico de uma liga metálica implica ter que trabalhar com o diagrama de equilíbrio ou de estado desse metal, pois cada liga possui o seu diagrama de transformação de fase. Outro fator determinante da temperatura de tratamento térmico é a microestrutura de interesse durante e ao término do tratamento térmico. O tempo necessário à execução de um tratamento térmico depende das dimensões da peça que receberá o tratamento, pois quanto maior a peça, maior será o tempo necessário para aquecê-la e austenitizá-la (no caso dos aços) e da microestrutura desejada.

Após a determinação do tempo total de aquecimento, a próxima etapa é obter a velocidade de resfriamento a ser empregada em um tratamento térmico. O tratamento térmico dependerá do tipo de material e da transformação de fase ou microestrutura desejada após o término do tratamento. Essa variável é a mais

importante pois é ela que determinará a microestrutura da liga a ser tratada, além da definição dos constituintes microestruturais do material depois que o processo for finalizado (VALE, 2011).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A presente sessão do trabalho tem o objetivo de detalhar os métodos empregados para se chegar a uma peça fundida; desde o processo da fabricação das caixas de fundição, a mistura que compõe a areia e até o acabamento final da peça fundida.

Para fundição do metal, foi utilizado um queimador de baixo custo associado a um forno (figura 3.1- a) e um cadinho (figura 3.1- b).



**Figura 3.1 (a)** – Associação do queimador e forno.



Figura 3.1 (b) – Cadinho.

As caixas de fundição (figura 3.2- a e 3.2- b) foram fabricadas em mdf. Essas caixas têm área transversal de  $300 \text{ mm}^2$  e altura de 70mm. As caixas tem apoios para facilitar o manuseio e contém dobradiças para a abertura e remoção da areia compactada. No centro de cada face interna, foram colocadas tiras de madeira para permitir melhor aderência da areia (figura 3.2 - c).



Figura 3.2 (a) – Caixa inferior.



Figura 3.2 (b) – Caixa superior.

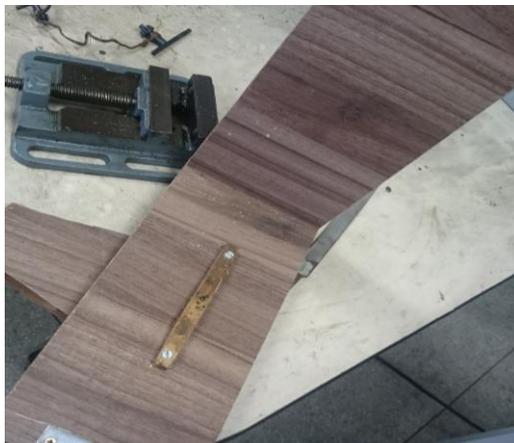


Figura 3.2 (c) – Parte da caixa mostrando os apoios usados para aderência areia.

Segundo Romanus, para a mistura de areia de sistema recomenda-se: areia base do tipo 60/70 AFS usada em construção civil e adquirida em lojas que comercializam materiais de construção, bentonita sódica – encontrada em areia higiênica para animais de estimação, pó de carvão e água. Para cada 100 gramas de areia, usa-se a seguinte proporção: 5 g de bentonita, 1,5 g de amido de milho, 2 g de pó de carvão. A água foi adicionada numa razão de 4% à esta mistura. Todos os materiais foram misturados em um recipiente grande o suficiente e misturados até alcançar um nível de homogeneidade da massa. Foram feitos muitos testes (tentativa e erro) para melhor aperfeiçoamento das características ideais para areia. Nas primeiras tentativas, o molde nunca ficava inteiro quando a peça era removida ou toda areia caía da caixa.

O processo de preparo do molde inicia-se apoiando a caixa inferior sobre uma superfície plana. Em seguida, o modelo a ser fundido é posto no centro da caixa e é incorporado o desmoldante sobre a peça, como mostra a figura 3.3. Após essa etapa, começa a compactação da areia sobre a peça. A figura 3.4 mostra a peça sendo coberta pela areia de faceamento que é adquirida peneirando a areia de sistema.



**Figura 3.3** – Aplicação do desmoldante (talco) sobre a peça.



**Figura 3.4** – Areia de faceamento sobre a peça.

Após cobrir a peça com areia de faceamento, o resto da caixa é completada com areia de sistema e compactada manualmente conforme pode ser visualizado na figura 3.5. A caixa então é virada de forma que o molde fique na face superior da caixa e possibilitando assim, a remoção do mesmo (figura 3.6).



**Figura 3.5** – Compactação da areia.



**Figura 3.6** – Caixa virada com a face do modelo.

O modelo é então removido com bastante cuidado para não causar erosão da areia e assim garantir a integridade do molde. Em seguida, com uma espátula, são criados canais de alimentação para o metal fluir e preencher todo o vazio. Na figura 3.7 observa-se, além dos canais de alimentação, o espaço criado por consequência da compactação da areia sobre o molde.



**Figura 3.7** – Em primeiro plano o molde e os canais de alimentação; no fundo, o modelo utilizado.

Um procedimento semelhante é feito com a parte superior da caixa de fundição. Só que, ao invés do modelo, são usados cilindros para a criação dos canais de alimentação e subida. Esses massalotes (reservas de material), situam-se sobre os canais de alimentação com intuito de evitar a erosão causada pelo contato do metal com a areia e não causar danos na peça. A figura 3.8 mostra exatamente os canais que orientam o metal até a peça.



**Figura 3.8** – Parte superior da caixa com os massal

A parte superior então é encaixada sobre a inferior fechando assim o sistema que compõe a caixa de fundição. O metal utilizado no processo de fundição, como matéria prima, foi o alumínio. Através de coleta em ferros-velhos, obteve-se massa necessária para fundir e fazer a peça. Foi feita uma estimativa de quanto material seria necessário fundir para a produção da peça. É recomendado o cálculo de volume da peça para que não falte material e a peça fique então incompleta. Logo depois, o metal é colocado dentro do cadinho e é levado até o forno para começar a fusão. Com a utilização de equipamentos de segurança, o cadinho então é removido, como vemos na figura 3.9, e apoiado sobre uma superfície segura para melhor manuseio (figura 3.10).



**Figura 3.9** – Retirada do cadinho do forno.



**Figura 3.10** – Apoio do cadinho.

Com o auxílio de tenazes fabricadas no laboratório, o material liquefeito então é vertido sobre um dos canais de alimentação até o preenchimento completo do molde. A confirmação do preenchimento do molde se dá quando o metal emerge pelo outro canal (figura 3.11).



**Figura 3.11** – Alumínio líquido vertido no molde.

Depois de respeitar o tempo de solidificação, a caixa é aberta para a remoção da peça através da quebra do molde em areia (figura 3.12).



**Figura 3.12** – Início da remoção da peça.

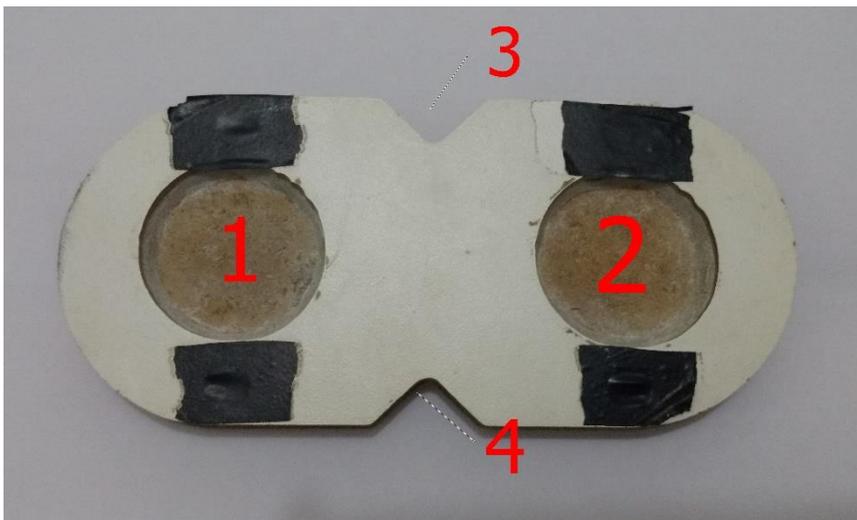
Com a peça fora do molde é realizada uma limpeza dos restos de areia remanescentes e é feito uma análise visual e dimensional que será discutida nos resultados do presente trabalho.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Avaliação dimensional

A análise dimensional é realizada de forma comparativa: entre modelo e peça final. Variações dimensionais devem ser avaliadas na hora da confecção do projeto do modelo. A depender das condições de uso, a peça requer tolerâncias dimensionais. Esta avaliação permite a adequação do modelo para compensar distorções dimensionais na peça acabada.

Foram utilizados um paquímetro ( $DE=0,02$  mm) e uma escala graduada ( $DE=1$  mm) para as medições. A tabela 4.1 mostra a comparação entre as medidas do modelo e da peça final fundida. As cotas comparadas presentes na tabela estão descritas na figura 4.1.



**Figura 4.1** – Modelo com representações das áreas.

Com a tabela 4.1 e com o auxílio da figura 4.1, pode-se constatar que houveram variações dimensionais do metal. A peça apresentou maiores medidas em quase todas as dimensões; exceto pelo comprimento (cotas 3 e 4) e pelos diâmetros que contraíram. A contração é uma característica dos metais e deve ser levado em conta no projeto do modelo.

**Tabela 4.1** – Comparação dimensional entre modelo e peça em mm.

	Comprimento	Largura	Altura	Diâmetro 1	Diâmetro 2	Espessura 1	Espessura 2
MODELO	168	76,57	16,90	42,14	42,23	6,46	6,76
PEÇA	168	76,92	20,65	41,63	41,50	7,85	7,90

Os dados apresentados na tabela 4.1 mostram que as distorções foram aceitáveis, dada a imperícia do pessoal responsável pela moldagem e desmoldagem do modelo. A maior distorção se deu na espessura da peça, onde por precaução contra desmoronamento do molde na etapa de retirada do modelo, o modelo foi altamente comprimido sobre a areia, fazendo com que ele se aprofundasse na areia. Isso resultou nessa diferença de 3,75mm. O mesmo ocorreu para as medidas de largura da peça que foram distorcidas devido ao processo de retirada do modelo. A granulometria elevada da areia também diminui a sua moldabilidade o que pode ter contribuído para tais resultados.

## 4.2 Avaliação superficial

A análise visual leva em conta a cor da peça, rugosidade e porosidade. Ela é constituída de inspeção da superfície do fundido juntamente com uma avaliação quantitativa de vazios e poros. Defeitos superficiais são causados quando o metal fundido entra em contato com a areia. Se o contato não for controlado melhorando a qualidade do molde e do metal fundido utilizando alguns aditivos, algumas reações (químicas e físicas) irão ocorrer e causar alguns efeitos colaterais sobre a superfície da peça. O controle da compactação e umidade da areia são fatores que alteram muito o resultado. Uma areia pouco compactada é facilmente lavada ao entrar em contato com metal, tornando a peça porosa. A falta de controle da granulometria da areia promove a formação de poros na superfície da areia. Devido a este fator é tão importante a atenção na produção do molde.

A peça apresentou uma coloração fosca, com aparência queimada (figura 4.2). Devido à falta de controle na temperatura de vazamento – que é a etapa que compreende a transferência do metal líquido do metal ao molde - e falta da utilização de aditivos redutores apropriados fez com que o resultado final fosse regular. Acabamentos superficiais como lixamento e pinturas suavizam a aparência da peça. A falta de aditivos na areia utilizada para compor uma atmosfera redutora quando da entrada do metal contribuíram para a cor encontrada.



**Figura 4.2** – Resultado final da peça.

Levando em consideração o uso de materiais de baixo custo, a peça final apresentou rugosidade também aceitável, como vemos na figura 4.3. Essa rugosidade pode ter sido causada por alguns fatores. Fatores como: desmoldante não apropriado, granulometria da areia excessiva para o processo, excesso de argila na mistura e também elevada friabilidade da areia do molde. O uso de teores de argila adequados, bem como a aplicação de um módulo de finura inferior a 60 AFS melhoraria o acabamento, diminuindo assim, a necessidade de usinagem posterior.



**Figura 4.3** – Detalhe da rugosidade da peça.

Foram observados poucos poros na superfície da peça fundida (figura 4.4). A produção de bolhas (causada por difusão gases), erosão, alta granulometria e controle da permeabilidade da mistura de areia são as principais causas da presença de poros na peça. Os gases causadores de bolha podem ser reduzidos misturando aditivos específicos ao metal fundido, como desgaseificantes. É importante também, o controle da permeabilidade da areia. Assim, os gases que não foram eliminados pelos aditivos, passarão pela areia com facilidade e serão eliminados fora do molde. A erosão está diretamente ligada a granulometria da areia, além de canais de ataques mal posicionados e uso da areia excessivamente seca.



**Figura 4.4** – Detalhe da peça com porosidade e erosão.

### **4.3 Análise geral do processo**

Apesar da falta de controle de alguns dos parâmetros que determinam a qualidade do processo, o resultado foi muito satisfatório pois a peça apresentou uma razoável aparência física em relação a cor, rugosidade e porosidade. Além disso, a peça variou muito pouco em respeito a dimensão, o que mostra que o processo pode sim ser utilizado para fabricação de peças que tem a necessidade de tolerância dimensional.

A peça não apresentou trincas nem vazios em nenhuma região, o que representa uma boa qualidade do metal liquefeito, dos canais de alimentação e vazamento no molde. O processo pode fabricar uma grande gama de peças, principalmente aquelas com complexidade geométrica.

O processo apresentou gastos financeiros apenas com o combustível que é queimado para fundir o metal, já que os demais insumos são obtidos por meio de descarte e o material fundido tem origem de sucatas.

Dessa forma, a fundição em areia a verde mostrou-se muito eficaz ao concluir com sucesso a fabricação da peça.

## **5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

### **5.1 Conclusões**

Esse trabalho teve o intuito de descrever o processo de fabricação mecânica por fundição em areia a verde, mostrando cada etapa que constitui o processo.

As análises constataram que o método, apesar de não ter sido feito com todos os materiais e condições recomendadas, resultou em uma peça completa, com uma boa aparência e com razoável resultado dimensional.

A menor variação de volume foi obtida na largura da peça, variação de 0,45% e a maior foi de 22,20% na altura da peça.

Todo o processo foi ensaiado em laboratórios da UFRB e mostra que é possível que turmas de graduação de engenharia, trabalhem com o mesmo tipo de projeto. Praticamente toda areia é reutilizada (cerca de 98%) e a matéria-prima que vai ser fundida pode ter origem vinda de reciclagem. A pesquisa é determinante no aprendizado de futuros engenheiros, tem custo de manutenção muito baixo e pode ser ponto de partida para outro processo de fabricação mecânica.

### **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Para alcançar a melhoria da qualidade da peça produzida pelo processo de fundição, são sugeridas algumas propostas de trabalhos futuros, como:

- Diminuição do volume da caixa de fundição (utilização menor de areia e maior velocidade para o processo);
- Melhoria da granulometria da areia de fundição, utilizando areia industrializada (melhor controle de compactabilidade, menor chance de erosão e ocorrência de poros);

- Utilização de um desmoldante mais adequado como grafite ou lycopódio em pó (o modelo se desprenderia da areia com mais facilidade deixando o contorno do molde melhor);
- Mistura de fluxos escorificantes e desgaseificantes no metal fundido (garantir o desprendimento dos gases antes do contato com a areia e eliminar impurezas na escória);

## REFERÊNCIAS

CARLOS FREIRE. **Cronologia do uso dos metais**. Disponível em: <[http://www.carlosfreire.com.br/carlosfreire/empresa\\_artigos\\_cronologia.asp](http://www.carlosfreire.com.br/carlosfreire/empresa_artigos_cronologia.asp)>. Acesso em: 28 mar. 2016.

GIULIANO, José Antonio Schenini. **OS PROCESSOS DE FUNDIÇÃO, COMO FERRAMENTA NA OBTENÇÃO DE ESCULTURAS EM METAL**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, [S.L], p. 15, 2008.

CASOTTI, Bruna Pretti; FILHO, Egmar Del Bel; CASTRO, Paulo Castor De. Indústria de fundição: situação atual e perspectivas. **BNDES Setorial**, [S.L], v. 33, p. 28, mar. 2011.

PEKELMAN, Helio; JR, Antônio Gonçalves Mello. A IMPORTÂNCIA DOS LABORATÓRIOS NO ENSINO DE ENGENHARIA MECÂNICA. **COBENGE2004**, São Paulo – SP, p. 8, mai. 2004.

RECICLOTECA. **Alumínio**. Disponível em: <<http://www.recicloteca.org.br/material-reciclavel/met/aluminio/>>. Acesso em: 01 mai. 2016.

JOHANNPETER, Jorge Gerdau. Cronologia do Desenvolvimento científico, tecnológico e industrial brasileiro. **O desenvolvimento da siderurgia no Brasil**, Brasília, p. 27, .200. undefined.

<sup>1</sup>RECEITA FEDERAL DO BRASIL. **Casa de fundição**. Disponível em: <<http://www.receita.fazenda.gov.br/memoria/administracao/reparticoes/colonia/casafundicao.asp>>. Acesso em: 01 mar. 2016.

<sup>2</sup>COELHO, M. D. R. F. et al. **Coleta seletiva**. 2 ed. São Paulo-SP: GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE COORDENADORIA DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL, 2013. 28 p.

<sup>3</sup>ZOLLERN. **Fundição por cera perdida**. Disponível em: <<http://www.zollern.de/br/fundicao-forjado/fundicao-por-cera-perdida.html>>. Acesso em: 24 abr. 2016.

<sup>4</sup>COSTA, Fernando Febeliano da. **Tecnologia Mecânica**. Centro Paula Souza, São Paulo - SP, 2000.

Fundição sob pressão. **Departamento de Engenharia Mecânica - Fundição**, Curitiba, mai. 2000.

MORO, Norberto; AURAS, André Paegle. **Processos de fabricação**. Fundição, Florianópolis, jan./01. 2007.

VIANA, Flávio. **FUNDIÇÃO CENTRIFUGADA**. FV TEcnologia, [S.L], p. 1-11, 200. undefined.

OLIVEIRA, Bruno Ferraz De. Fundição. **Rede e-tec**, Belém, p. 27-31, 2013.

ROMANUS, Arnaldo. Areia de Moldagem a Verde: Tipos, Composições, Matérias-Primas e Variáveis de Processo. **Foundry cursos e orientações**, [S.L], jun. 2013

SERBINO, EDISON MARCELO. UM ESTUDO DOS MECANISMOS DE DESGASTE EM DISCO DE FREIO AUTOMOTIVO VENTILADO DE FERRO FUNDIDO CINZENTO PERLÍTICO COM GRAFITA LAMELAR. **Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia**, São Paulo, p. 51, mar. 2005.

PUC-Rio. **Ferros Fundidos**. Rio de Janeiro. Disponível em: <[http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/3721/3721\\_3.PDF](http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/3721/3721_3.PDF)>. Acesso em: 03 jun. 2016.

PWC. Siderurgia no Brasil. **Um panorama do setor siderúrgico brasileiro**, Rio de Janeiro, jun./jul. 2013.

ABAL. **Fundamentos e aplicações do alumínio**. São Paulo. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM233/N%E3o%20Ferrosos/Fundamentos%20produ%E7%E3o%20e%20caracterisiticass%20do%20Aluminio.pdf>>. Acesso em: 06 jun. 2016.

INFOMET. **Resumo: cobre e suas ligas**. Disponível em: <<http://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codassunto=109>>. Acesso em: 06 jun. 2016.

ZINC METAIS. **Zamac**. Disponível em: <<http://www.zincmetais.com.br/produtos/zamac/>>. Acesso em: 06 jun. 2016.

VALE, Alan Rafael Menezes Do. Tratamento Térmico. **E-Tec**, Belém, p. 73-77, fev./mar. 2011.

JÚNIOR, ARNALDO FERREIRA BRAGA. DEFEITOS EM PEÇAS FABRICADAS PELO PROCESSO DE FUNDIÇÃO. **II workshop labmat da area de fundição**, [S.L].