



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

RAÍRA MORAIS ALCÂNTARA NUNES

FUNDIÇÃO DE PRECISÃO UTILIZANDO CINZA VOLANTE DE
TERMOELÉTRICA PARA A PRODUÇÃO DE PEÇAS DE ZINCO COM
GEOMETRIA COMPLEXA

FORTALEZA

2021

RAÍRA MORAIS ALCÂNTARA NUNES

**FUNDIÇÃO DE PRECISÃO UTILIZANDO CINZA VOLANTE DE
TERMOELÉTRICA PARA A PRODUÇÃO DE PEÇAS DE ZINCO COM
GEOMETRIA COMPLEXA**

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Jeferson Leandro Klug

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

N928f Nunes, Raíra Morais Alcântara.

Fundição de precisão utilizando cinza volante de termoelétrica para a produção de peças de zinco com geometria complexa / Raíra Morais Alcântara Nunes. – 2021.
39 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2021.

Orientação: Prof. Dr. Jeferson Leandro Klug.

1. Fundição. 2. Reciclagem. 3. Zamac. 4. Refratário. 5. Fundição de precisão . I. Título.

CDD 669

RAÍRA MORAIS ALCÂNTARA NUNES

**FUNDIÇÃO DE PRECISÃO UTILIZANDO CINZA VOLANTE DE
TERMOELÉTRICA PARA A PRODUÇÃO DE PEÇAS DE ZINCO COM
GEOMETRIA COMPLEXA**

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: __/__/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr.-Ing. Jeferson Leandro Klug
(Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ricardo Emílio F. Quevedo Nogueira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

MSc. Samuel Lucas Santos Medeiros
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelos dons que me deu nesta existência que serviram na realização deste projeto.

Sou grata aos meus pais Magnólia Morais e Reginalder Alcântara, a minha avó Efigênia Morais e a minha madrastra Nazaré Lima por sempre me incentivarem e acreditarem que eu seria capaz de superar os obstáculos que a vida me apresentou e por todo o esforço investido na minha educação. Sem vocês a realização dos meus sonhos seria muito mais difícil.

Aos meus saudosos avós Valderis Nunes e Regina Alcântara, a minha saudosa tia Daniella Alcântara.

Agradeço ao meu namorado Erik Bom'fim que acima de tudo é um grande amigo, sempre presente nos momentos difíceis com palavras de incentivo. Sem você, a realização do mesmo teria um caminho muito mais tortuoso, muito obrigado.

Quero agradecer também à Universidade Federal do Ceará e todo o seu corpo docente. Gostaria de fazer um agradecimento especial ao Antônio, secretário do curso de Engenharia Metalúrgica, pois sou grata pela confiança depositada e por me manter motivada durante todo o curso. Agradeço ao meu orientador, Jeferson Leandro Klug por sempre estar presente para indicar a direção correta que o trabalho deveria tomar.

Aos componentes da banca examinadora Prof. Ricardo Emílio F. Quevedo Nogueira e Prof. Samuel Lucas Santos Medeiros.

Ao LAF por disponibilizar seu espaço e seus equipamentos para a realização do trabalho, à CAPES, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio. Agradeço também ao Professor Ricardo Emílio Nogueira do Laboratório de Cerâmicas Avançadas e da equipe do curso de Design.

Gostaria de deixar o meu profundo agradecimento a empresa Aço Cearense, que foi a empresa que me acolheu por um período de dois anos durante o estágio, em especial aos meus gestores Rodrigo Sucupira, Aluízio Carlos e Hiury Martins por terem me acompanhado durante todo o estágio, por terem confiado no meu trabalho e terem contribuído de maneira muito significativa para os meus conhecimentos acadêmicos e profissionais. Gostaria de agradecer também a todos os supervisores e operadores que me ajudaram a conhecer cada vez mais os processos de conformação mecânica.

Aos meus amigos da UFC e de estágio, Danier, Ana Larissa, Kalyne, Tito, William, Péricles, Mazangela e Rayane que compartilharam todos os momentos de felicidade e luta

durante a graduação e que sempre me ajudaram no período de formação, aos meus amigos Érika, Nathalia e Patrocínio, por toda ajuda e apoio durante este período tão importante e por toda a trajetória na vida.

“A menos que modifiquemos à nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.

(Albert Einstein).

RESUMO

O processo de fundição por cera perdida é caracterizado pelo excelente acabamento superficial e pela estreita tolerância dimensional das peças. Tais fatores devem-se principalmente à facilidade da cera em copiar detalhes e à reprodução destes através da casca cerâmica. Deste modo, o conhecimento da relação entre processamento, microestrutura e propriedades das cascas cerâmicas é de fundamental importância. Este trabalho tem como foco o desenvolvimento de novas técnicas de fundição de precisão, visando a obtenção de peças metálicas, por meio de vazamento por gravidade e que tenham como característica formal uma geometria complexa, redução de custos utilizando materiais reciclados, como sucatas e cinzas residuais de termoelétrica para a fabricação da casca refratária. Ademais, ocorreu a preparação das peças modelo, a produção de moldes com auxílio de silicone industrial, preparação das peças em cera e canais de vazamento, fabricação da casca cerâmica refratária, vazamento da liga metálica (Zamac), obtenção da peça rústica e processo de usinagem. Desse modo, concluímos nosso projeto dando utilidade para um material poluente e reciclando sucata de zinco e, por consequência, baixando os custos desse processo e podendo haver, também, a geração de emprego para comunidades carentes.

Palavras-chave: Fundição; Reciclagem; Zamac; Refratário, Fundição de precisão.

ABSTRACT

The investment casting process is characterized by an excellent surface finish and close dimensional tolerance of the pieces. This is mainly due to the wax's ease of copying details and their reproduction through the ceramic shell. Therefore, the knowledge of the relationship between processing, microstructure and properties of ceramic shells is of fundamental importance. This work focuses on the development of new precision casting techniques, aiming to obtain metallic parts, by means of gravity casting and which have a complex geometry as a formal characteristic, cost reduction using recycled materials, such as scrap and residual ash. thermoelectric plant for the manufacture of refractory shell. In addition, there was the preparation of the model parts, use of silicone for the production of molds, preparation of the parts in wax and pouring channels, manufacture of refractory ceramic shell, casting of the metallic alloy (Zamac), obtaining of the rustic part and machining process. In this way, we concluded our project by using a polluting material and recycling zinc scrap and, consequently, lowering the costs of this process and there may also be the generation of jobs for needy communities.

Keywords: Casting; Recycling; Zamac; Refractory; Investment casting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Figura representativa dos moldes de fundição de precisão.....	19
Figura 2 - Representação de fornos de cadinho utilizados nos processos de fundição.....	21
Figura 3 - Estrutura de grãos característica de uma liga fundida, mostrando segregação dos componentes de liga na região central do fundido.....	24
Figura 4 - (a) Dendrita originada na solidificação; (b) Aspecto típico da seção de um lingote; (c) Efeito dos cantos na cristalização.....	25
Figura 5 - Peça modelo em madeira.....	30
Figura 6 - Peça em madeira sendo colada no copo descartável.....	30
Figura 7 - Silicone líquido sendo vazado.....	31
Figura 8 - Molde de silicone industrial.....	32
Figura 9 - Cera líquida vazada no molde de silicone.....	32
Figura 10 - Modelos consumíveis em cera.....	33
Figura 11 - Modelo consumível em cera com canal de vazamento.....	33
Figura 12 - Forno.....	35
Figura 13 - Casca cerâmica refratária após secagem e queima.....	36
Figura 14 - Forno artesanal.....	36
Figura 15 - Peça fundida rústica.....	37
Figura 16 - Peça fundida usinada.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplos de peças que utilizam a fundição como processo de fabricação.....	16
Tabela 2 - Proporções em volume das amostras.....	34
Tabela 3 - Análise da cinza.....	35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVOS.....	14
2.1 Objetivo geral.....	14
2.2 Objetivos específicos.....	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1 Fundição – Generalidades.....	15
3.2 Vantagens do processo de fundição.....	15
3.3 Aplicações dos processos de fundição.....	16
3.4 Principais processos de fundição.....	17
3.5 Fundamentos da fundição.....	17
<i>a) Modelagem.....</i>	<i>17</i>
<i>b) Modelo.....</i>	<i>18</i>
<i>c) Refratário.....</i>	<i>18</i>
<i>d) Molde em fundição de precisão.....</i>	<i>18</i>
<i>e) Fusão.....</i>	<i>19</i>
<i>f) Fornos de cadinho.....</i>	<i>20</i>
<i>g) Vazamento.....</i>	<i>21</i>
<i>h) Sistema de alimentação.....</i>	<i>21</i>
<i>i) Solidificação.....</i>	<i>23</i>
3.6 Cristalização no processo de fundição.....	24
3.7 Defeitos que ocorrem durante o processo de fundição.....	25
3.8 Fundição de precisão por cera perdida – Investment casting.....	26
3.9 Vantagens do processo de fundição por cera perdida.....	26
3.10 Etapas do processo de fundição por cera perdida.....	27
3.11 Zinco e suas ligas metálicas – Zamac	27
<i>a) Classificação da liga Zamac.....</i>	<i>29</i>
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
4.1 Preparação das peças modelo.....	30
4.2 Preparação do silicone para a produção dos moldes	31
4.3 Preparação das peças em cera e dos canais de vazamento.....	32
4.4 Preparação da casca cerâmica refratária.....	33
4.5 Preparação do molde final.....	35
4.6 Produção do forno.....	36
4.7 Fusão e vazamento da liga metálica.....	37
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5.1 Obtenção da peça metálica rústica e processo de usinagem.....	37
5.2 Processo de usinagem.....	37
6 CONCLUSÃO.....	39
7 REFERÊNCIAS.	40

1. INTRODUÇÃO

A indústria de fundição é responsável pela maior parte das atividades industriais por todo o mundo. Se um dado produto não é produzido diretamente pelo o processo de fundição, há grande probabilidade de que os equipamentos que são utilizados para o seu fabrico usem peças originárias do processo de fundição.

Fundição é um processo pirometalúrgico de fabricação de peças metálicas que consiste em elevar a temperatura do metal a ponto de que ele chegue no estado líquido e assim, o mesmo é vazado em um molde refratário. Um dos métodos mais conhecidos é a fundição de precisão ou Investment Casting, que consiste em formar uma casca cerâmica refratária para ser utilizada como molde. Desse modo, obtém-se um revestimento da peça desejada. Portanto, ocorre uma maior precisão no resultado final do processo, ou seja, podendo-se fabricar peças com nível elevado de detalhes. Num método mais artesanal a lama refratária é composta por areia, gesso e pó de tijolo aglomerados com água e manta acrílica. Essas composições são únicas, adaptando às preferências de cada fabricante. Embora o processo artesanal já seja de baixo custo, ainda são válidas alternativas que barateiem ainda mais esse método, visto que ele é utilizado por pequenos empresários ou produtores autônomos. No método a ser pesquisado, foi utilizado um resíduo da termoelétrica, cinza volante, aplicada à lama refratária substituindo o pó de tijolo. Tal substituição foi aplicada, visto que os materiais possuem granulometria semelhante e alto ponto de fusão. A vantagem de se utilizar a cinza volante nesse processo é que, atualmente, ela não possui nenhum uso comercial, sendo descartada no meio ambiente como poluente.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo utilizar cinzas volantes proveniente de termoelétrica como material refratário na composição de cascas cerâmicas para a produção de peças de zinco com geometria complexa.

2.2 Objetivos específicos

Obter uma casca refratária utilizando um dos componentes um resíduo de termoelétrica.

Desenvolver técnicas para a obtenção de modelos consumíveis.

Desenvolver um forno artesanal para o processo de fusão da liga metálica.

Obter uma peça fundida com geometria complexa.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Fundição – Generalidades

A origem do processo de fundição pode ser rastreada até o início da civilização. Alguns exemplos do processo de fundição foram aplicados a alguns objetos de cobre representando certos animais ou vasos na Mesopotâmia de 3500 aC. Os fatos comprovam que é uma das tecnologias de fabricação mais antigas que existem. No entanto, durante séculos, ela foi usada apenas para produzir peças decorativas, obras de arte e ferramentas básicas. Essa tecnologia passou por um grande desenvolvimento durante a Segunda Guerra Mundial no século 20, até atingir a capacidade de produzir peças fundidas para as indústrias aeroespacial, aviação, médica e, posteriormente, em várias indústrias.

Esta tecnologia consiste “numa técnica de obtenção de uma peça de uma determinada forma através do vazamento de um metal ou liga metálica no estado líquido para o interior de uma moldação, que possibilita a sua solidificação de uma forma estável em termos dimensionais e geométricos”. Sendo, numa forma simples, a aplicação do princípio de Arquimedes “O líquido toma a forma do vaso que o contém”.

A fundição é uma das tecnologias mais comumente usadas para a fabricação de peças e componentes de metal. A indústria de fundição possui diversos métodos para obter diversos objetos a serem produzidos, mas os conceitos acima são inerentes a cada um deles. Os produtos de metal que sempre atendem aos seguintes propósitos possuem características mecânicas, microestruturais, geométricas, dimensionais, acabamento superficial e tolerâncias geométricas e dimensionais especificadas em desenhos técnicos.

3.2. Vantagens do processo de fundição

O processo de fundição por cera perdida compete com a maioria dos processos de conformação e oferece algumas vantagens únicas. Os benefícios deste processo incluem liberdade de projeto, estreitas tolerâncias, excelente acabamento superficial, reprodutibilidade, redução de custos com minimização ou eliminação de usinagem e montagem de peças (Bidwell, H.T., 1997).

As principais vantagens do processo de fundição:

- A peça já vai pronta para a usinagem e ou montagem;
- Baixo risco de empenamento;
- Possibilidade de fabricar em ligas de aços e ferros especiais (específicas para cada projeto);

- Fácil fabricação em ligas de ferro fundido cinzento e nodular;
- Quando substituído o aço por ferros fundidos, há uma redução de peso das peças, devido à diferença de densidades;
- Após a elaboração do modelo, a fabricação torna-se rápida;
- Redução da necessidade de mão de obra interna especializada.
- Podem apresentar formas externas e internas desde a mais simples até a mais complexa.
- Podem apresentar dimensões limitadas somente pelas restrições das instalações onde serão produzidas.
- Podem ser produzidas dentro de padrões variados de acabamento e tolerância dimensional (entre $\pm 0,2$ e $0,6$ mm).
- Possibilita grande economia de peso, porque permite a obtenção de paredes com espessuras quase ilimitadas.

3.3. Aplicações dos processos de fundição

A série de funções proporcionadas por esta tecnologia permite que seja utilizada em diversas situações completamente distintas. As peças fundidas às vezes ficam escondidas em máquinas e outros equipamentos, que são usados não apenas para a produção de outros objetos, mas também para o uso diário de qualquer cidadão. A Tabela 1 mostra de forma concisa uma pequena parte das aplicações convencionais que utilizam este processo de fabricação.

Tabela 1: Exemplos de peças que utilizam a fundição como processo de fabricação.

FERRO FUNDIDO CINZENTO	AÇO	LIGAS METÁLICAS	LIGAS DE COBRE
Motores de veículos	Equipamentos ferroviários	Aviões	Equipamentos elétricos
Equipamentos agrícolas	Veículos a motor	Refrigeração	Equipamentos de transporte
Máquinas, ferramentas	Ar condicionado	Indústria aeroespacial	Peças decorativas
Válvulas		Motores	

Fonte: Autor.

3.4. Principais processos de fundição

As transformações dos metais e ligas em peças para utilização em elementos e conjuntos mecânicos são inúmeras e variadas, é evidente que a fundição é acompanhada por diversos processos e etapas onde a escolha adequada de cada passo depende da geometria da peça, do tipo de liga a ser fundida, do número de peças a ser produzida e da qualidade superficial desejada. (BALDAM; VIEIRA, 2014).

Principais processos da fundição são:

- Fundição em molde de areia;
- Fundição de precisão (cera perdida);
- Fundição de moldes permanentes por gravidade;
- Fundição sob pressão;
- Fundição centrífuga;
- Fundição contínua ou lingotamento contínuo;
- Fundição no estado semissólido – tixoconformação;

3.5. Fundamentos da fundição

a) Modelagem

A primeira etapa da fundição é a modelagem que muitas das vezes são feitas artesanalmente e onde se utiliza o desenho técnico da peça a ser fabricada. Para Chiaverini a modelagem “*Consiste em projetar a peças a ser fundida, levando em conta os fenômenos que ocorrem na solidificação do metal no interior do molde, de modo a evitar que os defeitos que aparecem nas peças solidificadas*”. (CHIAVERINI, 1914, p. 9)

A etapa de modelagem tem como princípios:

- Fabricação do molde com a cavidade que será preenchida.
- Deve-se levar em consideração a contração do metal na solidificação;
- Molde de areia: cavidade-modelos de madeira em torno do qual a areia é conformada; Moldes metálicos: cavidade é usinada;
- Partes ocas – machos-peças de areia aglomerada (com ligantes) - dentro do molde – etapa de macharia;
- No molde: canais de alimentação, respiro, etc.

De acordo com Weiss (2012), a etapa de modelagem é a que deve levar em conta os detalhes da peça, o design que dará a forma da peça, e é a etapa em que o profissional deverá estar ciente de que o material que foi selecionado suportará a contração do metal fundido e que para as peças que passarão por algum tipo de usinagem deve prever um sobre-metal no modelo. (WEISS, 2012)

No processo de modelagem ou modelação permite construir uma réplica das peças que seja fundida, tendo a finalidade de imprimir as formas e dimensões das peças no molde de fundição e composto pelo modelo da peça, modelo dos canais de alimentação e modelo dos massalotes. (BALDAM; VIEIRA, 2013)

b) Modelo

O modelo será utilizado para construir o molde sendo uma peça padrão. Deve ser escolhido um material de fácil obtenção e fácil usinabilidade, e deve ser levado em conta o tamanho e geometria da peça que se deseja fabricar. Utiliza-se diversos materiais para a sua construção, tais como, aço, alumínio, madeira, isopor e resina. (WEISS, 2012)

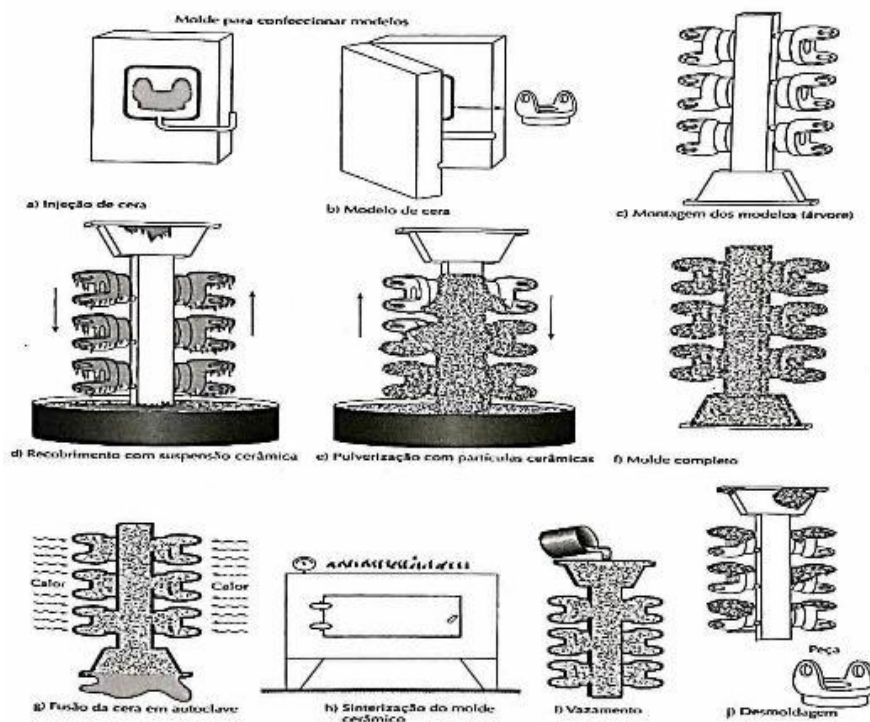
c) Refratário

O refratário é onde o molde é feito e o metal fundido é despejado no estado líquido no recipiente. Há uma cavidade no molde que possui o formato da peça a ser fabricada, e cada tipo deve ser selecionado de acordo com a necessidade e o tipo de processo de fundição.

d) Molde em fundição de precisão

Por meio desta etapa, é possível uma produção em massa de peças com geometria complexa que não são capazes de serem feitos em outros processos convencionais, tendo acabamento praticamente final. A figura 1 nos mostra a representação dos moldes de fundição de precisão.

Figura 1: Figura representativa dos moldes de fundição de precisão.



Fonte: Kiminame, Castro e Oliveira (2013, p. 51)

Durante o processo de *Investment Casting* irá ser utilizado um molde cerâmico feito pelo revestimento consumível de cera com uma argamassa refrataria que endurece ao ser calcinada, assim o modelo de cera é fundido e a cera escorre deixando uma cavidade com formato da peça formando o molde. (KIMINAME; CASTRO; OLIVEIRA, 2013)

e) Fusão

“A fusão da liga é uma importante etapa do processo de fundição porque está diretamente relacionada à qualidade da peça fundida” (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013, p. 31).

A fase de fusão deverá ser rigorosamente processada, pois as propriedades e a microestrutura da peça fundida dependem dela e do processamento. Para que ocorra a certificação da propriedade do metal fundido que será vazado dentro do molde seja o específico, é necessário o conhecimento das composições e da pureza do metal utilizado. No caso da utilização de sucatas, torna-se crítico o processo de controle da composição química e muita das vezes envolve análise química de amostra do metal fundido antes do vazamento.

Durante o processo de fusão, há uma produção de gases e, na fundição, deseja-se reduzir a quantidade de gases no metal. Portanto, para que isso ocorra, uma das medidas a

serem tomadas é manter baixa a temperatura de superaquecimento, fazendo com que haja uma redução do fluxo do metal fundido, reduzindo o contato com o ar, evitando, assim, o defeito de porosidade na peça fundida.

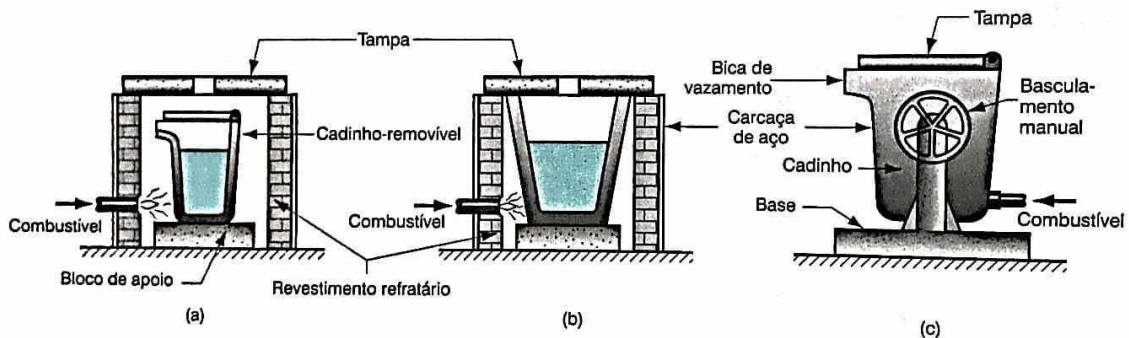
De acordo com Kiminame, Castro e Oliveira (2013), há alguns processos que ajudam na remoção dos gases dissolvidos do metal fundido antes do vazamento. Tal processo é conhecido por desgaseificação a vácuo, onde o metal fundido é colocado em um ambiente com baixa pressão e o gás dissolvido no metal irá tender a sair para estabelecer o equilíbrio com o ambiente. Além da técnica de desgaseificação, há uma outra técnica que irá tratar da introdução de bolhas de gases inerte ou reativo entre o metal fundido, causando a redução dos gases dissolvidos. Outro processo será fazer com os gases dissolvidos reaja com alguma coisa que resulte em um composto de baixa densidade e que flote no metal fundido, podendo ser removido na superfície juntamente com a escória. (KIMINAME; CASTRO; OLIVEIRA, 2013)

f) Fornos de cadinho

Segundo Groover (2014), os fornos de cadinho são chamados de fornos indiretos a combustão, pois ele funde o metal sem contato direto com o combustível.

Os fornos de cadinho são fabricados com material refratário ou de aço-liga resistente a alta temperatura. No caso do cadinho removível, este será colocado no forno e será aquecido para fundir a carga metálica. Após o processo de fusão, o cadinho será retirado do forno e irá ser utilizado como panela de vazamento. O forno cadinho pode possuir capacidade de poucos a toneladas, mas o predomínio deles são de 1.000 kg, sendo eles comum na fundição, pois seu custo é baixo. Tais fornos são utilizados para fundir materiais não ferrosos como, alumínio, bronze, latão e ligas de zinco. A figura 3 mostra a representação desses fornos de cadinho. (BALDAM; VIEIRA, 2014)

Figura 2: Representação de fornos de cadinho utilizados nos processos de fundição.



Fonte: Groover (2014, p. 134).

g) Vazamento

“A propriedade do metal em fluir e preencher o molde é conhecida como fluidez” (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013, p. 34).

O processo de vazamento é considerado uma etapa crítica na fundição. Depois da etapa de fusão o metal fundido está pronto para ser vazado por meio do sistema de canais e na cavidade do molde. Vale ressaltar que para que a etapa de vazamento seja concluída com sucesso, será necessário que o metal fundido ocupe todas as regiões do molde antes do processo de solidificação.

A etapa de vazamento irá depender de alguns fatores, como a composição química da liga, temperatura de fusão, intervalo de solidificação, superaquecimento a sua fluidez, temperatura de vazamento, velocidade de vazamento e turbulência.

h) Sistema de alimentação

O sistema de alimentação é uma etapa que possibilita a distribuição do metal na cavidade de um molde e minimiza a problemática da turbulência do metal fundido e garante o preenchimento total do molde, reduzindo os efeitos de erosão, a oxidação do metal e aprisionamento de gases na cavidade do molde. Para garantir a qualidade da peça fundida não é apenas construída uma cavidade no molde, mas várias outras partes no molde constituído por um sistema de alimentação. Todas as partes constituintes do sistema de alimentação são especificadas com as geometrias, dimensões e posições em relação à cavidade do molde. Posteriormente, o metal é vazado na bacia de vazamento passando pelo canal de decida com geometria cônica, permitindo haja um fluxo constante do fluido. O metal passa primeiramente pelo canal de distribuição, onde nessa parte existe vários detalhes que irá aprisionar a escória que tenha sido vazado junto com metal. Nos canais de ataque é a parte onde o metal fundido

entra e se distribui para a formação da peça desejada, e esta área é projetada para garantir um fluxo sem turbulência, velocidade equalizada e pressão o suficiente para preencher toda a cavidade.

i. Turbulência

As turbulências durante o escoamento de fluidos são caracterizadas por haverem variações erráticas na magnitude e na direção da velocidade do fluido. O fluxo é agitado e irregular ao invés de ter um fluxo suave e contido. O processo de turbulência durante a etapa de vazamento deverá ser evitado, pois tende a acelerar a formação de óxidos metálicos que poderão ficar aprisionados durante o processo de solidificação, agrava a erosão do molde, ocorre o desgaste gradual das superfícies do molde devido ao impacto do fluxo de metal fundido.

ii. Superaquecimento

O superaquecimento é a diferença entre a temperatura no vazamento do metal fundido e a temperatura na qual o processo de solidificação tem início. Tal diferença de temperatura é algumas vezes referida como superaquecimento e tal termo é utilizado também para a quantidade de calor que deverá ser removida do metal fundido entre o vazamento e o início da solidificação.

iii. Temperatura de aquecimento

A temperatura de vazamento é temperatura do metal fundido no momento em que seja vazado em um molde e é determinada pelo superaquecimento a ser utilizada no processo. O superaquecimento deve ser bem especificado, pois com a temperatura baixa pode fazer com que o metal se solidifique sem que preencha o molde completamente ou se estiver com temperatura excessivamente alta pode trazer diversos tipos de problemas e desvantagens, tipo, aumento de salubridade de gases no metal, gerando bolhas e porosidade, aumento do consumo de energia na produção, aumento de reação do metal com o molde e possibilidade de aumento de fluxo turbulento do metal fundido durante o preenchimento do molde que podendo aprisionar ar dentro do metal e do molde. (KIMINAME; CASTRO; OLIVEIRA, 2013).

iv. Taxa de vazamento

A vazão na qual o metal fundido é despejado no molde denomina-se de taxa de vazamento. Por tanto, se a taxa for muito lenta o metal para de fluir e não completa a

cavidade, já se a taxa for muito alta causa turbulência e conseqüentemente ocasiona diversos problemas. A turbulência no escoamento do fluido é caracterizada por variações erráticas na magnitude e deve ser evitada pois é agitado e irregular ao invés de ser suave e contínuo. A turbulência pode agravar erosão do molde e desgastes gradual da superfície do molde devido ao impacto do fluxo do metal, e conseqüentemente afetando a geometria da peça a ser fundida. (GROOVER, 2014).

i) Solidificação

“A solidificação envolve a transformação do metal líquido novamente para o estado sólido. O processo de solidificação difere se o metal for um elemento puro ou liga” (GROOVER, 2013, p. 107).

Após a fusão e vazamento o metal esfria e solidifica, tal etapa denominada solidificação. Alguns aspectos são associados a esta etapa, o tempo para o metal solidificar, contração de solidificação, solidificação direcional e projeto de massalote.

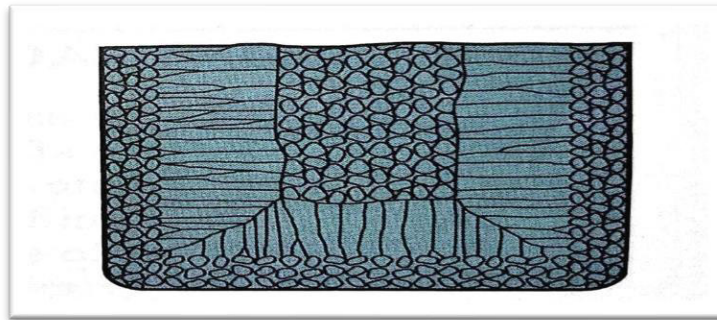
Nesta etapa o processo de solidificação difere se o material for um elemento puro ou uma liga. Neste trabalho iremos trabalhar com a liga de zinco Zamac.

i. Solidificação de ligas metálicas

“A maioria das ligas solidifica numa faixa de temperatura ao invés de numa única temperatura” (GROOVER, 2013, p. 108).

A etapa de solidificação tem início quando a temperatura do metal líquido cai, e a temperatura *liquidus* é completada quando a temperatura *solidus* é alcançada. No início da solidificação, devido ao grande gradiente de temperatura na superfície, a parede fina sólida formada cresce direccionalmente em direção à parede do molde, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3: Estrutura de grãos característica de uma liga fundida, mostrando segregação dos componentes de liga na região central do fundido.



Fonte: Groover (2014, p. 134).

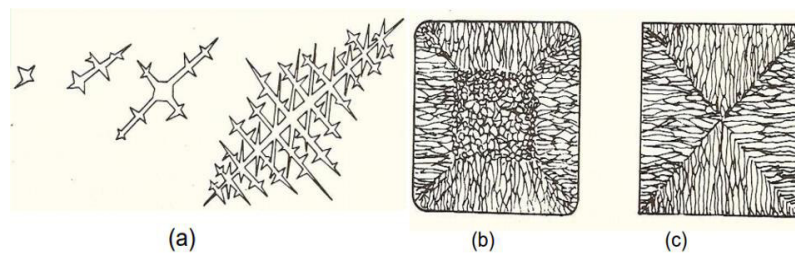
De maneira microscópica, a composição química do metal irá variar ao longo da peça fundida, sendo mais rico num dado componente as regiões que solidificam primeiro, ou seja, as partes mais próximas das paredes do molde que é onde há transferência de calor. Em contrapartida, quando a solidificação ocorre na parte central, o metal líquido estará empobrecido naquele elemento de liga, ocorrendo uma segregação geral ao longo da seção transversal, sendo denominada segregação de lingote.

3.6. Cristalização no processo de fundição

O processo de cristalização consiste na aparência da primeira unidade de célula cristalina que atua como núcleos para o crescimento dos cristais, que eventualmente levam a grãos finais e à estrutura granular típica dos metais.

O crescimento dos cristais não ocorre de maneira uniforme, ou seja, a velocidade de crescimento não é a mesma em todas as direções, variando de acordo com os diferentes eixos cristalográficos. Quando falamos de fundição, no interior de um molde, o crescimento é limitado pelas paredes do mesmo. Esse crescimento não uniforme tem como resultado núcleos metálicos e os grãos cristalinos com aspectos dendríticos, como representados na figura 4. (CHIAVERINI, V, 1914)

Figura 4: (a) Dendrita originada na solidificação; (b) Aspecto típico da seção de um lingote; (c) Efeito dos cantos na cristalização.



lingote; (c) Efeito dos cantos na cristalização.

Fonte: CHIAVERINI, V (1914, p.2)

As dendritas irão ser formadas em maiores quantidades até que se encontrem. O crescimento das dendritas será impedido pelo encontro com as dendritas vizinhas dando origem, assim, aos contornos de grãos que irão delimitar cada grão cristalino, formando uma massa sólida. (CHIAVERINI, V, 1914)

De acordo com a figura 5, nos itens (b) e (c), os efeitos indesejáveis irão resultar do fato dessas diagonais constituírem planos de maior fragilidade, fazendo com que durante a operação de conformação mecânica a que essas peças são submetidas posteriormente, como na laminação, possa surgir fissuras que inutilizam o material. Esse inconveniente é evitado arredondando-se os cantos.

3.7. Defeitos que ocorrem durante o processo de fundição

Durante o processo de fundição podemos nos deparar com alguns defeitos, como:

- Inclusão da areia do molde nas paredes internas ou externas da peça.
- Defeitos de composição da liga metálica que causam o aparecimento de partículas duras indesejáveis no material.
- Rechupe
- Porosidade
- Gota fria
- Juntas frias
- Segregação
- Trincas
- Inclusões de gases

3.8. Fundição de precisão por cera perdida – Investment casting

A fundição por cera perdida é uma técnica fundição utilizada para a fabricação de peças em que a liga metálica ou o metal são sujeitos a altas temperaturas até atingirem o estado líquido e, então, o mesmo será colocado em um molde tal qual o objeto que se deseja produzir. A fabricação do molde é feita aplicando uma lama cerâmica em torno de um modelo (que poderão ser consumíveis ou não) para construir o molde que será utilizado. Para a produção dos moldes existem dois métodos distintos: molde sólido e casca cerâmica. Os moldes sólidos, geralmente, são mais utilizados para a área odontológica e de joias, e as cascas cerâmicas são mais utilizadas no setor industrial. Quanto aos modelos são consumíveis, pode-se agrupá-los em cera e plásticos. A cera é o material mais utilizado, caracterizando assim o processo de fundição por cera perdida denominado também de micro fusão. Em muitos casos, depois da fundição, o objeto produzido é submetido à usinagem para que sejam feitos ajustes dimensionais ou para que a peça seja conformada mecanicamente, tornando possível, assim, a obtenção das dimensões finais.

Esse processo utiliza-se de alguns tipos de metais que são, ligas de alumínio, ligas de zinco, cobalto, níquel, titânio, aço carbono e aços inoxidáveis.

A cera perdida ganhou a preferência de diferentes indústrias em todo o mundo, pois este processo fornece inúmeras vantagens, mas há uma em destaque, que é a capacidade de produzir partes ricas em detalhes e usar ligas difíceis para mesclar. Sendo assim, o processo de cera perdida apresenta grandes resultados, com custos mais interessantes em comparação com outros processos de fundição, sendo uma solução técnica interessante para atender às necessidades de diferentes indústrias.

3.9. Vantagens do processo de fundição por cera perdida:

Como já comentado anteriormente, apesar da técnica de cera perdida seja conhecida há muitos anos, de uns tempos para cá ela vem ganhando cada vez mais destaque no setor de fundição, justamente por apresentar inúmeras vantagens, como:

- Reprodução de qualquer peça;
- Praticamente não existem restrições em relação aos materiais a serem fundidos;
- Grau de precisão elevado, principalmente no que se relaciona às dimensões das peças, muitas vezes eliminando-se a partição dos moldes (o que pode levar a imprecisões);
- Possibilidade de contornos internos e de formas complexas;

- Qualidade elevada das superfícies.

3.10. Etapas do processo de fundição por cera perdida.

O processo de fundição por cera perdida segue as seguintes etapas:

- Produção do modelo de cera;
- Montagem da “árvore” ou cacho de modelos;
- Produção da casca refratária;
- Deceragem - retirada da cera do molde;
- Sinterização do molde para aumento da resistência da casca e retirada de resíduos de cera;
- Fusão e Vazamento;
- Quebra da casca refratária;
- Acabamento;
- Inspeção.

3.11. Zinco e suas ligas metálicas – Zamac

As ligas metálicas são materiais formados pela mistura de dois ou mais componentes, dos quais pelo menos um é metal. O metal deve, ainda, ser encontrado em maior quantidade na mistura.

Elas são criadas a partir do aquecimento entre os componentes da liga até os seus respectivos pontos de fusão, de modo conjunto ou isolado, seguido de esfriamento e solidificação.

As ligas se caracterizam por fornecer ou modificar propriedades que os metais não apresentam. Dentre estas características destacam-se:

- Condutividade elétrica e térmica;
- Resistência à corrosão;
- Brilho;
- Resistência mecânica;
- Temperatura de fusão.

Entre os metais não ferrosos, o consumo mundial de zinco só é superado por alumínio e cobre. O metal apresenta baixo ponto de fusão (420° C), fato que restringe seu emprego em diversas aplicações de engenharia devido a fatores como fluência, amolecimento

e modificações de fase, que surgem com o aumento da temperatura. No entanto, contraditoriamente tal característica foi determinante para tornar o zinco o quarto tipo de metal mais empregado, tendo em vista a redução de custos em termos de extração e refino de seu minério e de fundição e conformação mecânica de suas ligas devido às baixas temperaturas necessárias. Outra característica que amplia muito a empregabilidade do metal é sua facilidade em ser combinado de forma eficiente com diversos outros metais, tais como nos latões (Cu-Zn) e nas ligas Zamac. (SOARES, O. J. A, 2008)

Zamac ou Zamak é a denominação genérica de diversas ligas metálicas, contendo basicamente zinco (Zn), Alumínio (Al), Magnésio (Mg) e Cobre (Cu). O nome Zamak vem de Zink-Aluminium-Magnesium-Kupfer (zinco, alumínio, magnésio e cobre, em alemão, respectivamente). Mas, no Brasil é mais utilizada a nomenclatura com o final C (Zamac). Os teores destes elementos de liga, como comentado anteriormente, afetam diretamente as propriedades mecânicas das peças fundidas nestas ligas de zinco. (BRAGA, E. M. G. F., 2015)

As ligas Zamac foram descobertas no início da década de 30 e são empregadas até hoje devido a sua boa resistência à corrosão, à tração, ao choque e ao desgaste unida à facilidade em ser usinada, conformada mecanicamente e, principalmente, fundida. O principal motivo para a fundição do material ser tão favorecida, já mencionado, é seu baixo ponto de fusão, que faz com que sua fundição demande pouca energia e possa ser realizada em moldes metálicos permanentes por técnicas de maior qualidade do que a fundição convencional em areia, tais como injeção e centrifugação. As ligas Zamac possuem também uma faixa estreita de solidificação, permitindo moldagens com tempos de ciclo muito rápidos, apresentam ótima fluidez e são facilmente revestidas por pintura ou eletrodeposição. Tudo isso possibilita a obtenção de peças de formato complexo, com ótimo acabamento superficial, sem defeitos, com bom desempenho, elevada produtividade e sem desgastar muito o ferramental em contato com o material. (BRAGA, E. M. G. F., 2015)

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. 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. (SOARES, O. J. A, 2008)

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. É o segundo elemento com maior proporção nas Ligas Zamac. Aumenta sua fluidez, refina o grão,

evita formação de composto intermetálico de ferro e zinco, o qual aumenta o desgaste das ferramentas e máquinas que processam o Zamac. Além disso, aumenta a resistência mecânica e dureza do zinco. (BRAGA, E. M. G. F., 2015)

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. Diminui a susceptibilidade à corrosão intergranular causado pelas impurezas. Não deve exceder muito 0,06% porque pode comprometer o alongamento da peça, ocasionar fragilização a quente e diminuir a fluidez. (BRAGA, E. M. G. F., 2015)

O cobre aumenta a resistência mecânica, dureza e resistência a fluência. Aumenta a resistência mecânica, à corrosão, à fluência e a dureza da liga. Por outro lado, diminui sua ductilidade. (BRAGA, E. M. G. F., 2015)

As impurezas, como chumbo, cádmio e estanho estão associados ao minério de zinco e, dessa forma, permanecem em pequenas quantidades no zinco. Essas impurezas são metais de alta densidade e baixo ponto de fusão, que tendem a segregar nos contornos de grão. As fases ali formadas têm um ponto de fusão muito baixo e ainda são levemente mais nobres que o zinco, promovendo a corrosão intergranular do Zamac. Devido aos efeitos negativos, as impurezas devem ser mantidas sempre em níveis baixos para não comprometer o desempenho da liga. (BRAGA, E. M. G. F., 2015)

a) Classificação da liga Zamac

As ligas de Zamac podem ser subdivididas em cinco tipos:

- Zamac 2: Possui a maior dureza e resistência à tração, ocasionado pelo elevado teor de cobre. Pela mesma razão, é frágil e possui baixa resistência ao impacto, o que limita seu uso. (SOARES, O. J. A, 2008)
- Zamac 3: Ótima combinação entre resistência, fundibilidade e facilidade de pintura. Possui maior estabilidade dimensional que o Zamac 5. (SOARES, O. J. A, 2008)
- Zamac 5: Diferencia-se do Zamac 3 pela adição de Cu, que aumenta a resistência mecânica e dureza em detrimento do alongamento. Possui a maior resistência à fluência da família. Junto com o Zamac 3, é uma das ligas mais usadas para fundição sob pressão. (SOARES, O. J. A, 2008)

- Zamac 7: Muito usado mundialmente, já que é requerido quando se necessita de tratamento de superfície. Possui elevada fluidez e pode ser trabalhado em baixa temperatura, culminando em peças com excelente acabamento superficial. (SOARES, O. J. A, 2008)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Preparação das peças modelo

Primeiramente, ocorreu a escolha das peças que iriam ser reproduzidas. Escolheram-se peças de xadrez em madeira, visto que as mesmas possuem geometria complexa e detalhada. Desse modo, as peças foram pinceladas com vaselina sólida e coladas no fundo de copos descartáveis para que possa ser feito o molde em silicone. Assim, a vaselina ajudará no desmolde e o copo lhe dará estrutura.

Figura 5: Peça modelo em madeira.



Fonte: <https://www.elo7.com.br/pecas-de-xadrez-em-madeira-macica/dp/14BB768>

Figura 6: Peça em madeira sendo colada no copo descartável.



Fonte: Autor.

4.2. Preparação do silicone para a produção dos moldes

O silicone utilizado é encontrado em lojas de artesanato e, o mesmo, acompanha um catalisador, o qual serve para solidificar o silicone. As proporções de catalisador e silicone são fornecidas pelo fabricante, sendo para cada 1000g de silicone é necessário 30g de catalisador. Portanto, utilizou-se uma balança de precisão para manter a proporção necessária.

Desse modo, a mistura foi vazada no copo com a peça modelo. Ao final da solidificação (24 horas de descanso), é feita a desmoldagem e obtém-se um molde fêmea com o formato da peça modelo a ser replicada. Um corte é feito na lateral do molde de silicone já solidificado para facilitar a retirada do modelo em cera. Vale ressaltar, que a vida útil do molde de silicone é de aproximadamente trinta dias de uso contínuo.

Figura 7: Silicone líquido sendo vazado.



Fonte: Autor.

Figura 8: Molde de silicone industrial.

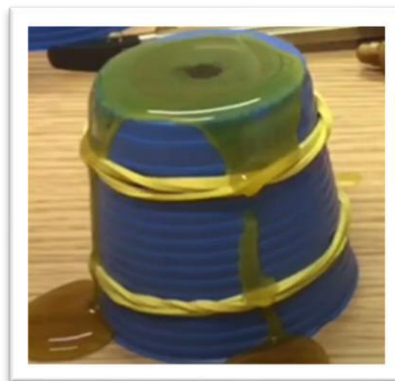


Fonte: Autor.

4.3. Preparação das peças em cera e dos canais de vazamento

Para esse estudo, foi-se utilizada uma cera parafínica doada pelo Laboratório de Cerâmicas Avançadas da universidade, a mesma foi fundida na estufa a 150° C e vazada no molde fêmea de silicone. Depois de 30 minutos de descanso, a peça em cera foi desmoldada sem a destruição do molde de silicone. Entretanto, somente a peça em cera não é suficiente para esse processo, também é necessário um canal de vazamento, feito do mesmo material, tal canal terá a finalidade de guiar o metal líquido durante o vazamento. Além disso, os canais de vazamento servem como reservas de metais previstas nos moldes para compensar a contração do material ainda líquido, ou seja, garantir o completo preenchimento da cavidade do molde. Tal canal foi soldado à base do modelo em cera com auxílio da chama de uma vela.

Figura 9: Cera líquida vazada no molde de silicone.



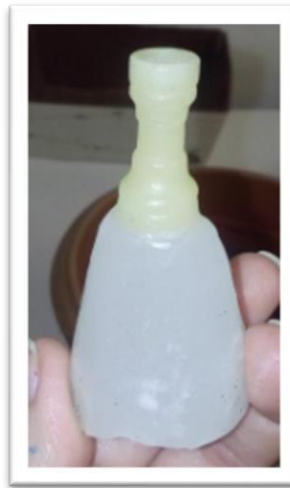
Fonte: Autor.

Figura 10: Modelos consumíveis em cera.



Fonte: Autor.

Figura 11: Modelo consumível em cera com canal de vazamento.



Fonte: Autor.

4.4.Preparação da casca cerâmica refratária

A produção da massa refratária foi baseada em uma fundição artesanal do interior de Minas Gerais. Sua composição original consistia de areia, pó de tijolo, gesso, manta acrílica e água. Visando reduzir os custos desse processo e dar uma utilidade a um material poluente, a cinza volante de termoeletrica foi integrada à composição da lama. Assim, novas composições foram pesquisadas e tiveram seus resultados comparados.

Para obter diferentes resultados, foram testados diversos processos e composições da massa refratária. Cada material da massa possui uma função específica, a areia dá resistência térmica e mecânica, o gesso contribui na moldagem do material e o pó de tijolo ajudará com a precisão do acabamento final, visto que possui uma granulometria muito pequena. Em todos os testes subsequentes a cinza volante substitui o pó de tijolo, pois ambos possuem propriedades físicas semelhantes. A fundição artesanal que inspirou esse trabalho

consistia em uma proporção de onze partes em volume de areia, mais seis partes em volume de gesso, mais uma parte e meia em volume de pó de tijolo, mais manta acrílica e água para aglomerar. A partir disso, os testes foram feitos com o intuito de reproduzir tal prática, assim decidiu-se fazer uma lama com partes iguais de gesso, areia e cinza volante, água e um grama de manta acrílica. Alternativamente, pela cinza já ter elevado ponto de fusão, também foi estudado a possibilidade de não utilizar areia, assim a casca seria composta apenas por cinza volante e gesso. Nesse último caso, a manta acrílica também foi desconsiderada sob a hipótese de que a água deveria ser aglomerante suficiente para a nova mistura. Após os testes, optamos pela composição mostrada na tabela 2 abaixo:

Tabela 2: Proporções em volume das amostras.

Proporções em volumes das amostras			
Areia	Água	Gesso	Água
1	1	1	0,7-1

Fonte: Autor.

Vale ressaltar que, independentemente da mistura da massa que for produzida, precisa-se passar por algumas etapas antes do vazamento do metal: secagem e queima. A secagem consiste na retirada de cera e a umidade do molde. Em seguida, a queima dará a peça mais resistência mecânica. Como a quantidade de água não era calculada com precisão e nem sempre foi usada uma quantidade fixa, o tempo de secagem necessário era diferente para cada peça. Entretanto, usando um tempo aproximado e suficiente para a retirada da cera, o resto da umidade é retirada durante a queima sem interferir no ganho de resistência mecânica. Portanto, para a secagem, as peças foram submetidas à 200° C por duas horas, e a aproximadamente 400° C por quatro horas para a queima.

Figura 12: Forno.



Fonte: Autor.

Segue abaixo a tabela 2, que mostra a composição química da cinza volante de termoelétrica. Diferentemente de outros tipos de cinza, a mesma apresenta óxido de enxofre, o que dificulta a reciclagem com outros fins, como por exemplo, a produção de cerâmicas. O óxido de enxofre representa um risco à estrutura de qualquer cerâmica, pois ele tende a expandir e contrair muito facilmente. Desse modo, seu uso pode ser justificado na fabricação de moldes, visto que eles serão usados apenas uma única vez, ou seja, problemas que surgiriam a longo prazo se tornam irrelevantes.

Tabela 3: Análise da cinza.

Analyte	Result (%)	Proc-Calc	Line	Net Int.	BG Int.
SiO ₂	57,9787	Quant.-FP	SiKa	256,623	1,072
Al ₂ O ₃	15,0274	Quant.-FP	FeKa	92,774	5,293
Fe ₂ O ₃	9,3193	Quant.-FP	CaKa	188,481	1,607
CaO	3,4681	Quant.-FP	S Ka	44,091	0,789
SO ₃	2,6448	Quant.-FP	K Ka	13,965	0,454
K ₂ O	2,4849	Quant.-FP	TiKa	42,354	0,936
TiO ₂	1,0301	Quant.-FP	-	4,003	0,276
CO ₂	6,4400	Quant.-FP	-	-	-

Fonte: Autor.

4.5. Preparação do molde final

A peça em cera é revestida com a massa refratária, assim que a mesma é seca ao ar livre, obtém-se um molde maciço e úmido. Esse molde é secado em uma estufa, onde há a retirada da cera. Em seguida, ele vai ao forno para ser queimado, esse processo lhe dá mais resistência mecânica. Nesse ponto ele está pronto para receber o metal fundido.

Figura 13: Casca cerâmica refratária após secagem e queima.



Fonte: Autor.

4.6. Produção do forno

Ainda com o intuito de fazer um processo de baixo custo, foi produzido um forno artesanal com areia e gesso em um balde de aço. A esse forno foi adicionado canos, para que os mesmos servissem como uma entrada de ar. Um secador de cabelo foi acoplado ao cano, tal dispositivo foi utilizado para gerar uma circulação de ar dentro de forno. Além disso, um copo de aço foi utilizado como cadinho e carvão vegetal comercial foi usado como combustível.

Figura 14: Forno artesanal.



Fonte: Autor.

4.7. Fusão e vazamento da liga metálica

Após do fogo aceso, a carga metálica foi introduzida no cadinho e fundida em questão de minutos. Para essa pesquisa foi utilizada a liga Zamac, uma liga de zinco de baixo ponto de fusão, facilmente reciclada e que possui um bom acabamento superficial.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Obtenção da peça metálica rústica e processo de usinagem

Após o processo de secagem e queima da casca cerâmica, a liga metálica Zamac foi fundida no forno artesanal e vazada, delicadamente, na casca cerâmica. Após 30 minutos de descanso, a casca é quebrada e é retirada peça fundida rústica, com um acabamento superficial contendo muito óxido e defeitos.

Figura 15: Peça fundida rústica.



Fonte: Autor.

5.2. Processo de usinagem

Apesar do alto nível de detalhes, as peças rústicas possuem uma camada de óxido, que faz com que a peça fique com uma coloração escura e sem brilho. Além disso, a peça fundida rústica possui alguns defeitos, como gotas frias e inclusões. Para corrigir tais defeitos e retirara a camada de óxido, realiza-se uma pequena usinagem com auxílio de uma mini retífica.

Figura 16: Peça fundida usinada.



Fonte: Autor.

6. CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos foi possível observar que a substituição do pó de tijolo pela cinza volante obteve um bom resultado, apesar de a resistência mecânica ter reduzido com a substituição do pó de tijolo pela cinza, não houve prejuízos significativos na resistência mecânica da casca refratária, a mesma aguentou a contração metálica e o vazamento do mesmo. Além disso, devido à baixa granulometria da cinza, obtivemos uma peça fundida de bom acabamento superficial fiel ao modelo escolhido sem muitos defeitos para serem corrigidos na etapa de usinagem.

Além da produção da peça fundida de geometria complexa, para este processo de fundição de precisão, foi desenvolvido uma técnica para a obtenção de modelos consumíveis em cera, tal técnica foi de simples execução e de grande eficiência, pois conseguiu-se obter modelos consumíveis em cera fieis ao modelo replicado.

Para que o projeto tivesse a produção com baixo custo, foi desenvolvido também um forno artesanal. Tal forno foi muito eficiente para a execução da fusão da liga metálica, que também possui um baixo custo, baixo de fusão e proporciona um bom acabamento superficial.

Adamais, tal processo também poderá ser usado como fonte de renda para pequenos empreendedores iniciantes, visto que o processo utilizado tem várias etapas artesanais e com o custo ínfimo.

7. REFERÊNCIAS

BALDAM, Roquemar, VIEIRA, Estefano **Fundição: Processos e tecnologia correlatas**; São Paulo: Érica, 2013, 384 p.

AMERICAN FOUNDRY SOCIETY TECHNICAL DEPARTMENT. **Timeline of Casting Technology**. Disponível em:
<http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/NotasFundicao/LinhaTempoFundicao.pdf>. Acesso em: 30 jan. 21.

BIDWELL, H. T. **Investment casting handbook**. Dallas: ICI, 1997. 123p. il.

BRAGA, E. M. G. F. **Otimização do Processo de Injeção de Zamak**. 2015. 262 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2015.

CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. John Wiley & Sons, Inc., 2002.

CASOTTI, Bruna; FILHO, Egmar; CASTRO, Paulo. **Indústria de Fundição: situação atual e perspectivas**. Rio de Janeiro, BNDS Setorial, n. 33, Mar. 2011, p. 121-162, <
<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream.pdf>>. Acesso em 20/11/2019.

CHIAVERINI, V, 1914 – **Tecnologia mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento** ; São Paulo: McGraw-Hill, 1986, 315 p.

FERREIRA, José M. G. de Carvalho: **Tecnologia da fundição, 3. ed.** Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2010.

GROOVER, Mikell P. **Introdução ao processo de fabricação**; 1. Ed – Rio de Janeiro; LTC, 2014, 737 p.

KIMINAMI, Claudio; CASTRO, Walman; OLIVEIRA, Marcelo. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos** ; São Paulo : Blucher, 2013, 235p.

KLUG, Jeferson Leandro. **Notas de aula**. UFC, 2021.

MORO, N; AURAS A. P. **Processos de Fabricação**. Florianópolis: CFET-SC. 2007.

Disponível em: <<http://norbertocefetsc.pro.br/elm/wpcontent/uploads/2014/09/fundicao.pdf>>. Acesso em 15 de outubro 2018.

SENAI - DEPARTAMENTO REGIONAL DE MINAS GERAIS. **Areias de fundição aglomeradas com argila. 2.** ed. Belo Horizonte: SENAI/MG, 1987. 4 v.

SOARES, O. J. A. **Melhorias de Produto/Processo pela Utilização de Ligas de ZAMAC.** 2008. 167 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2008.

WEISS, Almiro: **Processos de fabricação mecânica;** Curitiba: livro técnico, 2012, 264p.