



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA**

**LUÍS ANTÔNIO BEZERRA MACIEL**

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO DE FUNDIÇÃO POR CERA PERDIDA**  
**UTILIZANDO AREIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL**

**FORTALEZA**

**2021**

LUÍS ANTÔNIO BEZERRA MACIEL

DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO DE FUNDIÇÃO POR CERA PERDIDA  
UTILIZANDO AREIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Metalúrgica do 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.

Coorientador: Msc. Samuel Lucas Santos Medeiros.

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)

---

M138d Maciel, Luís Antônio Bezerra.  
Desenvolvimento de um processo de fundição por cera perdida utilizando areia de construção civil / Luís Antônio Bezerra Maciel. – 2021.  
36 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.  
Coorientação: Prof. Me. Samuel Lucas Santos Medeiros..

1. Fundição. 2. Fundição de precisão. 3. Cera perdida. I. Título.

CDD 669

---

LUÍS ANTÔNIO BEZERRA MACIEL

DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO DE FUNDIÇÃO POR CERA PERDIDA  
UTILIZANDO AREIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Metalúrgica no 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: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

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

---

Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Luiz Damasceno Maciel e  
Francisca Helena Costa Bezerra.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço acima de tudo a Deus.

Agradeço à minha mãe, Francisca Helena Costa Bezerra que sempre cuidou de mim com muito amor, carinho e grande conselheira. Da mesma forma ao meu pai, Luiz Damasceno Maciel que sempre deu apoio financeiro, sendo um grande exemplo de homem para mim.

Agradeço aos meus primos que são como irmãos para mim.

Agradeço aos amigos e colegas que fiz na Universidade, pelas orientações, pela ajuda, pelos estudos e pelas confraternizações.

Ao Prof. Dr. -Ing. Jeferson Leandro Klug pela orientação, pela disponibilização de materiais e pelos ensinamentos em laboratório e aulas.

Ao técnico de laboratório Samuel Medeiros pela atenção e auxílio no trabalho, aos professores Ricardo Emílio e Marcelo José pela amizade e por todas as vezes que me auxiliaram na graduação.

Ao Laboratório de Fundição (LaF) e ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Ao Prof. Claus Franz Wehmann pela disponibilização de uma das peças utilizadas neste trabalho.

Aos participantes da banca examinadora: Jeferson Leandro Klug, Jorge Luiz Cardoso e Samuel Lucas Santos Medeiros pela disponibilidade, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos professores do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais pelos ensinamentos e experiências repassadas.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

(José de Alencar)

## RESUMO

O processo de fundição de precisão pode também ser conhecido por outros nomes como microfundição ou cera perdida e é utilizado para produção de peças em metal, sendo permitido o uso de quase todas as ligas. Embora, historicamente o processo de fundição de precisão tenha se originado para a produção de peças de arte, hoje ele é amplamente utilizado em diversos segmentos da indústria, com diversas geometrias, ótimo acabamento e controle rígido das propriedades mecânicas. Partindo do método já estabelecido para a realização desse processo, foi realizado este trabalho visando uma nova casca cerâmica para a produção de peças em alumínio, através dos moldes de silicone foram produzidos modelos em cera de abelha de peças de xadrez e uma trava do sistema de ejeção de um paraquedas de um foguete de baixo empuxo. Com o objetivo de desenvolver e avaliar uma nova casca cerâmica para confecção de fundidos, semelhante ao que é realizado na indústria, desta forma gerando peças com menos defeitos e que não necessitem ser submetidas a outros processos como usinagem e conformação, realizou-se uma nova composição de constituintes da casca cerâmica: silicato de sódio neutro e areia de construção civil. As peças obtidas em alumínio foram então comparadas e analisadas por fotos com seus respectivos modelos em cera. Desta forma, foi possível produzir e avaliar uma nova casca cerâmica pelo processo de fundição de precisão.

**Palavras-chave:** Fundição; Fundição de precisão; Cera perdida.

## ABSTRACT

The precision casting process can also be known by other names such as microfusion or lost wax and is used for the production of metal parts, the use of almost all alloys being allowed. Although, historically, the precision casting process originated for the production of art pieces, today it is widely used in several segments of the industry, with different geometries, excellent finishing and strict control of mechanical properties. Starting from a method already established to carry out this process, this technical work was carried out on a new ceramic shell for the production of aluminum parts, through the silicone molds, beeswax models of chess pieces and a lock for the ejection system of a parachute of a low thrust rocket were produced. In order to develop and evaluate a new ceramic shell for making castings, similar to what is done in the industry, thus generating parts with less defects and that do not need to be subjected to other processes such as machining and forming, a new composition of constituents of the ceramic shell was made: neutral sodium silicate and sand from civil construction. The pieces obtained in aluminum were then compared and analyzed by photos with their respective wax models. This way, it was possible to produce and evaluate a new ceramic shell using the precision casting process.

**Keywords:** Foundry; Investment casting; Lost wax.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Etapas do processo de fundição de precisão .....	18
Figura 2	– Defeitos em peças fundidas .....	19
Figura 3	– Modelos em cera de abelha: peça de xadrez (a) e trava do paraquedas (b) .....	22
Figura 4	– Forno mufla do LaF .....	24
Figura 5	– Trava do paraquedas produzido em uma impressora 3D .....	25
Figura 6	– Molde de silicone para confecção da trava do paraquedas .....	25
Figura 7	– Peças de xadrez com massalote (a) e peças do paraquedas com massalote (b) .....	26
Figura 8	– Cascas cerâmicas com três camadas aplicadas: peças de xadrez (a) e peças do paraquedas .....	27
Figura 9	– Peneira de 60 mesh (a) e peneira convencional (b) .....	28
Figura 10	– Amostras com cinco camadas de refratário aplicadas: peças de xadrez (a) e peças do paraquedas (b) .....	28
Figura 11	– Derretimento da cera de abelha: peça de xadrez (a) e peças do paraquedas (b) .....	29
Figura 12	– Calcinação das amostras: peças de xadrez (a) e peças do paraquedas (b) .....	29
Figura 13	– Forno de indução do Laboratório de Fundição .....	30
Figura 14	– Retirada da camada de óxido de alumínio do cadinho .....	31
Figura 15	– Cascas cerâmicas após o vazamento de alumínio .....	32
Figura 16	– Peças após a retirada da casca cerâmica e limpeza: peças de xadrez com massalote (a) e peças do paraquedas com massalote (b) .....	32
Figura 17	– Comparativo da peça de xadrez: torre em cera de abelha (a) e torre em alumínio (b) .....	33
Figura 18	– Comparativo da peça de xadrez: cavalo em cera de abelha (a) e cavalo em	

alumínio (b) .....	33
Figura 19 – Comparativo da peça de xadrez: peão em cera de abelha (a) e cavalo em alumínio (b) .....	34
Figura 20 – Comparativo do modelo 3D com duas travas produzidas em alumínio ....	35

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
LaF	Laboratório de Fundição
trad.	Tradutor
UFC	Universidade Federal do Ceará

## LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celcius
k	Quilo
%	Porcentagem
W	Watts

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
2	<b>OBJETIVOS</b> .....	15
3	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	16
3.1	<b>Processo de fundição</b> .....	16
3.1.1	<i>Fundição de precisão</i> .....	17
3.2	<b>Defeitos em peças fundidas</b> .....	18
3.3	<b>Padronização de processos</b> .....	19
4	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	21
4.1	<b>Materiais utilizados</b> .....	21
4.2	<b>Produção da casca cerâmica</b> .....	23
4.3	<b>Etapas do estudo</b> .....	24
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	28
6	<b>CONCLUSÃO</b> .....	36
7	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	37
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	38

## 1 INTRODUÇÃO

No Laboratório de Fundição (LaF), do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, são desenvolvidas pesquisas em diversos processos de fundição, sendo utilizados os conhecimentos adquiridos em sala de aula. Dentre eles, a fundição de precisão.

O LaF tem realizado pesquisas na produção, desenvolvimento e padronização de uma casca cerâmica, devido a relevância do método de fundição de precisão na obtenção de peças em metal de boa qualidade e excelente acabamento superficial.

Primeiramente, foram produzidas peças de xadrez em cera de abelha, assim como foi produzida uma trava do sistema de ejeção de paraquedas de um foguete de baixo empuxo, essa peça foi fornecida através de uma impressora 3D, então produzida em cera de abelha a partir de um molde de silicone, todos os modelos em cera de abelha foram recobertos por camadas de material refratário, a casca cerâmica funcionou assim como molde para o metal fundido. Para a confecção do molde refratário, os materiais utilizados são: areia de construção civil do tipo arisco (na primeira camada), com granulometria fina obtida em peneira, silicato de sódio neutro e água. As camadas posteriores utilizaram areia mais grosseira, silicato de sódio neutro e água, todas com as mesmas composições. Após a secagem de todas as camadas, as peças foram levadas ao forno para a cera de abelha derreter, onde a cera derretida pode ser reutilizada novamente no método. Em seguida, realiza-se a calcinação da casca cerâmica em torno de 600 °C e no fim, o vazamento do alumínio fundido no molde cerâmico. A técnica é bastante simples, no entanto é possível obter peças metálicas com poucos defeitos.

Tendo em vista o desenvolvimento e avaliação de uma nova casca cerâmica para a produção de peças de xadrez, assim como de uma trava do sistema de ejeção de paraquedas de um foguete de baixo empuxo o qual foi solicitado. Ao final do trabalho, as peças em metal serão apresentadas e assim discutidos os seus defeitos, utilizando-se as imagens do objeto em cera para efeitos de comparação.

## **2 OBJETIVOS**

Objetivos específicos: produzir peças através do método de fundição de precisão.

Objetivos gerais: Desenvolver e avaliar o processo de fundição de precisão de uma casca cerâmica, utilizando fundição em cera de abelha, a lama cerâmica composta por ligante (silicato de sódio neutro) e areia de construção civil do tipo arisco em granulometria fina na primeira camada e granulometria grosseira nas camadas posteriores.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico serão retratados alguns pontos analisados na literatura os quais fundamentaram esse trabalho. As exposições que se seguem serão apresentadas de maneira sintética, devido já serem abordadas em TCCs anteriores produzidos no LaF. Dentre eles, os trabalhos dos alunos Rubson Sousa (2019) e Aléxia Jorge (2019).

#### 3.1 Processo de fundição

A fundição é uma atividade milenar, porque é um processo relativamente simples e econômico: consiste em despejar metais ou ligas metálicas em estado líquido (fundido), vazadas em um molde com formato e medidas correspondentes aos das peças a ser produzidas.

No processo de fabricação, a fundição se evidencia pela produção de peças com grande variedade de formas e tamanhos (exemplos: sinos, âncoras, tubulações, implantes ortopédicos, miniaturas); peças de extrema competência as quais se destinam à indústria automobilística e aeroespacial (blocos de motor e palhetas de turbina) e peças banais (bueiros e bancos de jardim). A produção pode ser unitária ou seriada, voltada principalmente para indústria mecânica e automobilística.

Os processos de fundição podem produzir peças já em sua forma e acabamento definitivo ou consistirem no processo inicial de peças que serão posteriormente conformadas e ou usinadas.

Algumas vantagens ao se trabalhar com fundição:

- É um processo relativamente simples.
- Processo que pode ter baixo investimento inicial.
- Capacidade de produção em série ou unitária e de diversos tamanhos, pesos e formas.
- Podem ser produzidas dentro de padrões variados de acabamento e tolerância dimensional.
- Grande economia de peso, devido permitir a obtenção de paredes com espessuras quase ilimitadas.

Entretanto, apresenta também algumas desvantagens, como:

- Aços fundidos, por exemplo, podem apresentar elevadas tensões residuais, microporosidades, zonamento e variações de tamanho de grão. Tais fatores resultam em menor resistência e ductilidade, em relação aos aços obtidos por outros processos de fabricação como conformação a quente.
- Pode haver dificuldade de evasão do ar retido no interior da matriz dependendo dos contornos das cavidades e dos canais; o ar retido é a principal causa de porosidade nas peças.

Com o transcorrer do tempo, foram desenvolvidos processos distintos dentro da fundição. Groover (2014) cita os principais deles:

- a) Em areia verde;
- b) *Shell-molding*;
- c) *Die Casting* (fundição sob pressão);
- d) Em molde de gesso;
- e) Fundição de precisão.

### **3.1.1 Fundição de precisão**

Segundo Peter Beeley (2001) a fundição de precisão consiste em processos da confecção de um molde refratário de granulometria fina. Estes, que contêm materiais de baixa granulometria, proporcionam aos moldes uma textura de superfície lisa que é subsequentemente transmitida aos moldes. Tendo a capacidade de reprodução de detalhes precisos e de vários tamanhos, além de uma grande série de metais que podem ser utilizados.

De acordo com Groover (2014) o processo pode utilizar tanto moldes permanentes como moldes perecíveis. O processo é também conhecido por cera perdida, já que um modelo em cera é perdido durante a fundição.

Na indústria, o intuito de potencializar a produção em grande escala, as peças em cera são colocadas em cacho, denominada de “árvore de fundição”, o qual servirá também de canal de vazamento do metal fundido. Esta por sua vez, será invertida e recoberta por camadas de casca cerâmica líquida o suficiente para torná-la rígida.

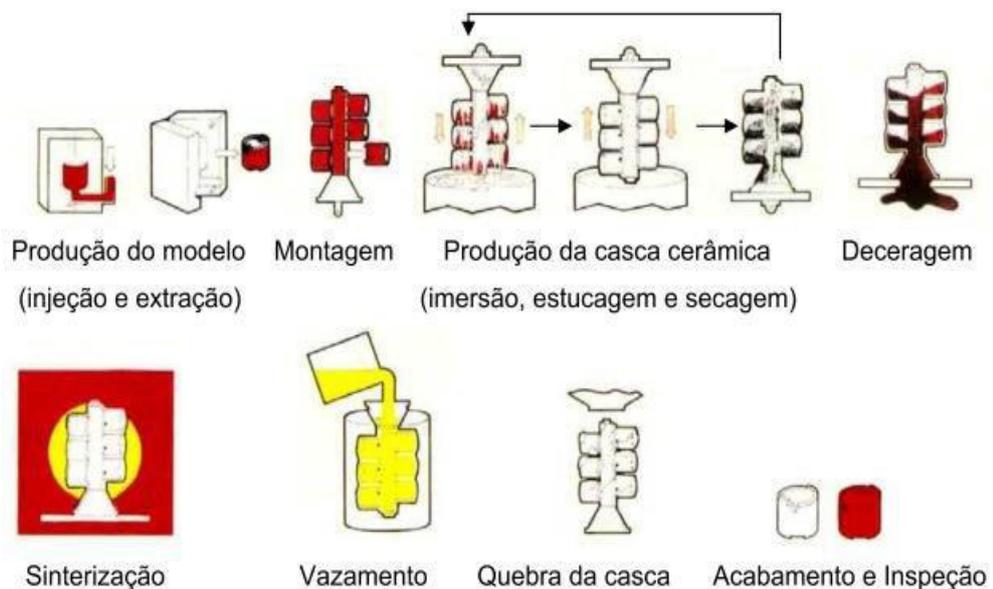
Após a aplicação de todas as camadas da casca cerâmica e secagem, tem-se um molde com a peça modelo em cera dentro. Então o molde é aquecido para o derretimento e escoamento da cera (podendo ser reutilizada), restando assim apenas a casca cerâmica, chamada de *investment*.

Então o molde é preaquecido a uma temperatura elevada, garantindo que todos os contaminantes sejam eliminados, além de facilitar a fluidez do metal que será vazado, essa etapa é conhecida como calcinação.

Por fim o molde é preaquecido e é vazado o metal líquido. Após o material fundido se solidificar, o *investment* é quebrado e assim está pronta a peça em metal.

Na Figura 1 estão apresentadas as etapas do processo de fundição de precisão.

Figura 1 - Etapas do processo de fundição de precisão



Fonte: Site ResearchGate. Etapas do processo de fundição de precisão. Autor: Camacho Alini, 2017.

### 3.2 Defeitos em peças fundidas

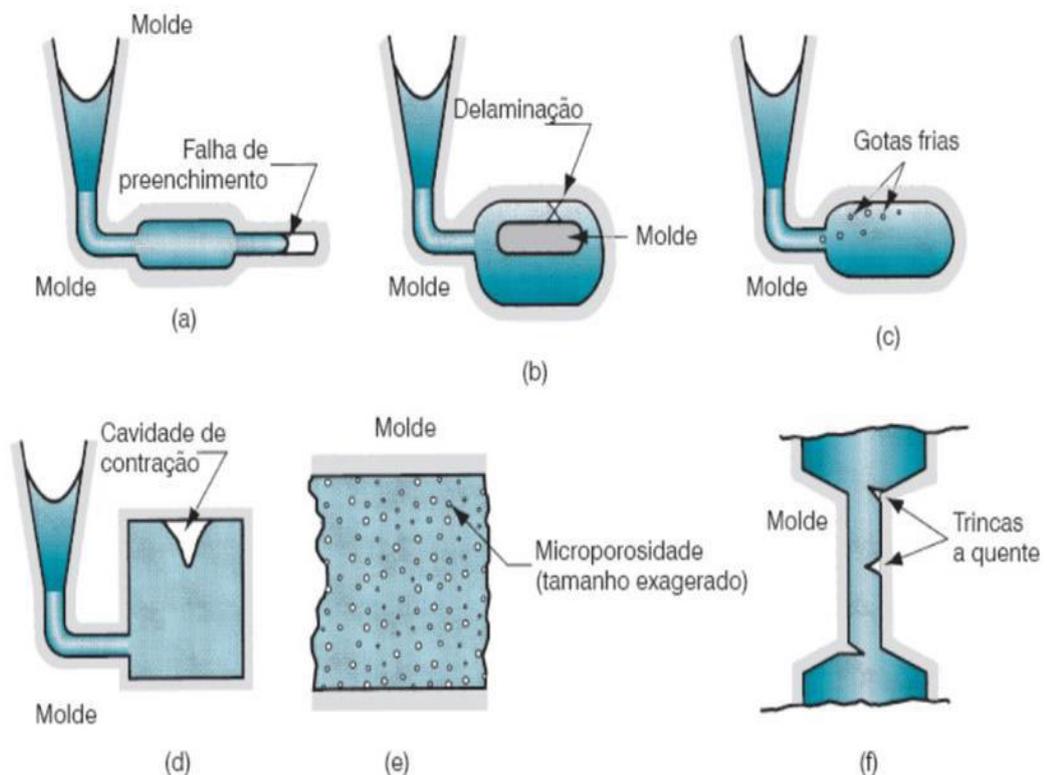
Os defeitos em peças fundidas podem ocorrer devido o design da fundição, o método que é utilizado e a aplicação da técnica. Segundo Groover (2014), seguem-se as definições de alguns defeitos que podem surgir das causas citadas:

- a) Falha de preenchimento: Ocorre em fundidos, quando o metal se solidifica antes de preencher totalmente o molde. Ocorre quando o metal líquido possui pouca fluidez, temperatura de vazamento muito baixa e lenta.
- b) Delaminação: Ocorre quando duas partes do metal fluem juntas, no entanto falta fusão nas duas frentes devido a solidificação prematura. Causas são semelhantes às falhas de preenchimento.

- c) Gotas frias: Resultam de respingos de metal que se solidificam gerando grânulos sólidos nas peças solidificadas.
- d) Cavidade de contração: A depressão na superfície ou um vazio interno no fundido, originado pela contração de solidificação que delimita a quantidade de metal fundido disponível no último setor a se solidificar. Também denominado de “rechupe”.
- e) Microporosidade: Uma série de bolhas presentes na superfície da peça.
- f) Trinca a quente: O molde trinca devido a tensões mecânicas durante o resfriamento. Desta forma a peça metálica apresentará apêndices na forma das trincas.

Na Figura 2 podemos ver os diferentes defeitos em peças fundidas.

Figura 2 - Defeitos em peças fundidas



Fonte: Introdução aos processos de fabricação. 1ª edição, Mikell P. Groover, 2014.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Com conhecimento adquirido durante a disciplina de fundição, assim como de pesquisas realizadas em literatura, deu-se início desta forma a parte prática do trabalho.

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de fundição (LaF) da Universidade Federal do Ceará (UFC) visando o desenvolvimento e avaliação de uma nova casca cerâmica através do método de cera perdida, podendo ser replicado em outros ambientes ou em experimentos da disciplina de fundição do curso de engenharia metalúrgica.

### 4.1 Materiais utilizados

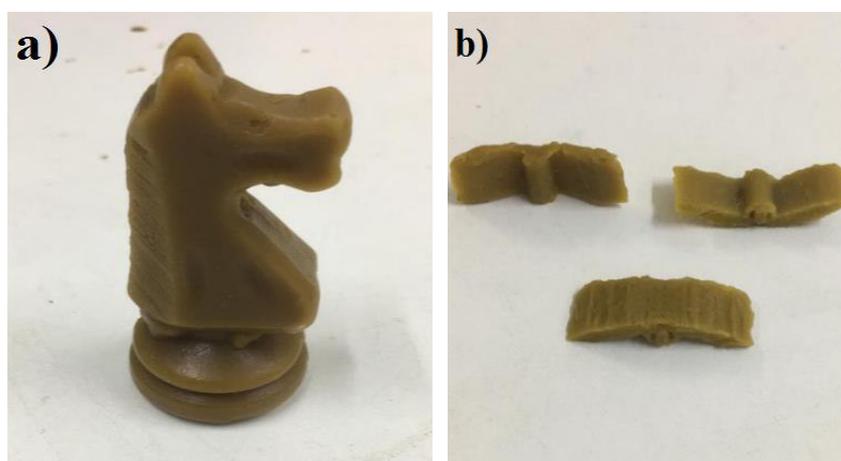
Para a confecção dos moldes refratários, foi utilizada uma combinação de silicato de sódio neutro, areia de construção civil do tipo arisco e água.

O silicato de sódio neutro tem a função de ligante. O arisco foi adquirido em um depósito de material construção civil em Fortaleza. O arisco que foi obtido no depósito apresentava pedregulhos, matéria orgânica e raízes de árvores, teve-se de peneirar o arisco para selecionar a granulometria e composição que seria trabalhada. O arisco deve possuir baixa granulometria, então para isso foi selecionado uma peneira de 60 mesh (Mesh é uma unidade de medida que denomina o número de aberturas da peneira por polegada).

No caso da cera utilizada para o trabalho, foi a de cera de abelha, o qual foi adquirida no Piauí, conforme mostra a Figura 3:

Figura 3 - Modelos em cera de abelha: peça de xadrez (a) e trava do paraquedas

(b)



Já para o vazamento das cascas cerâmicas, foi utilizado alumínio, e sucatas de blocos de motor de alumínio provenientes na cidade de Fortaleza.

#### **4.2 Produção da casca cerâmica**

Partido dos conhecimentos adquiridos ao longo das atividades complementares e estágio supervisionado no LaF, foi desenvolvido um novo parâmetro e avaliação na confecção de casca cerâmica pelo método de cera perdida.

O método analisado consiste na confecção de casca cerâmica, combinando-se 90% de arisco (em massa), com 10% de silicato de sódio neutro e com um volume de água igual ao dobro de silicato de sódio, com a finalidade de diluir o silicato de sódio, produzindo assim uma lama cerâmica fina e uniforme, recobrando em camadas as peças em cera de abelha com a lama cerâmica e esperando secar em intervalos de 2 horas.

Para o recobrimento da primeira camada da cera, foi utilizada uma peneira de 60 mesh, obtendo-se uma boa cobertura, pois a cera de abelha foi banhada com uma fina camada de detergente. Com o arisco em granulometria mais fina foi possível obter uma maior precisão das peças em cera de abelha.

Em seguida foram aplicadas mais quatro camadas com a mesma composição da primeira camada, só que para o peneiramento do arisco, foi utilizada uma peneira de maior granulometria, no caso, foi utilizada uma peneira convencional de cozinha de aço inox. Com uma granulometria mais grosseira, pode-se obter uma casca cerâmica com maior resistência mecânica e permeabilidade.

Ao término de todas as aplicações das camadas e secagem da casca cerâmica ao ar, as peças foram levadas ao forno a 140°C durante 30 minutos para o vazamento da cera de abelha, o qual pode ser reutilizada. Em seguida, as peças cerâmicas permanecem ao forno a 600°C durante 1 hora, para o processo de calcinação. Por fim, o alumínio fundido é despejado na casca cerâmica para a produção da peça em alumínio. Tanto o vazamento da cera como a calcinação foram realizadas no forno do tipo mufla, conforme a Figura 4.

Figura 4 - Forno mufla do LaF

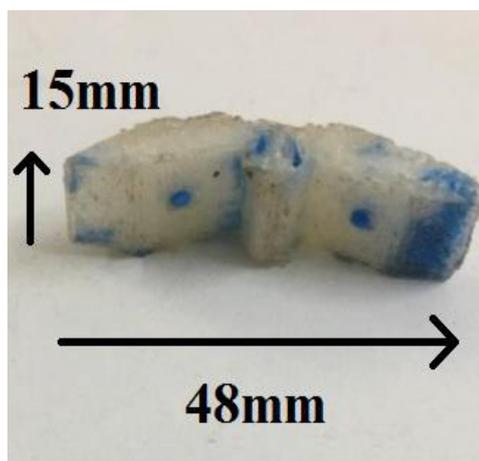


Fonte: Próprio autor, 2021.

### 4.3 Etapas do estudo

Para realização dos experimentos, foi necessário a produção das peças em cera de abelha as quais serviriam para desenvolver o molde refratário. A trava do sistema de ejeção do paraquedas de um foguete de baixo empuxo foi produzida a partir de um modelo confeccionado por uma impressora em 3D, a qual foi fornecida ao LaF pelo projeto do Prof. Klaus do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará (UFC). Na Figura 5, podemos ver a trava do paraquedas proveniente da impressora 3D.

Figura 5 - Trava do paraquedas produzido em uma impressora 3D



Fonte: Próprio autor, 2021.

O modelo em 3D foi pincelado com vaselina sólida, submergido em silicone líquido com 97% de volume num pequeno reservatório de plástico descartável e posteriormente foi adicionado o catalisador com 3% em volume. O ativador tem a função de catalisar a reação de enrijecimento do silicone líquido. Depois de 5 horas ocorre a formação da borracha de silicone, retira-se o modelo em 3D e fica-se a cavidade da peça do paraquedas. Já para as peças em xadrez não foi necessário esse procedimento, pois já havia moldes de silicone de borracha disponíveis no laboratório.

A cera de abelha foi derretida no forno mufla a uma temperatura de 120°C e vazada dentro dos moldes de silicone. Após seu enrijecimento, foram retirados os modelos das peças em cera. A Figura 6, mostra o molde de silicone da trava do paraquedas.

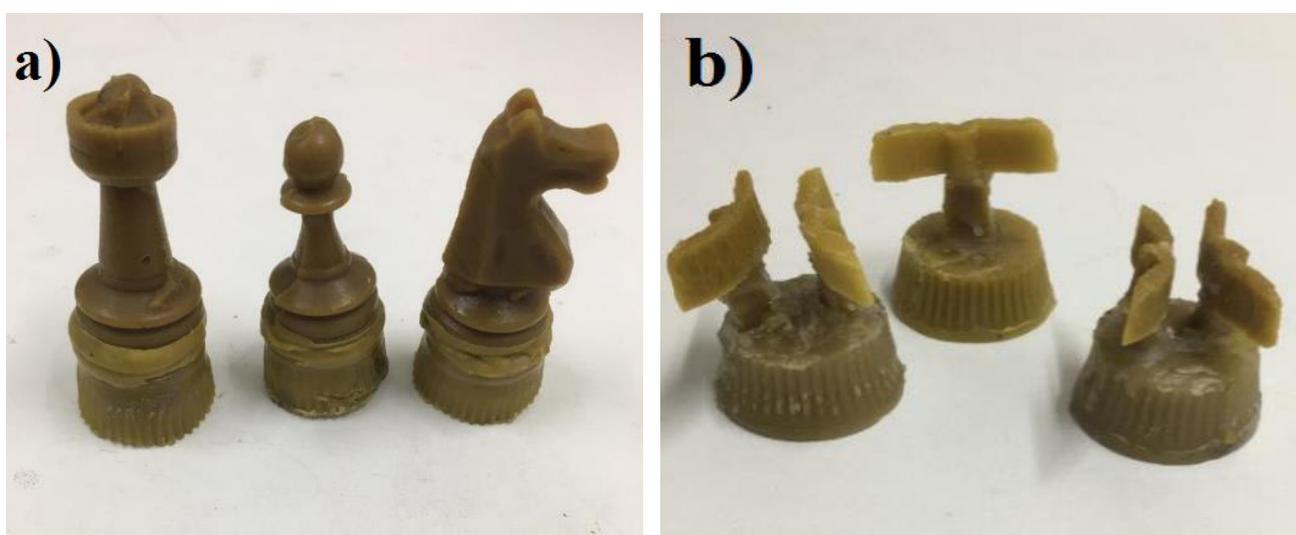
Figura 6 - Molde de silicone para confecção da trava do paraquedas



Fonte: Próprio autor, 2021.

Para a produção do massalote, utilizaram-se copinhos de café de plástico descartáveis. O massalote em cera foi colado junto às peças de xadrez aproveitando a cera derretida de abelha. Já nas travas do paraquedas, os massalotes foram colados em pequenos canais de vazamento de cera de abelha por cera de parafina, devido as peças do paraquedas se apresentarem mais delicadas, assim produzindo pequenas arvores de função, conforme mostrado na figura 7:

Figura 7 – Peças de xadrez com massalote (a) e peças do paraquedas com massalote (b)

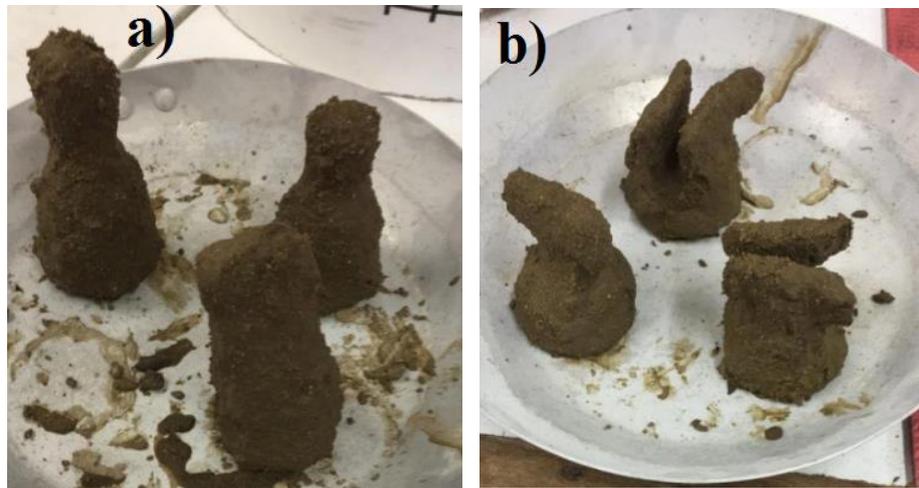


Fonte: Próprio autor, 2021.

Para a produção da casca cerâmica, a aplicação da primeira camada das árvores de fundição em cera de abelha, dá-se com uma misturara de 90% de arisco peneirada em uma peneira de 60 mesh, 10% de silicato sódio neutro, diluído em água com volume apresentando o dobro do silicato de sódio, banhando uniformemente toda a peça, com o objetivo de alcançar o melhor acabamento e dimensionamento das peças.

Em seguida, foram aplicadas mais 4 camadas da casca cerâmica com as mesmas proporções dos componentes, com intervalos de 2 horas de secagem ao ar para cada camada, mas para essas últimas 4 camadas, foi utilizada uma peneira convencional de cozinha de aço inox para o arisco, selecionando grãos mais grosseiros para conferir uma maior resistência mecânica a altas temperaturas.

Figura 8 – Cascas cerâmicas com três camadas aplicadas: peças de xadrez (a) e peças do paraquedas (b)



Fonte: Próprio autor, 2021.

A Figura 8 representa as amostras após a aplicação da terceira camada da casca cerâmica.

Após a secagem das 5 camadas, a casca cerâmica rígida e seca foi levada ao forno do tipo mufla 140°C durante 30 minutos para derreter a cera, e em seguida foi calcinada a 600°C por 1 hora. A calcinação é responsável por um conjunto de reações de decomposição térmica para eliminação de gases presentes na casca cerâmica, como  $\text{CO}_{2(g)}$  e  $\text{H}_2\text{O}_{(g)}$ , além de vestígios de cera ainda presentes nos *Investments*.

A casca cerâmica já calcinada foi aquecida em torno de 200°C, no intuito de facilitar a fluidez do metal fundido, o alumínio líquido é fundido no forno de indução e é vazado na casca cerâmica, o metal se solidifica, a casca é retirada e obtém assim a peça em metal.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

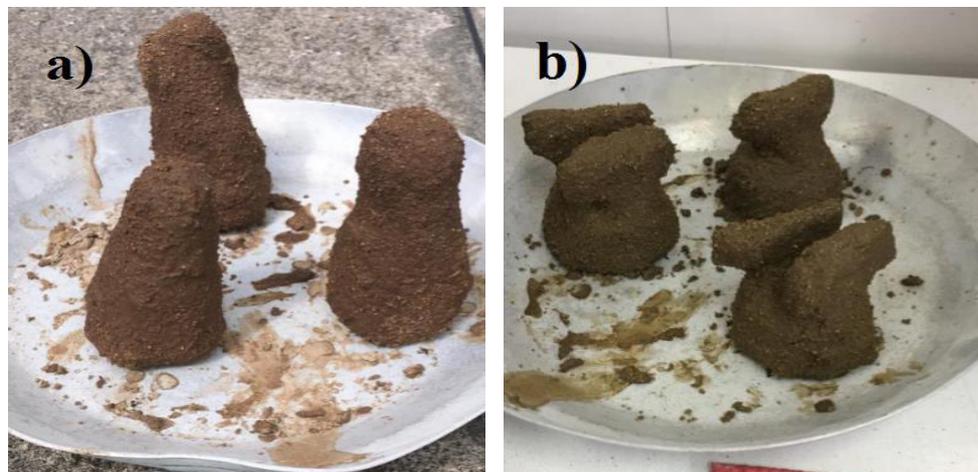
Foram produzidas peças de xadrez e travas do sistema de ejeção de um paraquedas de um foguete de baixo empuxo. A mistura foi composta de silicato de sódio neutro, água e arisco. Para primeira camada, o arisco foi peneirado em uma peneira de 60 mesh. Já para as quatro camadas posteriores, foi utilizada uma peneira convencional de cozinha em aço inox. A Figura 9 mostra as peneiras utilizadas.

Figura 9 – Peneira de 60 mesh (a) e peneira convencional (b)



Fonte: Próprio autor, 2021.

Figura 10 - Amostras com as cinco camadas de refratário aplicadas: peças de xadrez (a) e peças do paraquedas (b)

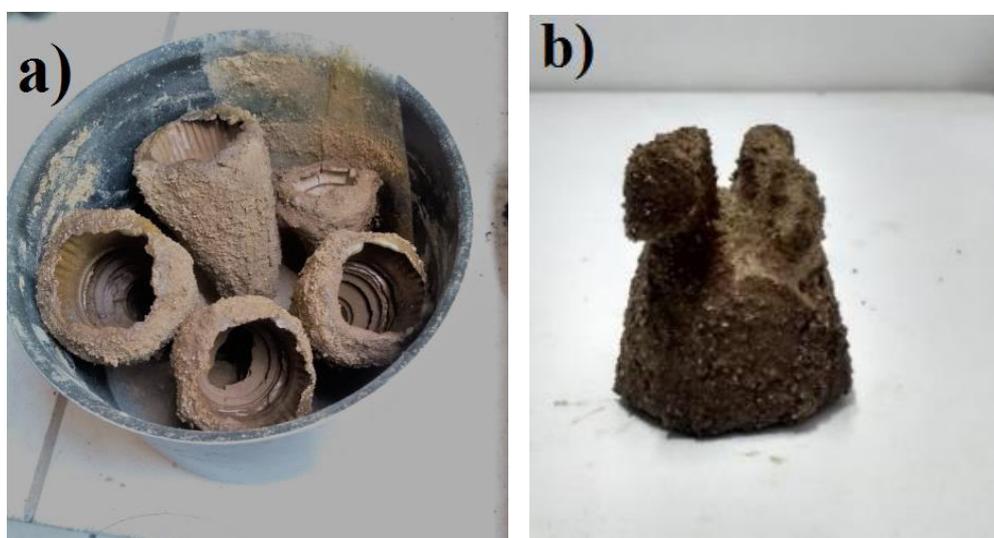


Fonte: Próprio autor, 2021.

A Figura 10 representa as amostras com as cinco camadas de casca cerâmica aplicadas.

Com as camadas já secas de refratário, foram então levadas ao forno mufla a temperatura de 140°C por volta de 30 minutos para o derretimento da cera. Não ocorreu a presença de trincas na casca refratária, mostrando a vantagem de se trabalhar com a cera de abelha, que apresenta pequena dilatação ao se fundir. As casacas cerâmicas após o derretimento da cera, conforme a Figura 11.

Figura 11 - Derretimento da cera de abelha: peças de xadrez (a) e peças do paraquedas (b)

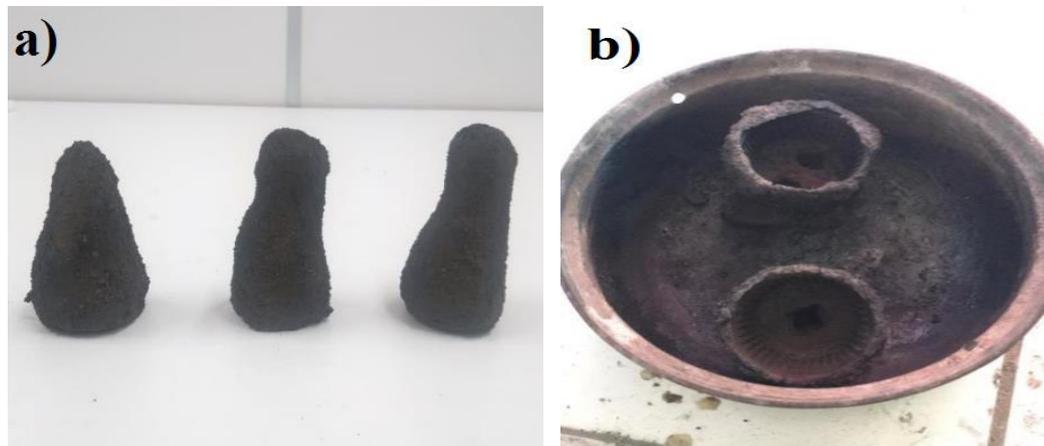


Fonte: Próprio autor, 2021.

Posteriormente ocorreu processo de calcinação, onde as peças foram calcinadas no forno mufla a temperatura de 600°C durante 1 hora. Pode-se observar que as cascas cerâmicas não apresentaram trincas externas e internas, pois a calcinação é um tratamento térmico em sólidos, melhorando a resistência mecânica da casca, devido a eliminação de substâncias voláteis como dióxido de carbono, água de argila e matéria orgânica e como essa eliminação de voláteis, evita-se também do metal líquido ferver na casca durante o seu vazamento.

A Figura 12 apresenta as amostras após a calcinação.

Figura 12 - Calcinação das amostras: peças de xadrez (a) e peças do paraquedas (b)



Fonte: Próprio auto, 2021.

Após a etapa de calcinação, as amostras foram esfriadas por volta de 1 hora e passaram novamente por um aquecimento no forno mufla a temperatura de 200°C por 15 minutos, para realização do vazamento de alumínio líquido no forno de indução do LaF.

Foram derretidas no forno de indução sucatas de blocos de motor em alumínio com pureza superior a 90% em temperatura de aproximadamente 800°C, ou seja, com temperatura acima do ponto de fusão do alumínio que é de 660°C, sendo necessária a temperatura de vazamento estar alta para que permaneça líquida o suficiente para preencher a casca cerâmica. Importante também frisar a retirada da camada de óxido do cadinho, antes do vazamento de alumínio líquido no molde. O forno utilizado para fundir o alumínio e a retirada das camadas de óxido serão mostradas nas Figuras 13 e 14, respectivamente

Figura 13 – Forno de indução do Laboratório de Fundição



Fonte: Próprio autor, 2021.

O forno de indução do LaF opera a uma potência máxima de aproximadamente 50 KW (marca SERVFOR Ltda) dotado de um sistema de refrigeração, um exaustor de fumos e uma caixa refratária fixa para receber os moldes e o cadinho com o metal.

Figura 14 - Retirada da camada de óxido de alumínio do cadinho



Fonte: Próprio autor, 2021.

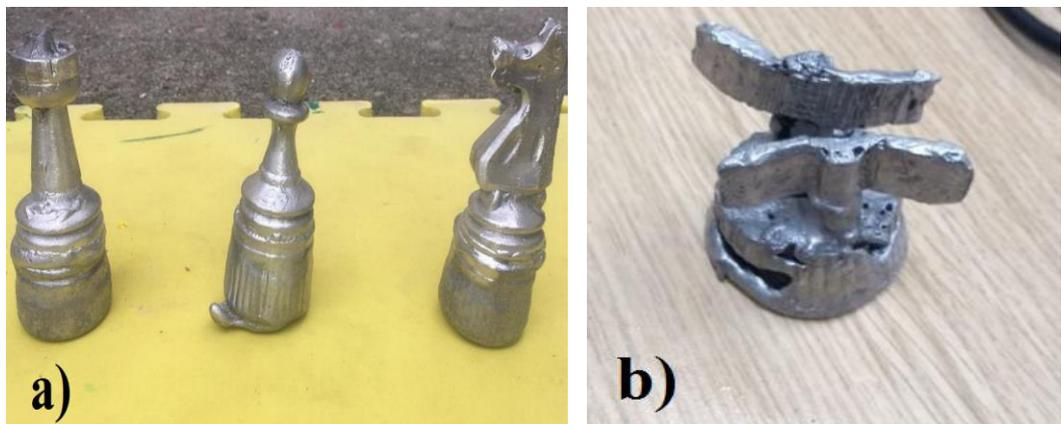
A casca cerâmica se apresentou resistente, obtendo-se um eficiente vazamento. Após cerca de 30 minutos na caixa de areia, os moldes esfriaram, sendo possível seu manuseio e remoção com os devidos cuidados e com auxílio de EPI's adequados. A casca foi de fácil remoção, pois o seu componente principal do molde era o arisco, quando comparado com cascas que apresentam cimento refratário em sua composição. As cascas cerâmicas após o vazamento de alumínio e as peças em metal depois da retirada das cascas nas Figuras 15 e 16, respectivamente.

Figura 15 - Cascas cerâmicas após o vazamento de alumínio



Fonte: Próprio autor, 2021.

Figura 16 - Peças após a retirada da casca cerâmica e limpeza: peças de xadrez com massalote (a) e peças do paraquedas com massalote (b)

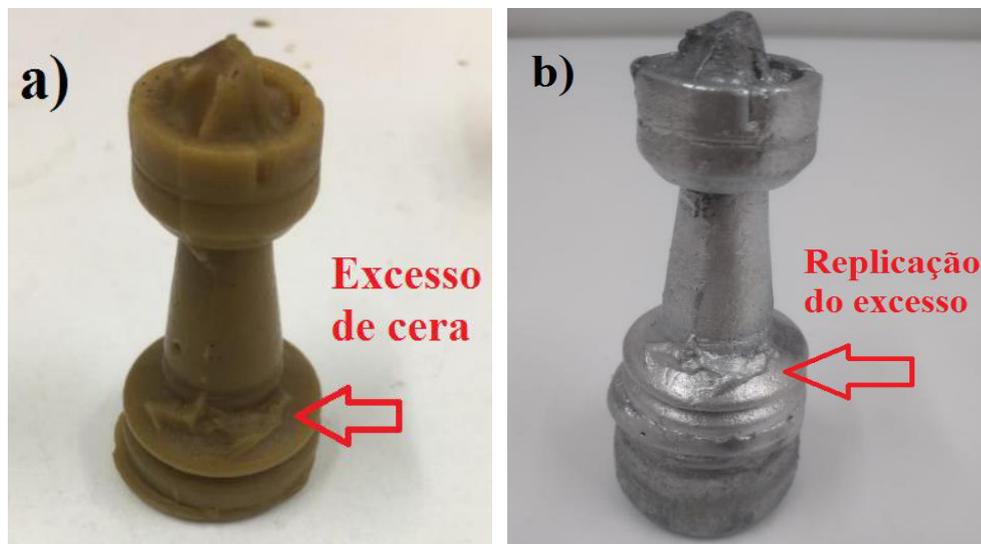


Fonte: Próprio autor, 2021.

Destaca-se que as peças produzidas pelo método de fundição de precisão, estão sujeitos alguns defeitos, pelos quais alguns foram comentados na revisão bibliográfica.

Para a produção das peças de xadrez, notou-se que alguns defeitos da peça em alumínio são originários do desgaste do molde de silicone pela sua constante utilização em laboratório. Observou-se excessos de cera na peça feita de cera de abelha, o qual foi replicado na torre em alumínio, conforme mostrado na Figura 17.

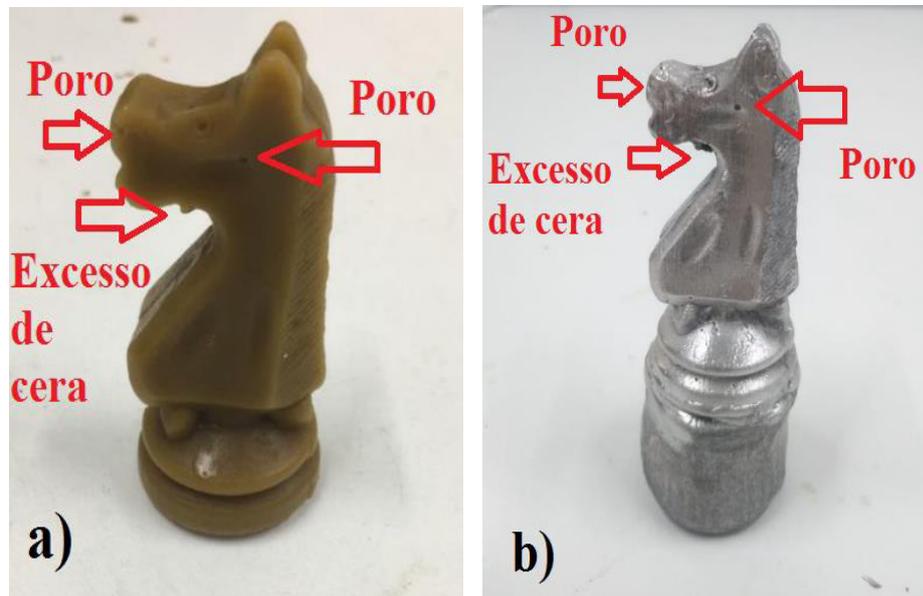
Figura 17 - Comparativo da peça de xadrez: torre em cera de abelha (a) e torre em alumínio (b)



Fonte: Próprio autor, 2021.

Para a peça de xadrez, o cavalo, apresentou excesso em cera, assim como a ausência de cera com pequenos poros abertos na superfície do modelo em cera de abelha, isso tudo se deve ao desgaste do silicone. Essas características foram então denotadas na peça em metal, conforme a Figura 18.

Figura 18 - Comparativo da peça de xadrez: cavalo em cera de abelha (a) e cavalo em alumínio (b)

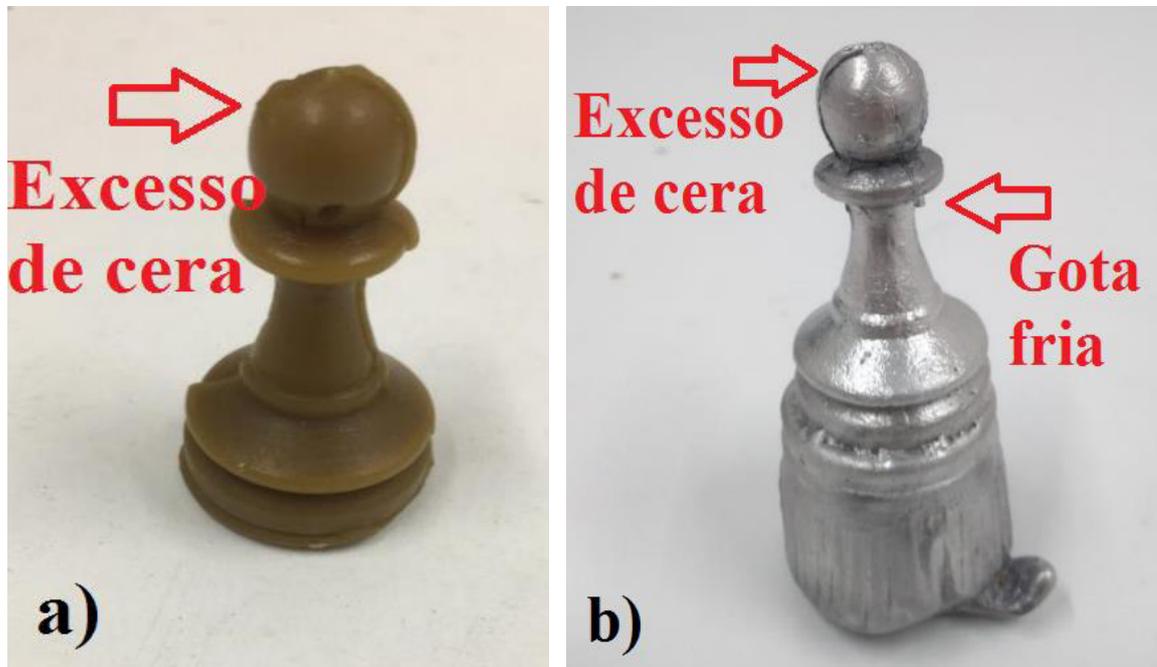


Fonte: Próprio autor, 2021.

Já para peça de xadrez o peão, essa peça apresentou excesso de cera da mesma forma que nas outras peças de xadrez, como foi explicado anteriormente, devido ao desgaste do molde de silicone. Para o peão, foi possível também observar a presença de defeitos de gotas frias, como o peão é a menor peça de xadrez mesmo com massalote, havendo assim uma pequena dificuldade no vazamento do metal líquido, ocorrendo turbulência, possivelmente ocorreu respingos durante o seu vazamento, causando desta forma, a formação de pequenos grânulos de metal.

Abaixo é mostrado um comparativo do modelo do peão em cera com a peça metálica em alumínio e os respectivos defeitos gerados no processo de vazamento na casca cerâmica, conforme mostra a Figura 19:

Figura 19 - Comparativo da peça de xadrez: peão em cera de abelha (a) e peão em alumínio (b)

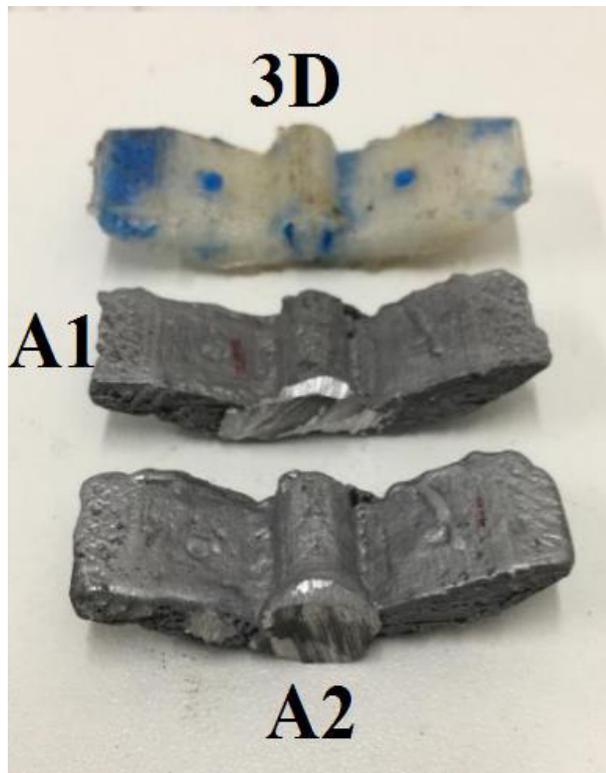


Fonte: Próprio autor, 2021.

Para todas as peças produzidas, possivelmente a presença do rechupe se encontra no massalote, pois é a última parte das peças a se solidificar, formando assim o vazio como foi então comentado nas referências bibliográficas, mas infelizmente não houve tempo hábil para tal análise, devido as adversidades decorrentes da pandemia.

Para análise e características das travas do sistema de ejeção do paraquedas do foguete de baixo empuxo, segue-se uma imagem do comparativo do modelo da trava do paraquedas em 3D, confeccionado pela impressora 3D com duas peças de alumínio produzidas pelo processo de fundição de precisão, as quais foram cortadas de sua árvore de fundição, conforme é mostrado na Figura 20:

Figura 20 - Comparativo do modelo em 3D com as duas travas produzidas em alumínio



Fonte: Próprio autor, 2021.

Analisando as peças metálicas produzidas, observou-se que em comparação com o modelo em 3D, as peças em alumínio copiaram bem as características superficiais do modelo em 3D, não apresentando gota fria, possivelmente devido a presença de um canal de vazamento em sua árvore de fundição, gerando um vazamento mais suave e preenchimento uniforme das peças no molde refratário.

A amostra 1 (A1) apresentou contração volumétrica de 10% (em volume), já a amostra 2 (A2) apresentou uma contração de 5% (em volume) aproximadamente comparada ao modelo confeccionado pela impressora 3D em uma proveta com água, pelo Princípio de Arquimedes, segundo Peter Beeley (2014), a contração volumétrica do alumínio puro é de 6,5%.

## 6 CONCLUSÃO

O propósito deste trabalho foi o desenvolvimento de uma casca cerâmica a partir da areia de construção civil (de baixo custo) pelo método da cera perdida. A composição desta casca cerâmica foi desenvolvida durante o período de estágio no LaF. Através do processo de fundição de precisão há a produção de peças metálicas com bom acabamento superficial.

O principal material utilizado na composição dessa casca cerâmica foi a areia de construção civil, do tipo arisco, onde todas as camadas do refratário apresentaram a mesma composição, sendo que na primeira camada foi selecionado grãos mais finos por uma peneira de 60 mesh, já nas quatro camadas posteriores os grãos foram mais grossos, através de uma peneira convencional. Vale aqui ressaltar que a casca refratária apresentou fácil remoção após a solidificação do metal.

Todas as amostras foram produzidas e geraram peças com bom acabamento superficial. Nas peças de xadrez foi evitado o rechupe devido ao massalote, no entanto houve um pouco de turbulência no vazamento e foi gerado alguns defeitos. É importante salientar que ocorra a troca dos moldes de silicone desgastados, obtendo-se assim peças de xadrez em cera com melhor acabamento. Já na produção das travas dos sistemas de ejeção do paraquedas do foguete de baixo empuxo, as peças se apresentaram com melhor qualidade, pois o canal de vazamento permitiu um preenchimento mais suave no molde refratário,

Pode-se então concluir que a casca cerâmica produzida no presente trabalho é satisfatória. A casca cerâmica se apresentou uniforme e resistente, não gerando trincas nas etapas dos processos e produzindo peças com boa qualidade de acabamento superficial.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a produção do presente trabalho, o qual se tratou de uma continuidade dos trabalhos de conclusão de graduação dos alunos Rubson Guimarães (2019) e Aléxia Araújo (2019), foram utilizadas as sugestões por eles mencionadas, como a utilização do ligante de silicato de sódio neutro. Foi também utilizada a produção de uma pequena árvore de fundição para a produção das travas do sistema de ejeção do paraquedas. Todavia, mesmo com a evolução do trabalho, é possível sugestões e novas tentativas de futuros trabalhos, como:

- Produção de uma árvore modelo maior, para possibilitar um maior número de produção de peças.
- Outra possibilidade é a utilização de vazamento de outros metais, já que para esse trabalho, só foi utilizado o alumínio.
- A casca cerâmica se apresentou com excelente resistência e bom acabamento das peças, mas para melhorar a qualidade superficial das peças, poderia ser utilizada peneiras com uma seleção de grãos mais finos.

## REFERÊNCIAS

BEELEY, Peter. **Foudry technology**. 2.ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2001.

GROOVER, Mikell P. **Introdução aos processos de fabricação**. São Paulo: LTC, 2014. cap.5 e 6.

LIMA, Ronaldo de Sousa. **Desenvolvimento de procedimentos operacionais padrão para criação de pequenas fundições**. 2017. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

GUIMARÃES, José Rubson de Sousa. **Desenvolvimento de um molde refratário para produção de peças metálicas pelo processo de fundição de precisão**. 2019. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

ARAUJO, Aléxia Jorge de Sousa. **Desenvolvimento de um rotor de bomba para foguetes de baixo empuxo por meio do processo de fundição de precisão**. 2019. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

Klug, Jeferson Leandro. Notas de aula. UFC, 2018.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Biblioteca Universitária. **Guia de normalização de trabalhos acadêmicos da Universidade Federal do Ceará**. Fortaleza, 2013.