



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

JOSÉ RUBSON DE SOUSA GUIMARÃES

**DESENVOLVIMENTO DE UM MOLDE REFRACTÁRIO PARA PRODUÇÃO DE
PEÇAS METÁLICAS PELO PROCESSO DE FUNDIÇÃO DE PRECISÃO**

FORTALEZA

2019

JOSÉ RUBSON DE SOUSA GUIMARÃES

DESENVOLVIMENTO DE UM MOLDE REFROTÁRIO PARA PRODUÇÃO DE PEÇAS
METÁLICAS PELO PROCESSO DE FUNDIÇÃO DE PRECISÃO

Monografia apresentada 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: Samuel Lucas Santos Medeiros

FORTALEZA

2019

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)

G978d Guimarães, José Rubson de Sousa.
Desenvolvimento de um molde refratário para produção de peças metálicas pelo processo de fundição de precisão / José Rubson de Sousa Guimarães. – 2019.
32 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Jeferson Leandro Klug.
Coorientação: Prof. Samuel Lucas Santos Medeiros.

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

CDD 669

JOSÉ RUBSON DE SOUSA GUIMARÃES

DESENVOLVIMENTO DE UM MOLDE REFRACTÁRIO PARA PRODUÇÃO DE PEÇAS
METÁLICAS PELO PROCESSO DE FUNDIÇÃO DE PRECISÃO

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais de 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)

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

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

Às minhas mães, Elizabeth e Socorro.

AGRADECIMENTOS

As minhas mães, Maria Elizabeth de Sousa Lima e Maria do Socorro Sousa Guimarães. A minha irmã, Germilina de Sousa Guimarães.

Ao meu irmão José Robson de Sousa Guimarães. A Eridan Lima e Elisângela Barreto, que mesmo não tendo o mesmo sangue, também são minhas irmãs. Ao Carlos Alberto, por me fazer torcer Flamengo.

A Evaneide de Sousa Barreto e José Gonçalves Guimarães, meu pai.

A Annyele Medeiros, namorada e parceira em todos os momentos.

Ao Prof. Dr. –Ing. Jeferson Leandro Klug, pela excelente orientação.

Ao Técnico do Laboratório de Fundação Samuel Medeiros, por toda ajuda.

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

Aos professores participantes da banca examinadora Ricardo Emílio Nogueira e Jorge Cardoso pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos meus amigos, dos mais antigos aos mais recentes.

“Viver é lutar.

A vida é combate,

Que os fracos abate,

Que os fortes, os bravos

Só pode exaltar.”

Gonçalves Dias: Canção do Tamoio.

RESUMO

No Laboratório de Fundição são realizados, de maneira didática, os principais processos da área. A fundição de precisão por cera perdida é um exemplo deles. Tendo um método já estabelecido para a realização desse processo, foi realizado este trabalho visando desenvolver uma nova maneira para produzir peças metálicas, partindo de um modelo de cera (que será perdido). Inicialmente o laboratório produzia o *investment* receptor do metal líquido com areia, gesso e água. As peças, até então produzidas, cumprem bem suas obrigações: exemplificar o processo, mostrando de jeito simples como as peças são produzidas e os defeitos que podem surgir nelas. Com o objetivo de executar um novo método de confecção de fundidos, aproximando-o da maneira feita na indústria, ou seja, gerando peças com menos defeitos e que não precisem ser submetidas a outros processos, como usinagem ou conformação. Realizou-se este trabalho buscando encontrar a composição correta dos novos materiais constituintes da casca cerâmica: silicato e pó refratário. As peças obtidas foram comparadas as outras feitas pelo método antigo. Assim, foram julgados quais dos dois apresenta a melhor relação custo benefício para ser explorado pelo laboratório.

Palavras-chave: Fundição, Fundição de precisão, Cera perdida.

ABSTRACT

In the Foundry Laboratory, the main processes of the area are carried out in a didactic way. Precision casting for lost wax is an example of them. Having a method already established for the accomplishment of this process, this work was carried out in order to develop a new way to produce metal parts, starting from a wax model (which will be lost). Initially the laboratory produced the investment liquid metal receiver with sand, plaster and water. The pieces, so far produced, fulfill their obligations well: to exemplify the process, showing in a simple way how the pieces are produced and the defects that can appear in them. With the objective of executing a new method of confection of castings, approaching it in the way made in the industry, that is, generating parts with less defects and that do not have to be submitted to other processes, like machining or conformation. This work was carried out in order to find the correct composition of the new constituent materials of the ceramic shell: silicate and refractory powder. The parts obtained were compared to others made by the old method. Thus, they were judged which of the two presents the best cost-benefit relation to be explored by the laboratory.

Keywords: Foundry. Investment casting. Lost wax.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Etapas do processo de fundição de precisão	17
Figura 2	– Árvores de fundição: de cera parafina (a) e de cera de carnaúba (b)	19
Figura 3	– Molde cerâmico (a) e forno mufla do LaF (b)	19
Figura 4	– Forma de silicone (a), peça de cera (b) e árvore de fundição (c)	21
Figura 5	– Casca deformada durante o processo de derretimento da cera.....	21
Figura 6	– Forno de indução do LaF.....	22
Figura 7	– Peça obtida na segunda tentativa.....	23
Figura 8	– Resultado do vazamento na terceira tentativa.....	23
Figura 9	– Amostras A (a), B (b), C (c)	24
Figura 10	– <i>Investments</i> : Amostras A (a), B (b) e C (c)	24
Figura 11	– Interior do molde das três amostras: A (a), B (b), C (c)	25
Figura 12	– Vazamento do metal líquido	25
Figura 13	– Moldes após vazamento de metal líquido	26
Figura 14	– Amostra A, resultado após o vazamento	26
Figura 15	– Amostra B, resultado após o vazamento	27
Figura 16	– Amostra C, resultado após o vazamento	27
Figura 17	– Casca refratária quebrada no derretimento da cera	28
Figura 18	– Casca cerâmica depois do derretimento da cera (a) e após a aplicação da primeira camada (b)	29
Figura 19	– Peças obtidas no primeiro vazamento	29
Figura 20	– Amostra A (a): sem deformações e amostras B (b) e C (c): com deformações	30
Figura 21	– Moldes trincados após o vazamento	30
Figura 22	– Peças obtidas no último vazamento	31
Figura 23	– Peças obtidas com moldes feitos com areia, gesso e água	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
trad.	Tradutor
Laf	Laboratório de Fundição
UFC	Universidade Federal do Ceará
p	Em peso

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
k	Quilo
W	Watts

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	Processos de fundição	16
3.1.1	<i>Fundição de precisão</i>	16
3.2	Defeitos em peças fundidas	17
4	MATERIAIS E MÉTODOS	19
4.1	Materiais utilizados	19
4.2	Confecção da casca cerâmica	20
4.3	Etapas do estudo	20
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
6	CONCLUSÃO	32
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	33
	REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

No Laboratório de Fundição (LaF) do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais são desenvolvidos experimentos partindo do conhecimento adquirido na disciplina dos processos de fundição. Entre eles, um processo bastante praticado no local é a fundição de precisão através de cera perdida.

Um modelo feito de cera é coberto por uma camada (ou mais) de material refratário, sendo esse envoltório cerâmico o futuro molde que receberá o metal líquido. Para a confecção do molde refratário, até o momento da produção desse trabalho, os materiais utilizados no Laboratório são: água, areia e gesso. Com esses elementos, faz-se uma mistura (de composição já estabelecida em procedimento fornecido pelo laboratório) no qual o modelo de cera é imerso. A mistura seca formando a casca cerâmica que irá ao forno, inicialmente para o modelo de cera derreter. Em seguida, realiza-se a calcinação e por último a vazamento de metal líquido no molde. A técnica é simples e normalmente gera um produto final com defeitos.

A produção das peças metálicas feitas no LaF, na maioria das vezes, tem como finalidade a compreensão didática do processo e o estudo dos defeitos por parte das turmas da disciplina de fundição.

Visando diminuir os defeitos e assim aperfeiçoar o produto final, esse trabalho foi realizado na tentativa de desenvolver um novo método de confecção do molde refratário, utilizando novos materiais que possibilitem a produção de peças com melhor acabamento. Ao final, serão apresentados os resultados obtidos até aqui, avaliando se é mais vantajoso continuar usando o método já estabelecido ou passar a adotar a técnica empregada nesse relatório.

2 OBJETIVOS

Objetivos específicos: produzir peças através do método estudado neste trabalho.

Objetivos gerais: Desenvolver e Avaliar a implementação no laboratório de fundição de uma nova técnica de fundição de precisão, utilizando um diferente material ligante (silicato de sódio) e um diferente refratário (cimento refratário de alta alumina) para a confecção dos moldes.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Serão apresentados alguns pontos analisados da literatura que fundamentaram esse trabalho. As explicações a seguir serão apresentadas de maneira muito sucintas, pois elas já foram bem abordadas em TCCs anteriores produzidos no LaF. Em especial, o trabalho do aluno Ronaldo Souza (2017).

3.1 Processos de fundição

A humanidade usa esse processo há bastante tempo, isso, porque o processo é relativamente simples: consiste em despejar metal líquido em um recipiente, no qual, o fluido solidificará e passará a ter a forma do seu receptáculo.

Peter Beeley (2001) descreve algumas vantagens obtidas ao se trabalhar com fundição:

- Capacidade de produção em série ou de peças únicas. E de vários tamanhos, pesos e formas.
- Processo que pode ter baixo investimento inicial.
- Em teoria, qualquer metal pode se usado. Absorvendo assim materiais difíceis de serem trabalhados em outros processos como usinagem.

Com o passar do tempo, foram desenvolvendo 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

Para Beeley (2001) a fundição de precisão consiste em processos que usam um molde produzido com material refratário de pequena granulometria. Sendo capaz de reproduzir detalhes precisos e de vários tamanhos, além de uma grande versatilidade de metais que podem ser usados.

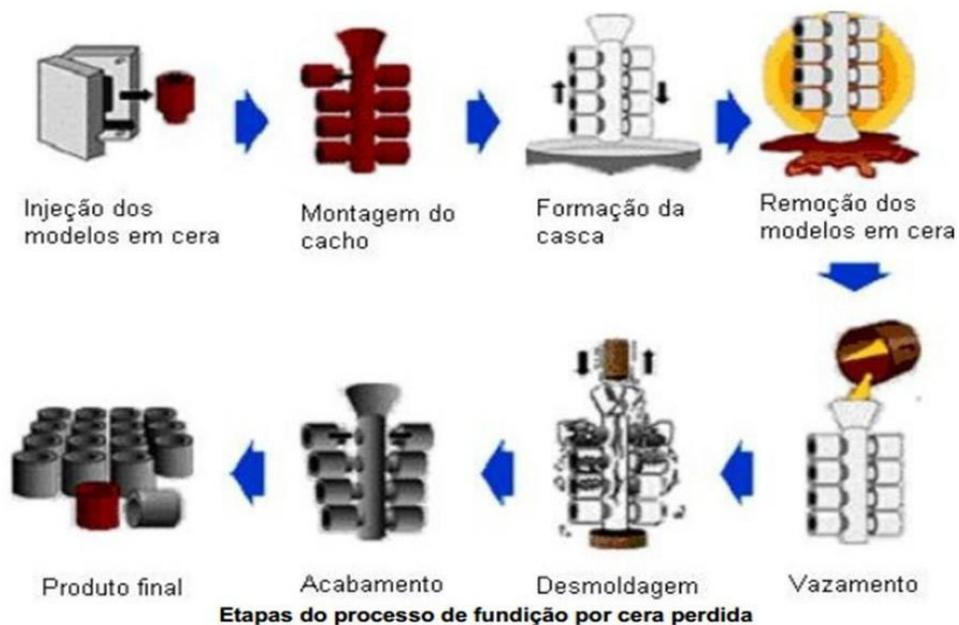
O processo também é conhecido por fundição com cera perdida, pois, utilizam-se peças modelos de cera. Essas, por sua vez, são derretidas após a confecção do molde receptor do metal líquido.

Na indústria, para otimizar a produção em grande escala, as peças de cera são coladas em um cacho, chamado de árvore de fundição (que também servirá de canal de vazamento do metal líquido). A árvore, então, é recoberta pela a casca cerâmica ainda líquida. Após o período de secagem, tem-se um molde com a peça modelo de cera dentro. Essa será derretida (podendo ser reutilizada posteriormente), restando apenas à casca, também chamada de investment.

O molde é pré-aquecido e recebe o metal líquido. Após o material fundido solidificar, o investment é quebrado e está pronta a peça.

A figura 1 apresenta de maneira esquemática as etapas do processo.

Figura 1 – Etapas do processo de fundição de precisão



Fonte: RioInox Microfusão, 2019.

3.2 Defeitos em peças fundidas

Os defeitos em peças fundidas podem ser originados do método usado e/ou da aplicação da técnica. Groover (2014) cita os defeitos que podem surgir das causas citadas:

- Falha de preenchimento: O metal solidifica antes de preencher totalmente o molde. Pode ocorrer devido o metal líquido ter pouca fluidez, o

vazamento ter sido lento e/ou o metal não ter recebido calor suficiente para permanecer líquido tempo bastante até completar o preenchimento.

- Gotas frias: Respingos ao longo do vazamento que causam a formação de grânulos sólidos na peça solidificada.
- Bolhas: Cavidade causada pela liberação de gases. Umidade ou baixa permeabilidade do molde são os responsáveis.
- Microporosidade: Série de pequenas bolhas superficiais na peça.
- Penetração: O metal líquido desgasta a parede do molde e quando solidifica, a peça apresenta rugosidade.
- Trinca do molde: O molde não possui resistência mecânica suficiente e trinca. A peça metálica apresentará apêndices na forma das trincas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Partindo do conhecimento adquirido na disciplina de fundição e das pesquisas na literatura, teve-se início a parte prática do trabalho.

Visando a produção de peças com maior qualidade, o LaF busca aprimorar uma nova técnica de fundição de precisão, agregando conhecimento que poderá ser passado para os próximos alunos que tiverem contato com o laboratório e com a disciplina de fundição do curso de engenharia metalúrgica.

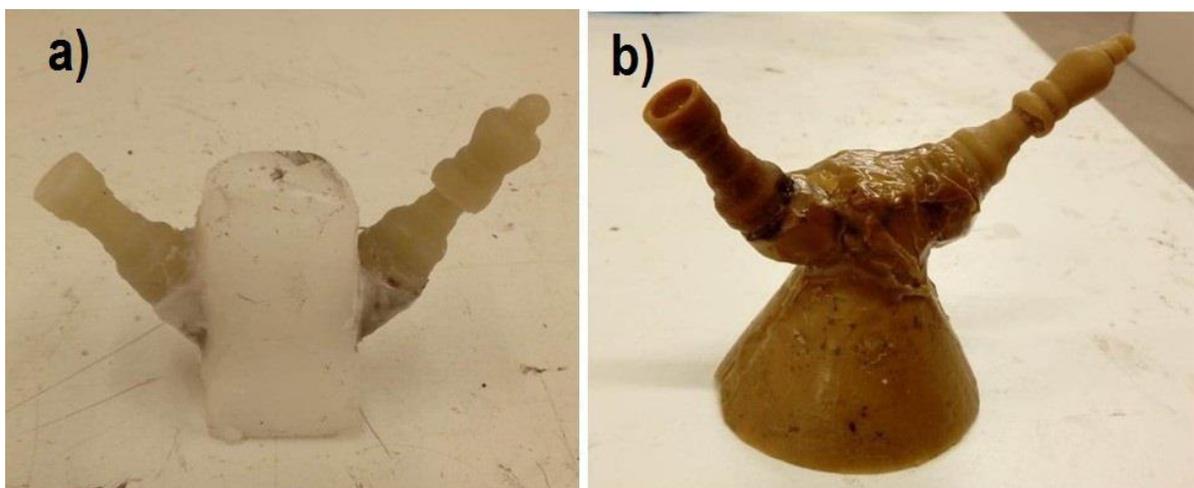
4.1 Materiais utilizados

Para a realização do experimento foram usados os seguintes materiais: silicato de sódio, cimento e areia para a confecção do molde refratário.

O silicato de sódio neutro tem função de ligante para um pó refratário. O cimento é do tipo refratário para altas temperaturas a base de CaO e Al_2O_3 , doado por uma usina siderúrgica. Ele atua como refratário e suporta altas temperaturas permitindo assim, o molde receber metal líquido. O cimento deve ter uma granulometria menor possível e passou por uma peneira de 200 mesh.

Como modelos, foram usadas peças de xadrez de cera produzidas no LaF. Sendo usadas sempre duas peças para a produção da árvore de fundição (feitas com cera de carnaúba, produto típico da região Nordeste, ou cera parafina), como mostrado na figura 2.

Figura 2 – Árvores de fundição: de cera parafina (a) e de cera de carnaúba (b)



Fonte: Próprio autor.

Para o vazamento nas cascas cerâmicas, foi usado alumínio e cobre, ambos obtidos de sucata dos respectivos metais.

4.2 Confeção da casca cerâmica

O método originalmente usado no LaF é bastante simples: combinar areia, gesso e água e mergulhar o modelo de cera na mistura, esperá-la secar e levar ao forno primeiramente para derreter a cera. Levar uma segunda vez para realizar a calcinação e por fim, vazá-lo com o metal líquido.

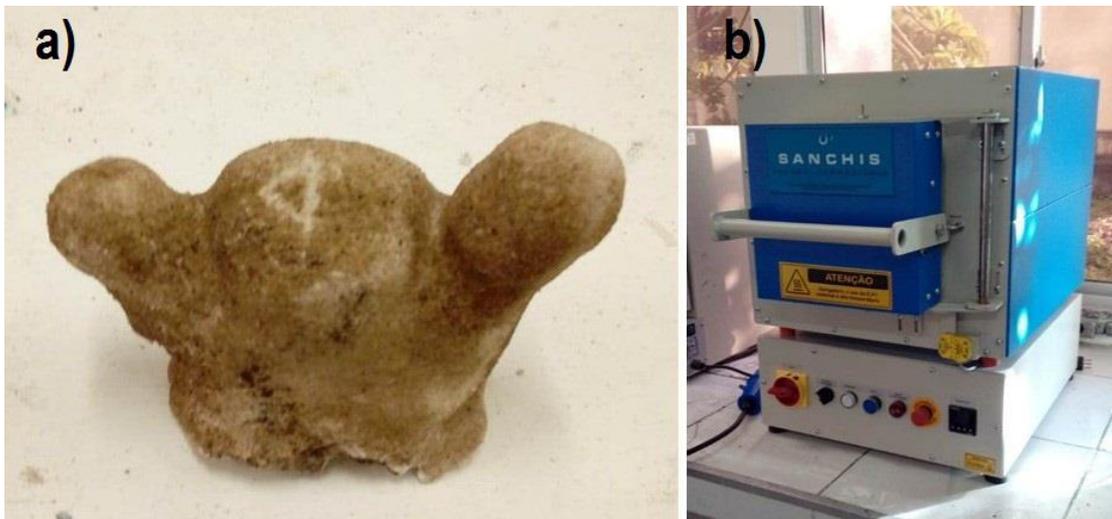
O método estudado, por sua vez, consiste em: produzir uma mistura, a partir do silicato de sódio neutro e de cimento (em proporções analisadas adiante) e aplicá-la sobre a árvore de fundição com as peças modelos.

Sobre a casca cerâmica (investment), ainda em estado fluido foi aplicada uma camada de areia para avaliar se sua adição melhoraria a qualidade superficial da peça. Essa ação foi repetida algumas vezes com o intuito de conseguir um molde resistente para o vazamento do metal líquido.

A casca foi ao forno mufla uma primeira vez para derreter a cera e uma segunda vez para o processo de calcinação.

Por fim, ela recebe o metal fundido, análogo ao método original do laboratório.

Figura 3 - Molde cerâmico (a) e forno mufla do LaF (b).



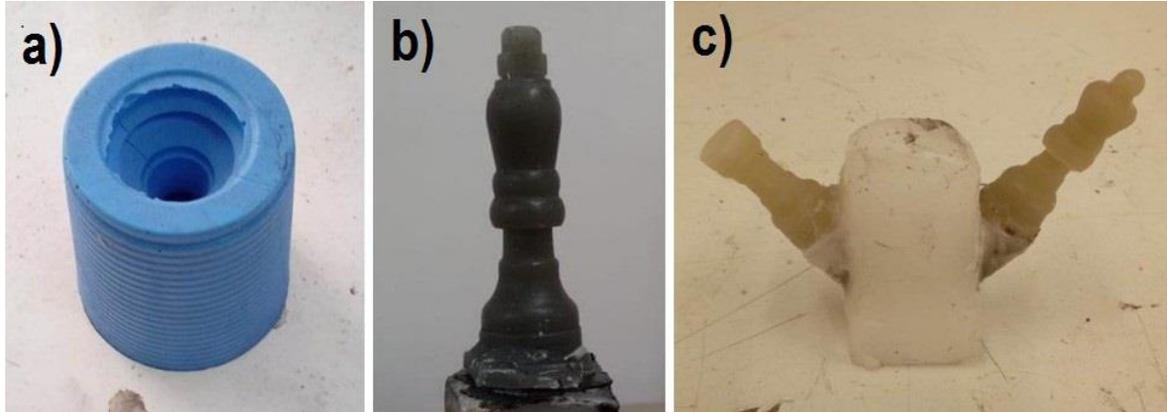
Fonte: Próprio autor.

4.3 Etapas do estudo

Inicialmente, foram criadas as peças de cera que serviram de modelo. Para isso, despejou-se cera líquida em formas de silicone com formato de peças de xadrez, obtendo

assim as unidades utilizadas para a realização desse trabalho. Com essas componentes feitas, o passo seguinte foi produzir árvores de fundição. A figura 4 mostra uma dessas árvores.

Figura 4 – Forma de silicone (a), peça de cera (b) e árvore de fundição (c).



Fonte: Próprio autor.

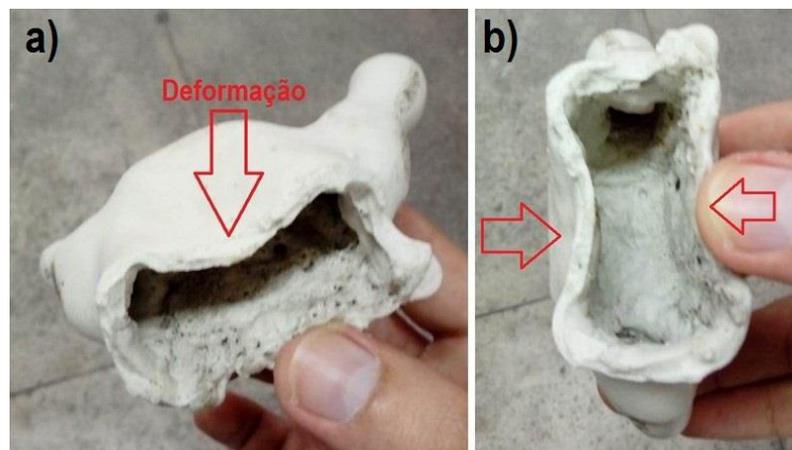
Seguindo com o trabalho, começaram as tentativas de produção do investimento.

Na primeira tentativa testou-se uma mistura composta por 70%p de silicato de sódio e 30%p de cimento (proporção em peso). O composto foi aplicado com um pincel formando uma camada sobre duas árvores de fundição. Essa ação ocorreu quatro vezes, com um intervalo de tempo de duas horas entre a aplicação de cada camada.

Passadas às duas horas de secagem após o quarto (e último) estrato, um *investment* foi levado ao forno, enquanto o segundo foi deixado secando por uma semana, a uma temperatura de 150 °C, para derreter a cera de ambas as cascas.

O molde cerâmico levado ao forno após duas horas de aplicada a última camada apresentou um comportamento inesperado e derreteu junto com a peça modelo. A amostra que passou uma semana secando até ir ao forno não derreteu porem, deformou-se bastante, como mostrado na figura 5.

Figura 5 – Casca deformada durante o processo de derretimento da cera.



Fonte: Próprio autor.

Segunda tentativa: seguindo com o experimento, para tentar solucionar os problemas encontrados, duas medidas foram tomadas: aumentar a proporção do pó refratário e deixar o *investment* secar por 24 horas antes de levá-lo ao forno.

A mistura passou a ser feita com 50%p dos elementos. Novamente, foram aplicadas quatro camadas do estrato com um intervalo de tempo de 2 horas entre elas. Ao final da atividade, deixou-se a casca secando por um dia. Ela foi levada ao forno mufla para a cera ser derretida e em seguida, foi realizada a etapa da calcinação, no qual o molde foi aquecido a 300 °C por 1 hora.

O metal escolhido para o vazamento foi o alumínio.

Sucata de alumínio fundida no forno de indução (figura 6) do laboratório para ser obtido o metal líquido.

Figura 6 – Forno de indução do LaF.

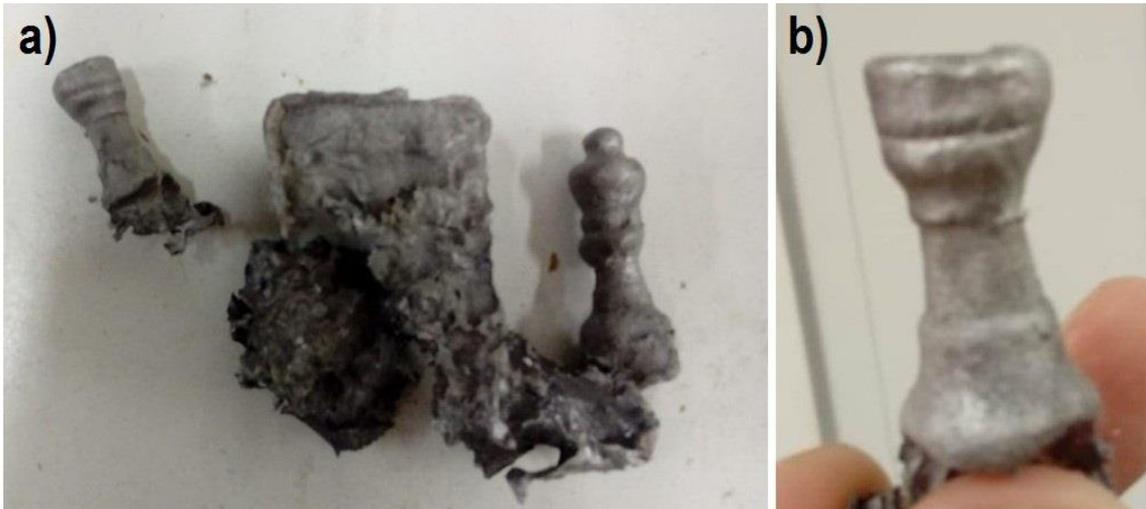


Fonte: Próprio autor.

Esse forno de indução elétrica opera até uma potência máxima de 50 kW (marca SERVIFOR Ltda) e ele possui sistema de refrigeração, exaustor de poluentes e uma caixa refratária fixa para receber o cadinho com o metal.

No momento que o metal líquido foi vazado, bolhas se formaram e o molde trincou ainda no início do vazamento, quebrando logo em seguida. Uma parte do metal líquido ficou represada no investment e a maior parte escorreu pelas trincas. O metal que ficou retido solidificou formando a peça que pode ser vista na figura 7.

Figura 7 – Peça obtida na segunda tentativa.



Fonte: Próprio autor.

Terceira tentativa: similar a tentativa anterior, porém, alterou-se um fator, a cada camada de casca aplicada a peça modelo, foi adicionada um substrato de areia visando aumentar a permeabilidade dos gases produzidos no momento do vazamento de metal líquido.

O *investment* foi levado ao forno, similar à segunda tentativa. No momento que a casca foi retirada do forno após a calcinação, ela caiu, acidentalmente, no chão. Esse fato fez surgir uma pequena trinca próxima ao galho da árvore, onde fica a peça modelo. No momento que o metal líquido (novamente alumínio) estava sendo vazado, a casca quebrou.

A figura mostra como ficou a peça metálica.

Figura 8 – Resultado do vazamento na terceira tentativa.

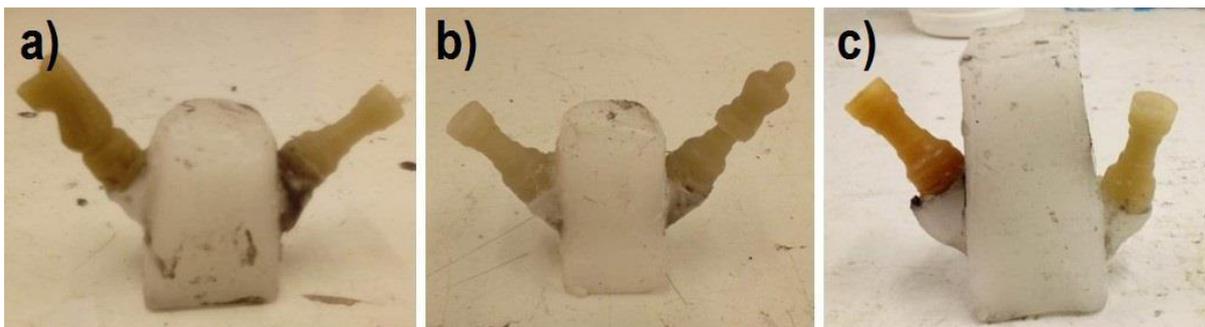


Fonte: Próprio autor.

Quarta tentativa: Continuou-se a usar a proporção 50%p de silicato e 50%p de cimento. Porém, aumentou-se o número de camadas aplicadas: foram feitos sete estratos (todos recobertos com areia).

Para essa tentativa, foram feitas três árvores de fundição. Elas foram classificadas como: amostra A, B e C. É possível observá-las na figura 9.

Figura 9 – Amostras A (a), B (b), C (c).

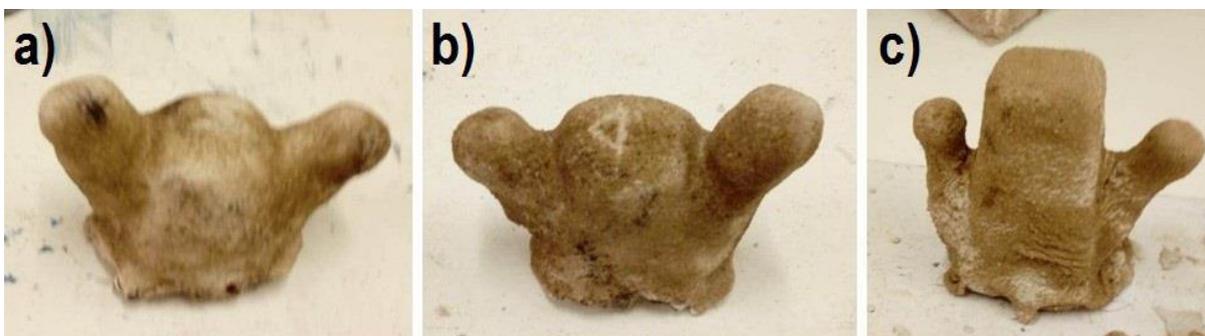


Fonte: Próprio autor.

Os três modelos receberam a seguinte preparação: camadas de silicato de sódio com pó refratário (50% em peso de cada elemento), seguindo de uma película de areia. O processo ocorreu sete vezes, sendo os quatro primeiros estratos aplicados com um intervalo de duas horas. A quinta, sexta e sétima camada foram executadas no dia seguinte, com um intervalo de 2 horas entre cada uma.

A única diferença na produção dos *investments* (figura 10) ocorreu no tempo entre a aplicação da sétima camada e o momento de derretimento da cera. A amostra A foi produzida seis dias antes das amostras B e C. Por esse fato, o tempo de secagem do primeiro molde foi de sete dias e dos demais foram de aproximadamente 24 horas.

Figura 10 – *Investments*: Amostras A (a), B (b) e C (c).



Fonte: Próprio autor.

Os três *investments* foram aquecido até 180 °C no forno mufla até a cera derreter totalmente. A figura 11 mostra o interior dos moldes refratários.

Figura 11 – Interior do molde das três amostras: A (a), B (b), C (c).



Fonte: Próprio autor.

A seguir foi realizada a etapa da calcinação, no qual as três peças foram aquecidas a 800 °C. Um dia após a calcinação, antes de ocorrer o vazamento do metal líquido nas cascas cerâmicas, elas receberam pré-aquecimento a 300 °C por uma hora. Para essa tentativa, utilizou-se cobre, pois, como apresenta densidade maior que o alumínio, esperava-se que ele assenta-se mais rapidamente no molde, assim copiando melhor os detalhes da peça modelo. Imagens do momento do vazamento são mostradas na figura 12.

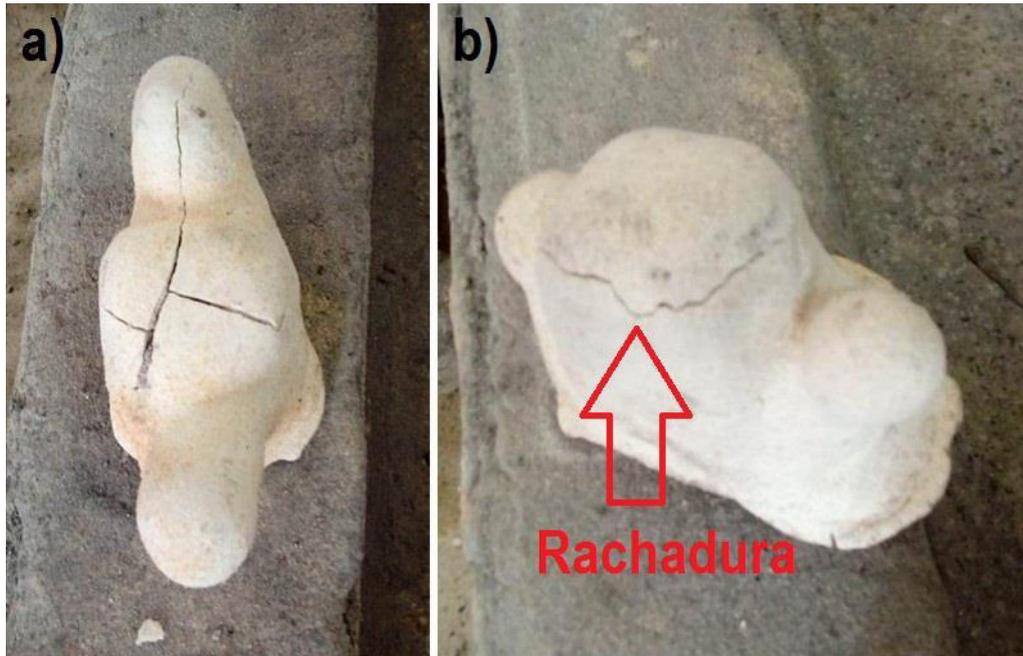
Figura 12 – Vazamento do metal líquido.



Fonte: Próprio autor.

Realizado o vazamento nos investment, formaram-se trincas, porém, o molde não rompeu como em casos anteriores.

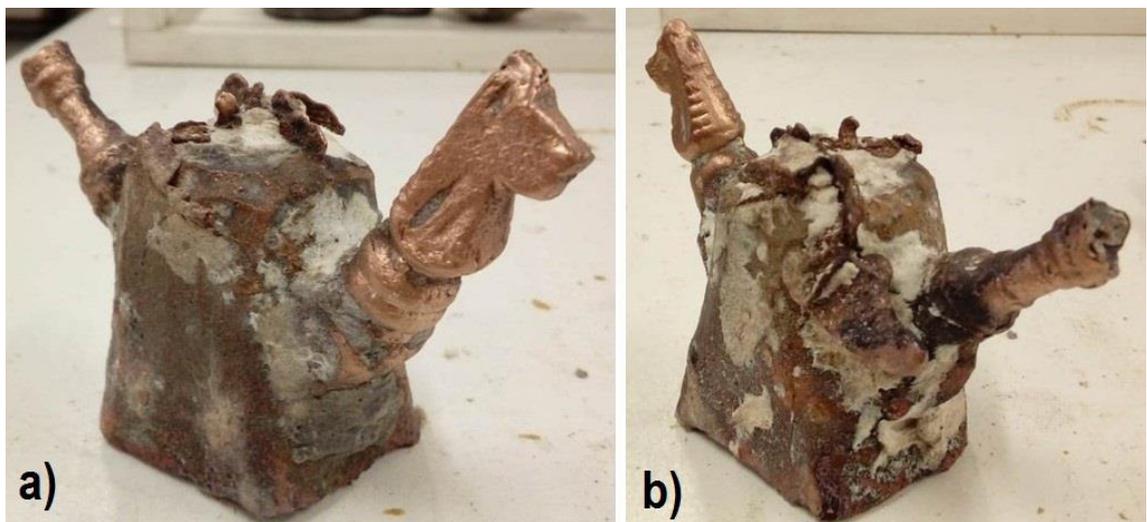
Figura 13 – Moldes após vazamento de metal líquido.



Fonte: Próprio autor.

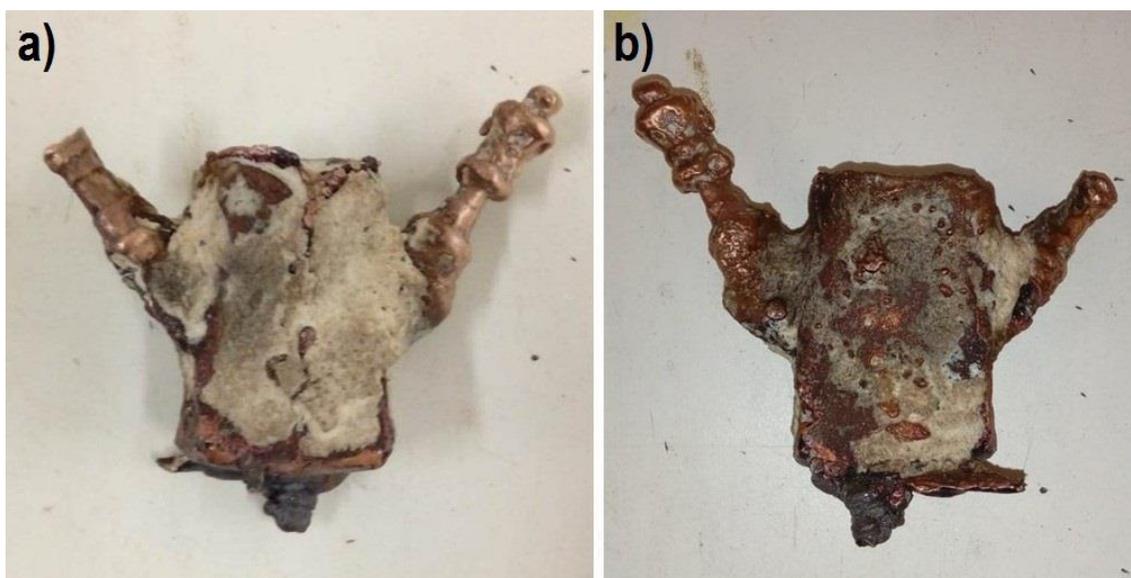
Após o metal solidificar dentro da casca cerâmica, esperou-se alguns minutos até o material resfriar completamente e então a casca ser quebrada. Da figura 14 a figura 16 é possível observar o formato das peças metálicas.

Figura 14 – Amostra A, resultado após o vazamento.



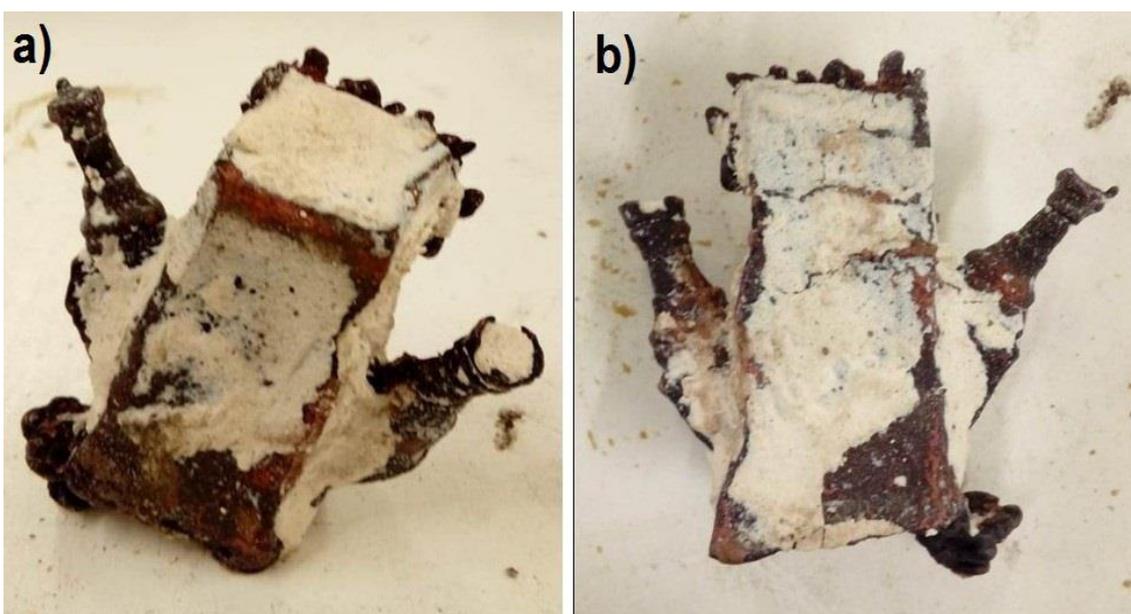
Fonte: Próprio autor.

Figura 15 – Amostra B, resultado após o vazamento.



Fonte: Próprio autor.

Figura 16 – Amostra C, resultado após o vazamento.



Fonte: Próprio autor.

Não se fez um *investment* composto com uma proporção maior que 50%p de cimento, pois, para esses valores, a mistura apresentou uma viscosidade muito elevada, tornando-se assim, inviável pincelar a combinação na peça modelo.

Visando-se melhorar o acabamento das peças obtidas, uma nova tentativa foi realizada. A seguir, serão descritas as mudanças buscando aprimorar o processo.

Quinta tentativa: A última tentativa realizada neste trabalho para se obter peças metálicas de melhor qualidade.

Testou-se então uma nova mistura visando resolver os problemas encontrados anteriormente. Para isso, a proporção de silicato foi reduzida para menos de 20%p, o cimento passou a constituir mais de 50 %p da mistura. Uma última parte foi completada com areia de baixa granulometria (peneirada a 200 *mesh*). Para tornar a composição fluida, adicionou-se água até ela apresentar uma consistência de tinta.

Foram aplicadas seis camadas em duas árvores de fundição, sendo dado um intervalo mínimo de duas horas entre elas. Após 24 horas da execução do último estrato do molde, as amostras foram levadas ao forno. No momento do derretimento da cera, os *investments* quebraram, como mostra a figura 17.

Figura 17 – Casca refratária quebrada no derretimento da cera.

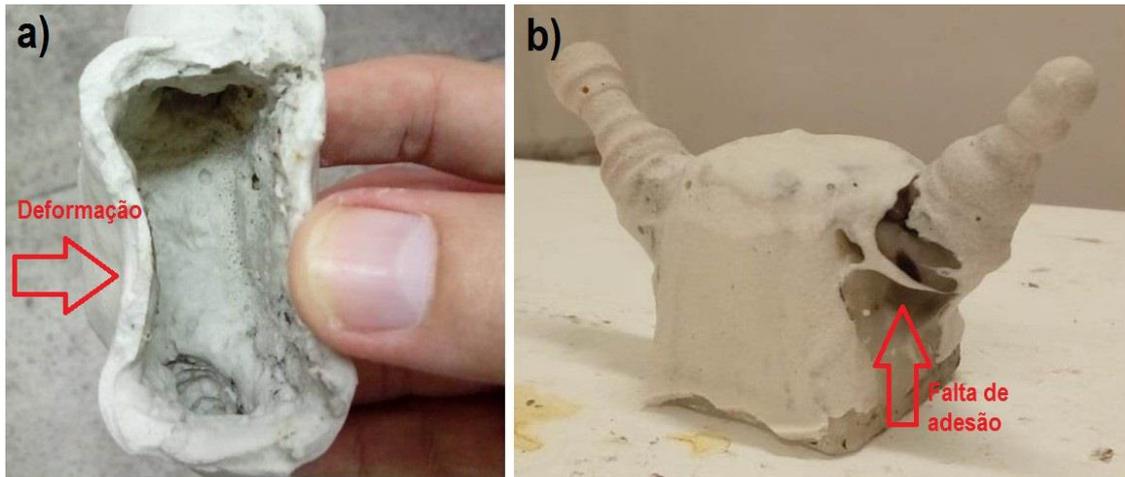


Fonte: Próprio autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na primeira tentativa, observou-se que o silicato torna a mistura fluida e copiava bem as superfícies. Porém, ele apresenta alguns problemas: deforma o molde e não se liga com cera parafina, como mostra a figura 18.

Figura 18 – Casca cerâmica depois do derretimento da cera (a) e após a aplicação da primeira camada (b).



Fonte: Próprio autor.

Reduzindo a quantidade de silicato esperando a casca secar por pelo menos um dia, após a aplicação da última camada, a casca não deformou. No entanto, durante o vazamento, o surgimento de bolhas mostrou que havia umidade no *investment*, além de o metal ter solidificado rápido demais, indicando que era necessário ter recebido mais calor para permanecer líquido durante todo o vazamento. Esses fatos culminaram no rompimento do molde, não sendo possível obter peças minimamente satisfatórias, como pode ver visto na figura 19.

Figura 19 – Peças obtidas no primeiro vazamento.

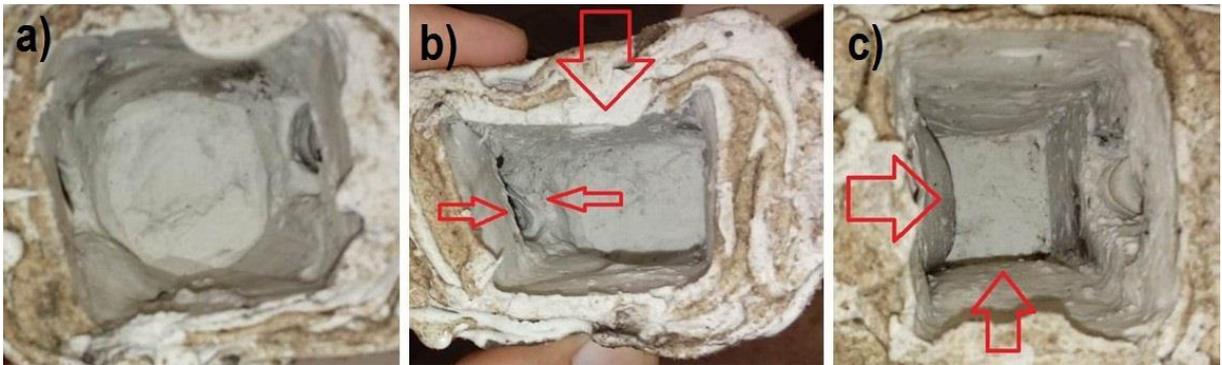


Fonte: Próprio autor.

Na tentativa seguinte, a queda do investment no momento que ele era retirado do forno (após a calcinação) impede qualquer conclusão sobre o molde, uma vez que fissuras surgiram nele. E no momento do vazamento, as rachaduras aumentaram e romperam.

Na quarta tentativa, observou-se que a quantidade de silicato ainda estava alta. As amostras B e C que tiveram 24 horas de secagem antes de terem a cera retirada, ainda sofreram certo grau de deformação, enquanto a peça A (uma semana secando após a aplicação da última camada) não deformou. Como mostrado na figura 20.

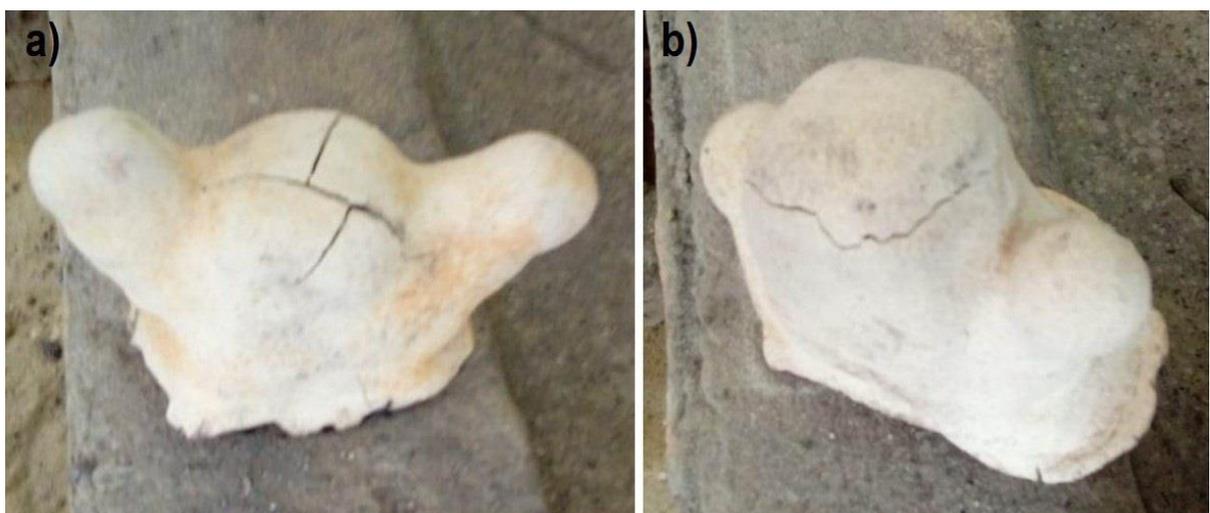
Figura 20 – Amostra A (a): sem deformações e amostras B (b) e C (c): com deformações.



Fonte: Próprio autor.

As amostras receberam pré-aquecimento e o metal foi aquecido a temperatura suficiente para não solidificar no meio do vazamento. Os *investments* apresentaram rachaduras (observar figura 21) no momento que o metal líquido foi vazado, mas não romperam.

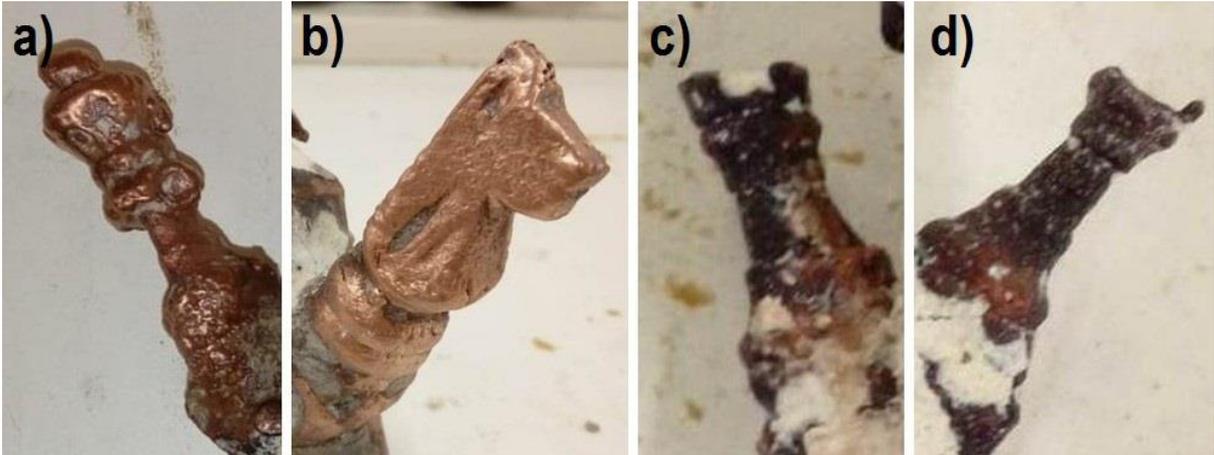
Figura 21 – Moldes trincados após o vazamento.



Fonte: Próprio autor.

As peças, no entanto, não apresentaram qualidade que justifique a adoção do processo no laboratório. Na figura 22 podem ser vista as peças obtidas nessa tentativa.

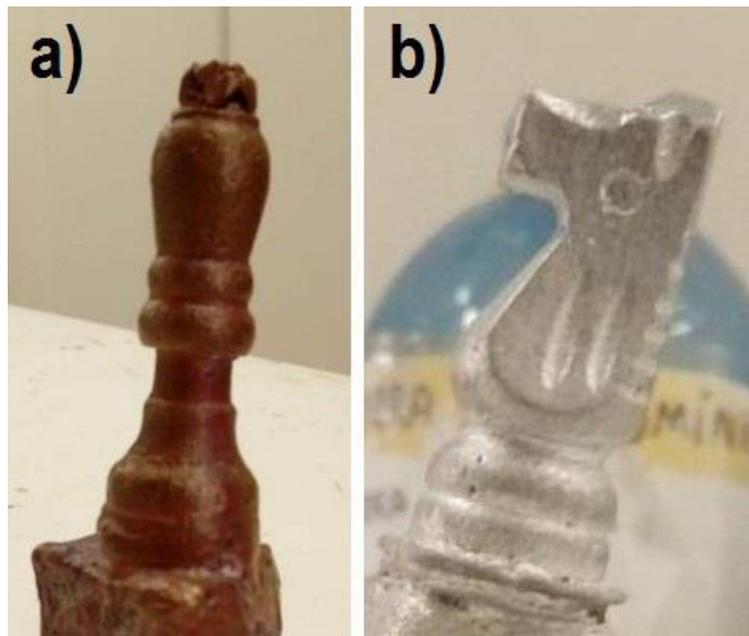
Figura 22 – Peças obtidas no último vazamento.



Fonte: Próprio autor.

A figura 23 mostra peças feitas pelo método primário adotado no laboratório, no qual, usam-se apenas areia, gesso e água.

Figura 23 – Peças obtidas com moldes feitos com areia, gesso e água.



Fonte: Próprio autor.

Comparando as peças obtidas nesse trabalho com as peças produzidas anteriormente, Nota-se que o processo novo precisa ser mais bem compreendido.

Na última tentativa, o molde quebrou dentro do forno durante a etapa do derretimento da cera. Uma possível explicação para esse fato e para o surgimento de trincas após essa mesma fase pode ser uma expansão apresentada pela cera parafina (que é um derivado do petróleo) no momento da fusão. Na indústria, usa-se cera orgânica, principalmente de abelha. Talvez o uso de ceras derivadas de petróleo tenha comprometido o resultado do trabalho.

6 CONCLUSÃO

O intuito desse trabalho foi o desenvolvimento de um novo método que pudesse gerar peças metálicas com melhor acabamento que a técnica primária usada no LaF, pois na fundição é necessária a melhor qualidade possível, uma vez que se deseja produzir uma peça mais próxima do seu formato final, necessitando o mínimo possível da utilização de outros processos associados, sendo essa uma das grandes vantagens dos fundidos.

Observou-se, porém, que esse método carece ser desenvolvido e estudado com mais profundidade, sendo revistos os materiais utilizados, uma vez que a qualidade das peças metálicas ficou muito abaixo do esperado e essa técnica não apresentou o resultado esperado: peças com poucos defeitos superficiais e muito parecidas com as peças modelos.

Alguns fenômenos envolvidos nesse processo precisam ser melhor entendidos, mas algumas conclusões puderam ser obtidas. Momentaneamente, pelo menos, o método de confecção do molde refratário feito com gesso, areia e água é melhor que a opção estudada no trabalho, tanto pelo tempo gasto para realizá-lo quanto pela qualidade da peça produzida.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Observou-se ao longo da realização do trabalho a baixa afinidade polar entre a cera e o silicato, facilmente percebida nas tentativas em que as cascas cerâmicas apresentavam uma proporção maior do composto químico. Em peças modelos feitas de cera de carnaúba, a aderência da mistura é um pouco melhor que em amostras de cera parafínicas, mesmo assim, há adesão e baixa entre esses elementos. Para experimentos futuros, algumas alternativas podem ser testadas:

- Usar outro material para confecção das peças modelos;
- Aumentar a rugosidade das peças de cera.
- Usar ceras orgânicas.
- Mergulhar a árvore de fundição na mistura ao invés de pincelá-la.

REFERÊNCIAS

- BEELEY, Peter. **Foudry technology**. 2.ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2001.
- GARCIA, A. **Solidificação: fundamentos e aplicações**. 2° ed. Editora da Unicamp, Campinas, São Paulo, 2001.
- FALCONI, Vicente. **Qualidade total: padronização de empresas**. 2. ed. Minas Gerais: Falconi, 2014.
- GROOVER, Mikell P. **Introdução aos processos de fabricação**. São Paulo: LTC, 2014. cap.5 e 6.
- LIMA, Ronaldo de Souza. **Desenvolvimento de procedimentos operacionais padrão para a criação de pequenas fundições**. 2017. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- LIMA, Marcos Natan da Silva. **Caracterização e propriedades mecânicas dos aços com alto teor de manganês (18- 28% p) e carbono (1,1-1,7% p) produzidos em um forno de indução no laboratório de fundição da Universidade Federal do Ceará**. 2016. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- MOREIRA, Eugênio *et al.* **Documentation and digital fabrication methods for restoration of clectic metal ornaments**. Frontiers of Science and Technology, 2016.
- VIEIRA, Maurício. Ceará é líder na produção nacional de cera de carnaúba. **Diário do Nordeste**, Fortaleza, 27 nov. 2008. Disponível em: <<https://goo.gl/ng3CWe>>. Acesso em: 30 jun. 19.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Biblioteca Universitária. **Guia de normalização de trabalhos acadêmicos da Universidade Federal do Ceará**. Fortaleza, 2013.