



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

FERNANDO JOSÉ RIBEIRO AMARAL

**DESENVOLVIMENTO DE UMA NOVA FÓRMULA DE CASCA CERÂMICA PARA
FUNDIÇÃO EM CERA PERDIDA**

FORTALEZA
2021

FERNANDO JOSÉ RIBEIRO AMARAL

DESENVOLVIMENTO DE UMA NOVA FÓRMULA DE CASCA CERÂMICA PARA
FUNDIÇÃO EM CERA PERDIDA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Metalúrgica do Departamento 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)

A514d Amara, Fernando José Ribeiro.
 Desenvolvimento de uma nova fórmula de casca cerâmica para fundição em cera perdida / Fernando José
 Ribeiro Amara. – 2021.
 43 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. Cera perdida. 3. casca cerâmica. I. Título.

CDD 669

FERNANDO JOSÉ RIBEIRO AMARAL

DESENVOLVIMENTO DE UMA NOVA FÓRMULA DE CASCA CERÂMICA PARA
FUNDIÇÃO EM CERA PERDIDA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Metalúrgica do Departamento 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. André Valente Bueno
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À Deus.

Aos meus pais, Fernando e Jaqueline.

Aos meus irmãos, Wesley e Camila.

À minha namorada, Mariana.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ser a minha fortaleza e me dar forças para continuar seguindo nessa jornada.

Aos meus pais, Fernando e Jaqueline, por todo o amor, dedicação e compreensão.

Aos meus irmãos, Wescley e Camila, pela amizade e apoio.

À minha namorada Mariana, pelo amor, carinho e incentivo durante essa jornada.

Ao professor e orientador Dr. – Ing. Jeferson Leandro Klug e ao Coorientador, Mestre Samuel Lucas Santos Medeiros, pela orientação e auxílio na execução dos ensaios.

Ao professor participante da banca examinadora, André Bueno, pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos colegas da Universidade, em especial Cesanildo, Francisco Henry, Luís Antônio, Caio Fernandes, Gabriel Melo, Fernando Sales, Nilis Cunha e Raí Machado.

À CAPES, pelo apoio.

“Faça o que puder, com o que tiver, onde estiver.” Theodore Roosevelt.

RESUMO

Este trabalho foi realizado visando o desenvolvimento de uma nova fórmula de casca cerâmica para ser aplicada nas práticas de fundição por cera perdida no Laboratório de Fundição. Essa técnica utiliza um modelo de cera que é recoberto por várias camadas refratárias (de composições diversas) até formar o *investment*. Depois, mediante aquecimento no forno, a cera escorre pela base do molde. O molde oco é calcinado, pré-aquecido e preenchido com metal líquido. Depois de frio, ele é quebrado para a obtenção da peça. O laboratório já experimentou vários materiais ao longo do tempo e todos eles eram suficientes para a realização de uma prática que proporcionasse uma visão geral do processo aos alunos. Objetivando a utilização de um método mais similar ao industrial e a fabricação de peças com melhor qualidade, realizou-se o presente estudo utilizando um novo material (argila refratária) e testando várias combinações dele com os materiais que eram utilizados anteriormente. A qualidade das peças produzidas foi avaliada para saber se os objetivos iniciais haviam sido atingidos.

Palavras-chave: Fundição. *Investment*. Argila refratária.

ABSTRACT

This work was carried out aiming at the development of a new ceramic shell formula to be applied in the foundry investment casting practices at the Foundry Laboratory. This technique uses a wax model that is covered by several layers refractory (of different compositions) until forming the mold. Then, upon heating in the oven, the wax drips down the base of the mold. The hollow mold is calcined, preheated and filled with liquid metal. After cold, it is broken to obtain the piece. The laboratory has experimented with various materials over time and all of them were sufficient to carry out a practice that would provide an overview of the process to students. Aiming to use a method more similar to the industrial one and the manufacture of parts with better quality, the present study was carried out using a new material (refractory clay) and testing various combinations of it with the materials that were previously used. The quality of the produced parts was evaluated to see if the initial objectives had been achieved.

Keywords: Foundry. Investment. Refractory clay.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 1 | – Etapas do processo de fundição de precisão | 18 |
| Figura 2 | – Principais defeitos de contração | 19 |
| Figura 3 | – Peça com falha de preenchimento | 20 |
| Figura 4 | – Peça com defeito de deslocamento do molde | 21 |
| Figura 5 | – Cavalo de xadrez em molde de silicone | 23 |
| Figura 6 | – Primeira camada da Mistura I um dia após aplicação | 24 |
| Figura 7 | – 2ª camada da Mistura I (a), 2ª camada de estuque (b) e casca trincada (c) | 25 |
| Figura 8 | – Estuque sobre 1ª (esquerda) e 2ª (direita) camada de concreto | 26 |
| Figura 9 | – Cascas cerâmicas a: 90°C (esquerda) e 130°C (direita) | 27 |
| Figura 10 | – Amostras cobertas com a 1ª camada da Mistura I | 29 |
| Figura 11 | – Trinca no <i>investment</i> composto pelas misturas I e II | 30 |
| Figura 12 | – <i>Investment</i> composto pelas três misturas | 30 |
| Figura 13 | – Estufa de secagem Quimis (esquerda) e forno mufla Sanchis CL (direita) | 31 |
| Figura 14 | – 2º camada da Mistura I: aplicada com pincel (esquerda) e aplicada por mergulho (direita) | 35 |
| Figura 15 | – Cavalo da quarta tentativa | 37 |
| Figura 16 | – Torre (esquerda) e Peão (direita) da quarta tentativa | 38 |
| Figura 17 | – Modelos em cera da torre (esquerda) e peão (direita) | 39 |
| Figura 18 | – Peão da quarta tentativa após etapas de acabamento | 40 |
| Figura 19 | – Peão com canal de vazamento (esquerda), peão sem canal de vazamento (centro) e torre com canal de vazamento (direita) | 41 |
| Figura 20 | – Modelo em cera (esquerda) e peça em alumínio (direita) do peão com canal de vazamento | 42 |
| Figura 21 | – Modelo em cera (esquerda) e peça em alumínio do peão sem canal de vazamento | 43 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Misturas utilizadas na confecção da casca cerâmica | 23 |
| Tabela 2 – Composição do cimento refratário na quarta tentativa | 29 |
| Tabela 3 – Temperaturas de calcinação dos moldes da quarta tentativa | 36 |

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> | 17 |
| 3.2 | Defeitos em fundidos | 18 |
| 4 | MATERIAIS E MÉTODOS | 22 |
| 4.1 | Materiais | 22 |
| 4.2 | Produção de modelos em cera | 22 |
| 4.3 | Composição da casca cerâmica | 23 |
| 4.4 | Construção da casca cerâmica | 24 |
| 4.4.1 | <i>Primeira tentativa</i> | 24 |
| 4.4.2 | <i>Segunda tentativa</i> | 25 |
| 4.4.3 | <i>Terceira tentativa</i> | 26 |
| 4.4.4 | <i>Quarta tentativa</i> | 28 |
| 4.4.4.1 | <i>Calcinação e vazamento do cavalo</i> | 32 |
| 4.4.4.2 | <i>Calcinação e vazamento da torre</i> | 32 |
| 4.4.4.3 | <i>Calcinação e vazamento do peão</i> | 32 |
| 4.5 | Produção de novas peças | 32 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 34 |
| 5.1 | Peças da quarta tentativa | 34 |
| 5.1.1 | <i>Cavalo</i> | 36 |
| 5.1.2 | <i>Torre e Peão</i> | 38 |
| 5.2 | Novas peças | 40 |
| 6 | CONCLUSÃO | 45 |
| | REFERÊNCIAS | 46 |

1 INTRODUÇÃO

Dentro do universo da metalurgia existem diferentes tipos de fundição sendo um deles conhecido como fundição por cera perdida. Esse processo tem como principal característica a capacidade de produzir, com bom acabamento, peças de complexidade considerável. No Laboratório de Fundição (LaF) da Universidade Federal do Ceará (UFC) esse é um dos principais métodos de fundição aplicados.

Na fundição de precisão, primeiramente é necessário confeccionar uma peça em cera idêntica a peça final que se deseja fabricar. Uma peça pronta, de qualquer material, é colocada dentro de um copo descartável e coberta com borracha de silicone. Após a secagem, a geometria da peça ficará marcada no polímero. Feito isso, basta preencher a cavidade formada com cera líquida para obter a peça que servirá de modelo para a peça final de metal. Na etapa descrita acima podem ser utilizados diferentes tipos de cera, no caso do LaF, normalmente se utiliza cera de parafina e cera de abelha, sendo a última mais recomendada.

O modelo obtido é banhado várias vezes por diferentes materiais refratários de modo a cobrir toda a sua superfície. As primeiras camadas visam copiar, da melhor maneira possível, a forma do modelo e as últimas têm como objetivo tornar essa casca cerâmica resistente as altas temperaturas as quais ela será submetida. Para a produção do molde refratário utilizam-se: argila refratária com 300 mesh, cimento à base alumina, arisco, silicato de sódio neutro e água. A aplicação de uma camada é feita logo que a anterior tenha secado adequadamente e após a secagem da última camada a peça é levada ao forno para fundir o modelo em cera. Posteriormente é necessário calcinar o molde e, finalmente, vaziar o metal líquido dentro da cavidade dentro de sua cavidade.

As etapas do processo podem ser consideradas simples e, se bem executadas, produzem peças com pequena quantidade de defeitos. Na maior parte das vezes a fundição por cera perdida é empregada no LaF durante as aulas práticas da disciplina de fundição com o intuito de contribuir com o aprendizado dos alunos tanto em relação ao processo com para o estudo dos defeitos aparentes.

O presente trabalho foi desenvolvido na tentativa de encontrar uma composição padrão para a casca cerâmica utilizando novos materiais que permitam a produção de peças com bom acabamento independentemente da sua geometria. Ao final, serão apresentadas peças prontas em metal e serão discutidas as vantagens e desvantagens da aplicação dos diversos materiais supracitados.

2 OBJETIVOS

Produzir e avaliar as características das peças produzidas por fundição de precisão, utilizando novos materiais e fórmulas de casca cerâmica a ser aplicado no Laboratório de Fundição da UFC, que gere peças com bom acabamento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Processos de fundição

A fundição é o processo no qual metais ou ligas são despejados no interior de um molde, normalmente por ação da gravidade, e solidificam assumindo a forma desse. Segundo Groover (2014), “o termo fundido é aplicado ao componente ou peça obtido por esse processo.”

A fundição é utilizada a milhares de anos e atualmente é uma das técnicas de fabricação mais empregadas na indústria. Através dela podem ser fabricados lingotes e peças das mais variadas formas, tamanhos e aplicações. Muitas vezes as peças produzidas por fundição dispensam a realização de etapas intermediárias, como laminação e forjamento. Essa característica é um dos grandes diferenciais da fundição frente a outros processos de fabricação e a torna, em vários casos, o método mais simples e barato de se produzir uma peça. No entanto, normalmente o fundido é submetido a alguma etapa de acabamento, como a usinagem. Nessa etapa podem ser feitas modificações expressivas na peça, como alterações na sua geometria e dimensão, ou ela pode ser realizada simplesmente para a remoção dos canais de vazamento e rebarbas (BEELY, 2001).

Além do que foi mencionado acima, segundo Klug (2019) a fundição possui algumas vantagens em relação aos outros métodos de fabricação. Dentre elas, destacam-se:

- Obtenção de peças complexas;
- Utilização de, praticamente, qualquer liga metálica;
- Reaproveitamento de alguns materiais empregados;
- Baixo custo;

Por ser muito antiga e eficiente, várias técnicas de fundição foram criadas e aperfeiçoadas ao longo do tempo. As principais são listadas abaixo:

- Areia verde;
- Poliestireno expandido
- *Die casting*
- Fundição de precisão ou *investment casting*

3.1.1 Fundição de precisão

Para Beeley (2001), fundição de precisão é o grupo de processos nos quais se utilizam lamas refratárias para confeccionar os moldes. Os materiais aplicados para produzir as lamas possuem granulometria fina, proporcionando aos moldes e conseqüentemente aos fundidos, uma superfície de textura lisa. Essa técnica oferece ainda alta precisão dimensional, flexibilidade de projeto e a utilização de, virtualmente, qualquer liga metálica.

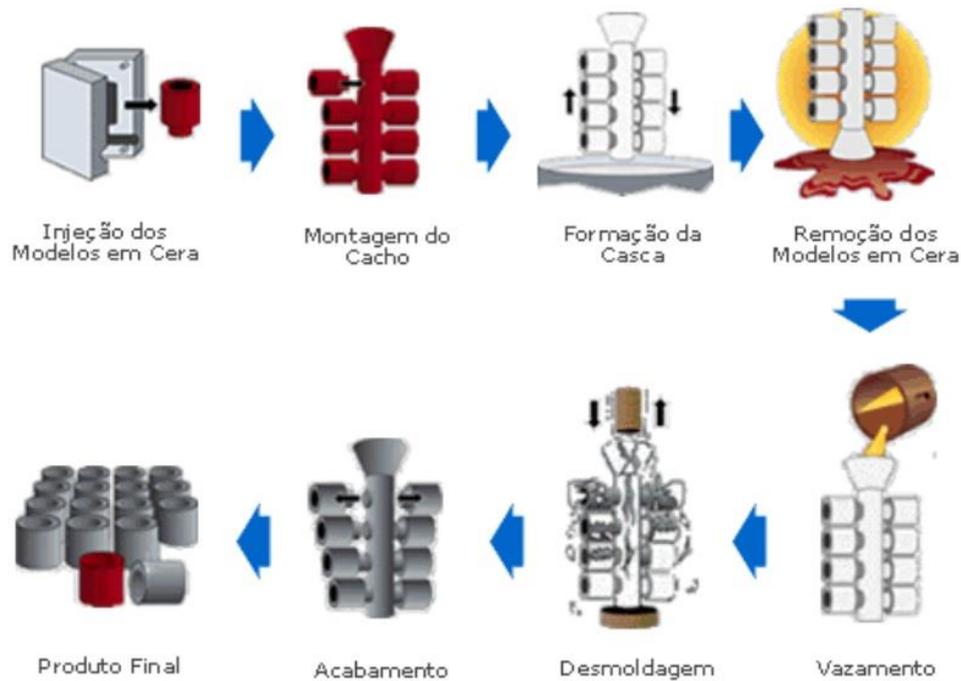
O processo em estudo é ainda conhecido como fundição por cera perdida, uma vez que o modelo utilizado é de cera e o mesmo se perde antes do vazamento do metal líquido no molde cerâmico. Assim, é necessário um modelo para cada peça que se deseja produzir. No caso de produção em larga escala, vários modelos são fixados em um canal (por onde será vazado o metal líquido) formando um cacho, chamado de árvore modelo ou árvore de fundição e toda a árvore é recoberta com as lamas refratárias. Na indústria, onde geralmente tem-se elevadas produções, a aplicação das camadas é feita através da imersão da árvore em tanques contendo a mistura refratária e são depositadas quantas camadas forem necessárias para que a casca se torne rígida.

Após a secagem de todas as camadas, o cacho é aquecido para derretimento e conseqüente retirada da cera, a qual pode ser reaproveitada para a fabricação de outros modelos. Dessa forma é obtida a casca cerâmica com a cavidade livre pronta para receber o metal. Essa casca recebe o nome de *investment*.

Segundo Peter Beeley, na indústria é utilizada uma mistura de ceras que combina propriedades mecânicas e precisão dimensional. Além disso, a temperatura de trabalho é muito importante devido ao coeficiente de expansão da cera.

A casca já pronta é submetida a uma temperatura elevada por certo período de tempo de modo a promover a remoção dos contaminantes presentes, além de prepará-la para o recebimento do metal líquido, ou seja, para reduzir o choque térmico decorrente do vazamento e permitir um melhor escoamento do metal dentro do molde. Após a solidificação do metal, a casca é quebrada para a retirada da peça pronta. A figura 1 mostra, esquematicamente, as etapas do processo:

Figura 1 – Etapas do processo de fundição de precisão



Fonte: Site RioInox. Seção de Microfusão.

3.2 Defeitos em fundidos

Toda peça fundida, bem como as obtidas por outros processos de fabricação, apresentam descontinuidades como vazios, porosidade e outras imperfeições. Fala-se em defeito quando essa descontinuidade é crítica para o funcionamento ou aparência do produto. Nesse caso deve ser analisada a possibilidade de redução desses defeitos para um nível aceitável ou, em casos mais graves, a rejeição da peça.

De acordo com Beeley (2001) os defeitos possuem comumente três origens:

- i. O projeto do fundido;
- ii. O processo de fabricação empregado;
- iii. A experiência do operador.

Esses três pontos podem gerar defeitos de maneira exclusiva ou combinada. Descobrir a origem do defeito no segundo caso se torna uma tarefa bem mais complexa que no primeiro até mesmo para profissionais experientes.

Os requisitos de qualidade são especificados em normas nacionais e internacionais e todas as empresas se esforçam para atendê-los aplicando programas de qualidade como *Seis Sigma* e as ISO 9000 e 14000, de modo a atingir a marca de zero defeitos. No entanto, devido

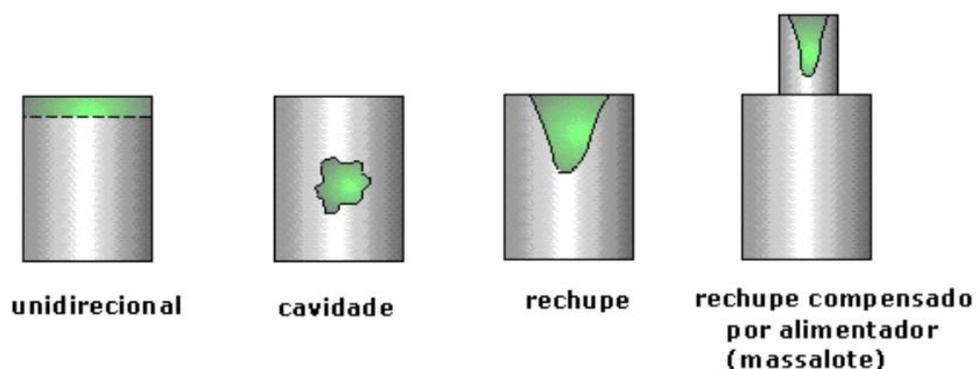
a grande quantidade de variáveis envolvidas, as possibilidades de defeitos também são altas e eles sempre ocorrem. Apesar disso, agrupando-se os defeitos de maneira aproximada de acordo com as suas origens fundamentais, é possível compreendê-las e assim obter uma redução considerável de sua ocorrência (BEELEY, 2001).

A seguir serão abordados, de maneira superficial, alguns dos defeitos mais presentes em peças fundidas.

Defeitos de contração são bastante comuns em fundidos e, como o próprio nome sugere, eles ocorrem devido a contração do metal dentro do molde, ou seja, a contração durante o resfriamento ainda no estado líquido somado a contração de solidificação. A cavidade de contração pode ser interna ou superficial. Nas peças que sofrem solidificação unidirecional, teremos, na verdade, a formação de um rebaixo e não de uma cavidade. Já quando a perda de calor ocorre uniformemente nas três direções, teremos a formação de uma cavidade no centro da peça. Também pode acontecer de uma superfície da peça resfriar mais lentamente que as outras, nessa situação, teremos a formação do rechupe.

Essa categoria de defeitos pode ser evitada através da utilização de massalotes. Com ele, à medida que a contração acontece, mais metal vai sendo escoado para o interior do molde sem a necessidade de interferência do operador. As dimensões e a posição do massalote devem ser determinadas ainda na fase de projeto. A Figura 2 mostra os principais exemplos de defeitos de contração.

Figura 2 – Principais defeitos de contração.



Fonte: Site da CIMM (Centro de Informação Metal Mecânica) - Seção de macroporosidade.

Outra falha recorrente na fundição é a de preenchimento. Ao verter o metal líquido no interior do molde, o mínimo esperado é que esse preencha completamente a cavidade existente, fluindo suavemente através de sua superfície. Quando isso não acontece, devido a solidificação prematura do metal, uma seção da peça acaba sendo omitida, ou seja,

temos a presença de um vazio na peça. Esse defeito é considerado grave, uma vez que não pode ser resolvido através do retrabalho da peça.

Por outro lado, na maioria dos casos sua prevenção pode ser simples, bastando aumentar o superaquecimento do metal, isto é, sua temperatura de vazamento. Também é importante que o vazamento não seja interrompido até se ter a certeza de que o molde foi completamente preenchido. Uma peça com falha no preenchimento pode ser vista na figura 3, a seguir:

Figura 3 – Peça com falha de preenchimento.



Fonte: Site slideplayer. Slides sobre tixofundição.

As rebarbas são partes extras presentes na peça final, que se formam quando o metal líquido penetra nas linhas de divisão dos moldes ou entre o molde e o macho. Para evita-las deve-se controlar bem as dimensões dos moldes e machos, além de executar bem o fechamento dos moldes.

Na fundição, pode ocorrer ainda o defeito de deslocamento do molde. Acontece quando uma das metades de um molde bi partido desliza sobre a outra. Se trata de um problema grave e o resultado é a formação de um degrau na peça. Um exemplo é mostrado na Figura 4 abaixo.

Figura 4 – Peça com defeito de deslocamento do molde.



Fonte: Site slideplayer. Slides sobre tixofundição (adaptada).

Porosidades também podem surgir nos fundidos, principalmente devido aos gases existentes no metal de vazamento. Os gases também podem ser produzidos a partir da água ou de algum composto orgânico presente na matriz. Uma das formas de evitar esse defeito é através do aumento da permeabilidade dos componentes do molde ou de uma melhor secagem dos mesmos. No caso da fundição de precisão, uma calcinação adequada é fundamental.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Buscando a fabricação de peças com maior qualidade, desde sua criação o LaF explora novas técnicas de fundição. Assim, o conhecimento adquirido pode ser repassado aos próximos alunos que tiverem contato com o laboratório, seja por meio da disciplina ou através de iniciativa própria. Durante a elaboração do presente estudo, também está em sendo criado o PARTEC, possibilitando assim que as técnicas desenvolvidas sejam aplicadas na prestação de serviços à comunidade.

4.1 Materiais

Para construir o molde refratário foram utilizados os seguintes materiais: argila refratária, silicato de sódio neutro, cimento a base de alumina, arisco (areia comum de construção civil), duas peneiras com granulometrias distintas e água.

O silicato de sódio é aplicado para promover a ligação entre os componentes e, na mistura em que ele não está presente, essa função é exercida pelo cimento. A argila refratária, devido a sua baixa granulometria quando comparada aos demais componentes, foi utilizada para a confecção das primeiras camadas do molde refratário, que são as responsáveis por copiar os detalhes da peça.

O cimento é composto por Óxido de Cálcio (CaO) e Óxido de Alumínio (Al_2O_3), com isso ele é capaz de suportar altas temperaturas e foi utilizado, após peneirado, nas camadas intermediárias. O arisco, também após peneiração, foi empregado nas camadas finais.

Alguns dos modelos utilizados eram feitos em cera de parafina e outros em cera de abelha. O alumínio foi usado como metal de vazamento em todas as amostras.

4.2 Produção dos modelos em cera

Primeiramente, foi preciso criar as peças que serviriam de modelo. Como o laboratório já possuía moldes de silicone para três peças de xadrez (peão, cavalo e torre), não foi necessária a produção dos moldes. Com isso, a fabricação dos modelos (de aproximadamente 10 cm) foi bastante simples, bastando apenas preencher os referidos moldes com cera líquida. Os moldes são bi partidos e sua união é realizada com o auxílio de duas

ligas. Foram utilizadas tanto a cera de parafina como a cera de abelha para produzir os modelos. A Figura 5 mostra uma peça pronta no interior do molde de silicone.

Figura 5 – Cavalo de xadrez em molde de silicone.



Fonte: Próprio autor.

4.3 Composição da casca cerâmica

Anteriormente, a casca cerâmica produzida no LaF era constituída de gesso, areia e água. Depois, o gesso foi substituído pelo cimento. No presente trabalho essa substituição foi mantida e além disso houve a adição de um novo material, a argila refratária. A utilização desse novo componente objetiva transmitir fielmente os detalhes da peça para a casca.

Para melhor compreensão do processo, as misturas foram separadas de acordo com seus respectivos componentes em três tipos. Essa classificação é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação das misturas utilizadas na confecção da casca cerâmica.

| Misturas | Componente 1 | Componente 2 | Componente 3 |
|----------|--------------------|-------------------|--------------|
| I | Argila refratária | Silicato de Sódio | Água |
| II | Cimento refratário | Arisco | Água |
| III | Arisco | Silicato de Sódio | Água |

Fonte: Elaborada pelo autor.

A determinação de quais componentes utilizar e suas respectivas proporções, sobretudo na Mistura I, foi o maior desafio do trabalho, uma vez que nenhum outro aluno do LaF havia realizado testes com a argila.

4.4 Construção da casca cerâmica

4.4.1 Primeira tentativa

Seguindo a recomendação do Professor Jefferson Klug (orientador), o teste inicial da produção da Mistura I foi realizado apenas com os três componentes presentes na tabela acima. Analisando a técnica da Araujo (2019) percebemos que a quantidade de silicato é quem determinava quanta água seria empregada (o triplo de silicato, especificamente) e a água não participava da proporção para efeito de cálculos da massa total da mistura. Assim, a proporção utilizada foi: 95%p de argila, 5%p de silicato. Dessa forma, para 100g de mistura (valor que estimou-se ser suficiente para aplicar duas camadas em uma peça), utilizamos 5g de silicato e 15g de água. No entanto, a mistura não se mostrou fluida o suficiente para a aplicação com pincel e então mais água foi adicionada até o valor de 47,5g. O valor final foi bem alto por se tratar do teste inicial e a adição ter sido realizada grosseiramente.

Durante a aplicação, a lama escorria continuamente pela peça, tornando inviável seu recobrimento. Então, espalhou-se um pouco de detergente no modelo antes da Mistura I. Fazendo isso, a primeira camada aderiu facilmente à superfície, assim, o detergente foi utilizado em todos os procedimentos posteriores.

Embora com boa aderência, no dia seguinte (quando se teve novamente contato com a amostra) ela apresentava trincas por toda a sua extensão, conforme Figura 6.

Figura 6 – Primeira camada da Mistura I um dia após a aplicação.



Fonte: Próprio autor.

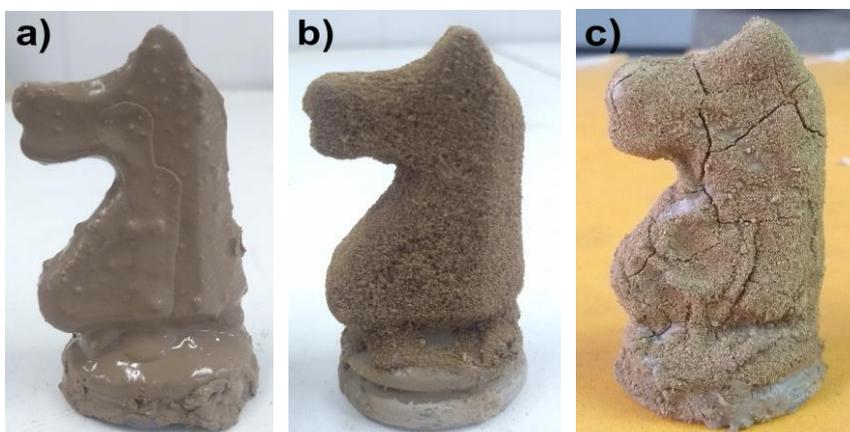
4.4.2 Segunda tentativa

Na segunda tentativa foram utilizados dois grupos de duas peças cada. Destaca-se que todas as peças possuem aproximadamente 10cm de altura.

O grupo “A” era composto de um cavalo (1) e um peão e o grupo “B” de outro cavalo (2) e um bispo. As proporções em peso de argila e silicato foram mantidas e foram utilizadas 40g de água para cada 100g de mistura.

Com o auxílio de um pincel, aplicou-se a 1ª camada da Mistura I sobre as peças do Grupo “A” e depois de apenas 2 horas observou-se trincas. As peças foram descartadas do teste, pois a camada inicial era arrancada ao se tentar aplicar a segunda. Para tentar solucionar o problema, imediatamente após a aplicação da camada inicial, o Cavalo 2 recebeu um estuque de arisco peneirado por uma peneira de cozinha comum. Depois de 2 horas a casca estava seca, então as etapas foram repetidas. Passadas mais 2h, trincas já haviam se formado e propagado pela superfície. A Figura 7 mostra as etapas descritas.

Figura 7 - 2ª camada da Mistura I (a), 2ª camada de estuque (b) e casca trincada (c).



Fonte: Próprio autor.

Percebendo que o tempo prolongado de secagem era prejudicial à casca, efetuou-se alteração unicamente nesse parâmetro para o teste com o bispo. Sobre ele foram aplicadas 2 camadas da Mistura I seguidas de estuque de arisco peneirado, mas o tempo de secagem entre as duas camadas foi de 1,5 hora e o tempo após a segunda camada de apenas 0,5 hora. Com isso, avançamos para a Mistura II.

Para a preparação da Mistura II foram utilizadas 30g de cimento e 70g de arisco e então foi adicionado água até obter a fluidez desejada, atingindo-se o valor de 30g. A camada

de concreto foi sobreposta à segunda camada da Mistura I após 30 minutos da execução dessa. Seguido a isso, foi aposta uma película de areia mais grosseira para fazer o papel de estuque. Essa ação ocorreu três vezes com intervalo de tempo igual a 30 minutos para cada camada, pois o concreto secava rapidamente. Na Figura 8 podemos ver a mostra no decorrer do procedimento.

Figura 8 – Estuque sobre 1ª (esquerda) e 2ª (direita) camada de concreto.



Fonte: Próprio autor.

Depois de mais 45 minutos, a peça devidamente recoberta foi levada ao forno para o derretimento de cera. Vale destacar que, apesar de constarem 3 misturas na Tabela 1, no momento desta tentativa ainda não era sabido a real necessidade da aplicação de todas as misturas, nem tão pouco quantas camadas de cada. Com base nisso, seguiu-se o passo a passo da fundição em cera perdida, qual seja, o vazamento da cera logo após a finalização da casca cerâmica.

Embora o ponto de fusão da cera seja de aproximadamente 90°C, essa temperatura não é suficiente para fundi-la quando protegida pelo molde cerâmico. Dessa forma, visando garantir que toda a cera fosse capaz de escoar pela cavidade do molde, a etapa de vazamento foi realizada no forno mufla do LaF a uma temperatura de 130°C por meia hora. Ao abrir o forno para retirada das bacias responsáveis por coletar a cera líquida, constatou-se que a casca havia trincado, permitindo que a cera escorresse pelas brechas e não apenas pela cavidade da base. Então o molde foi descartado, reaproveitando-se a cera.

4.4.3 Terceira tentativa

Para esse ensaio foram feitas mudanças sutis nas composições das Misturas I e II e aumentou-se a quantidade de camadas empregadas. Na primeira, os percentuais em peso de argila e silicato adotados foram 87 e 13, respectivamente. Novamente, foram utilizados 40g de água para 100g de mistura. Aplicou-se 3 camadas, sendo as duas primeiras seguidas de estuque de arisco peneirado e os tempos de secagem adotados são idênticos ao do teste anterior.

Na segunda mistura, por sua vez, empregou-se 35g de cimento, 65g de arisco e 30g de água. Ela recobriu o modelo duas vezes e, depois da primeira vez, houve adição da areia mais grossa como estuque. O tempo de secagem empregado foi idêntico ao do teste anterior.

Nessa etapa do estudo fez-se uso de 4 modelos, onde dois eram de cera de abelha e os outros dois de cera de parafina. Esse padrão foi adotado a fim de mostrar, na prática, que existe diferença entre os coeficientes de expansão (e conseqüente tensão aplicada sobre a casca) das duas ceras.

As amostras foram levadas ao forno para vazamento da cera depois de 45 minutos da aplicação da última camada de concreto. Desta vez, o aquecimento foi realizado de maneira gradativa e observou-se que as cascas racharam depois de expostas à temperatura de 90°C (Figura 8 - esquerda). Contudo, a temperatura foi elevada até 130°C para o reaproveitamento da cera e, como na tentativa anterior, a cera escorreu pelas rachaduras formadas (Figura 9 - direita).

Figura 9 – Cascas cerâmicas a: 90°C (esquerda) e 130°C (direita).



Fonte: Próprio autor.

4.4.4 Quarta tentativa

Neste experimento foram empregados três modelos, sendo dois em cera de abelha (torre e cavalo) e um de cera de parafina (peão). Sabendo que a cera de parafina tem maior coeficiente de expansão do que a cera de abelha, se a casca suportasse as tensões aplicadas por aquela durante o vazamento, então, certamente, suportaria as tensões aplicadas por essa.

Ser capaz de produzir uma peça era imprescindível para o sucesso do presente estudo, pois somente com a peça pronta poderíamos saber o quão eficiente era a Mistura I em reproduzir os detalhes do modelo de cera.

Utilizando a metodologia do processo industrial como referência, decidiu-se fazer a aplicação da Mistura I através do mergulho das peças em um recipiente contendo o referido composto para a obtenção de camadas mais uniformes. Além disso, acreditava-se que a grande quantidade de água era a maior responsável pela fragilidade do estrato. Sendo que tais quantidades eram empregadas para permitir uma fácil aplicação com o pincel. Logo, ao utilizar a técnica do mergulhamento, seria possível uma redução significativa na massa de água. Ademais, objetivando reduzir ainda mais a fragilidade do composto, optou-se por dobrar a participação do ligante.

Dessa maneira, a Mistura I foi preparada com as proporções de 90%p de argila e 10%p de silicato de sódio neutro. Todas as amostras foram banhadas nesse composto três vezes e o tempo de cura entre os banhos foi de 30 minutos.

O recipiente utilizado para conter o estrato foi um copo de plástico com altura e diâmetro suficientes para inserir um modelo por vez. De forma a facilitar o manuseio das amostras, principalmente durante a imersão, foram inseridos parafusos ou similares na base das peças. Na Figura 10 podemos ver todas elas após o primeiro banho na lama cerâmica. Duas folhas de isopor foram usadas para apoiar as peças durante a secagem.

Figura 10 – Amostras cobertas com a 1ª camada da Mistura I.



Fonte: Próprio autor.

Sobre as amostras secas foram pinceladas três camadas de concreto refratário, cujo tempo de cura foi de 45 minutos. A composição do concreto adotada para cada modelo é mostrada na Tabela 2. Destaca-se que as massas de água empregadas não foram predefinidas, sendo adicionado esse componente até a obtenção da fluidez ideal para pincelar.

Tabela 2 – Composição do concreto refratário da quarta tentativa.

| Amostra | Massa de cimento (g) / %p na mistura | Massa de areia (g) / %p na mistura | Massa de água (g) |
|---------|---|---------------------------------------|-------------------|
| Torre | 25 / 50% | 25 / 50% | 20 |
| Cavalo | 30 / 60% | 20 / 40% | 13,5 |
| Peão | 35 / 70% | 15 / 30% | 12 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

As três amostras foram levadas ao forno para a remoção da cera. Todas as cascas apresentaram rachaduras superficiais, no entanto, ainda aparentavam ter boa resistência. Logo, foi dado continuidade ao experimento. A Figura 11 mostra uma das cascas com uma trinca superficial.

Figura 11 – Trinca no *investment* composto pelas Misturas I e II.



Fonte: Próprio autor.

Devido ao surgimento das trincas, decidiu-se adicionar mais uma mistura para aumento de resistência da casca cerâmica. A Mistura III (vide Tabela 1), foi baseada em dos estratos utilizados pela Araújo (2019) para o aumento de resistência da casca às altas temperaturas. Assim, foram utilizados 90%p de arisco peneirado, 10%p de silicato de sódio neutro e massa de água igual ao dobro da massa total de silicato. Essa mistura recobriu as amostras por três vezes, com tempo de cura de 30 minutos entre as aplicações. O molde do cavalo recoberto com a Mistura III é mostrado abaixo (Figura 12).

Figura 12 - *Investment* composto pelas três misturas.



Fonte: Próprio autor.

Feito isso, as peças seguiram para a etapa de calcinação. Esse processo objetiva a remoção dos voláteis presentes no molde cerâmico, entre os quais os principais são: CO₂, H₂O

e resquícios de cera que ainda restam após o derretimento desta. Sabendo que é necessário permitir a fuga dos gases gerados no interior do forno, essa etapa foi dividida em duas partes principais, pois o forno originalmente utilizado (que possibilitava a saída dos gases de maneira contínua) parou de funcionar e o outro não permite a referida fuga.

A primeira, foi realizada na estufa de secagem (Figura 13 - esquerda). Ela permite a fuga contínua dos vapores, no entanto, sua temperatura máxima de trabalho é 200°C. Assim, todas peças foram, simultaneamente, levadas a estufa e submetidas a temperatura máxima por duas horas. Já a segunda parte, foi realizada com uma amostra por vez, de modo a reduzir o volume de gás no interior do forno (Figura 13 – direita). A etapa de calcinação de cada uma das amostras é detalhada mais adiante, ainda no presente capítulo.

Figura 13 – Estufa de secagem Quimis (esquerda) e forno mufla Sanchis CL (direita).



Fonte: Próprio autor.

Concluída a calcinação, é chegada a hora do vazamento do metal. O alumínio foi escolhido para ser utilizado nesse trabalho, pois seu ponto de fusão não é tão elevado e ele confere uma boa aparência as peças produzidas. Antes do vazamento, todos os moldes foram pré-aquecidos a 200°C. Essa ação confere maior fluidez ao metal no interior do molde e reduz o choque térmico decorrente da elevada temperatura do metal fundido. Após o vazamento e resfriamento do molde, a casca é quebrada para se obter a peça pronta. As três peças produzidas nessa parte do trabalho serão mostradas no capítulo seguinte.

Alumínio líquido é obtido a partir da fusão de sucata no forno de indução do laboratório. A fusão (aproximadamente 660°C) e o vazamento (aproximadamente 750°C) do

metal no interior das cascas foram realizados pelo orientador desse trabalho. O forno é da marca SERVIFOR Ltda e é capaz de operar a uma potência máxima de 50 KW.

4.4.4.1 Calcinação e vazamento do cavalo

O primeiro molde calcinado foi o do cavalo. As temperaturas adotadas, em graus Celsius, foram: 200, 300 e 450. O forno foi mantido nas referidas temperaturas por 20 minutos antes de ser parcialmente aberto. Destaca-se que, após atingido o último patamar térmico, o forno foi desligado para resfriamento, sendo aberto somente quando abaixo de 100°C de modo a evitar choque térmico na casca. Conferida a integridade do molde, o mesmo foi pré-aquecido e então realizou-se o vazamento.

4.4.4.2 Calcinação e vazamento da torre

As temperaturas de calcinação adotadas para essa amostra, em graus Celsius, foram: 200, 300, 400 e 600°C. A temperatura foi mantida constante durante 20 minutos nos três primeiros patamares térmicos, sendo realizada a abertura ao final de cada intervalo. O último patamar foi mantido por 1 hora e então o forno foi desligado. Ao se atingir a temperatura de pré-aquecimento, o molde foi retirado do forno e preenchido com o metal.

4.4.4.3 Calcinação e vazamento do peão

Saindo da estufa de secagem a 200°C, essa amostra foi aquecida diretamente até 600°C, sendo mantida nessa temperatura por 1 hora. Transcorridos os 60 minutos, o forno foi desligado para resfriar até a temperatura de pré-aquecimento e então foi realizado o vazamento.

4.5 Produção de novas peças

Buscando a redução de custos da construção do *investment*, uma nova composição para a Mistura I foi tentada. Reduziu-se a quantidade de silicato e, como alternativa para o aumento da resistência, foi adicionada uma pequena quantidade de areia peneirada. Assim, a argila passou a representar 88%p, já o silicato e areia participaram com 6%p cada. A massa de

água necessária para conferir boa fluidez a 100g de estrato foi 43g. O tempo de cura entre cada uma das 3 camadas iniciais foi de 30 minutos.

Efetuuou-se também a aplicação de duas camadas de concreto refratário idênticas ao do peão do experimento anterior. Ou seja, 70%p de cimento e 12g de água para 50g de concreto. Após a aplicação de cada camada a casca foi exposta ao sol por 40 minutos. Por último, foram adicionadas quatro camadas da Mistura III, com composição e tempo de cura idênticos ao do ensaio anterior.

A temperatura necessária para realizar o vazamento da cera foi 1500°C. As temperaturas empregadas para calcinar foram: 200, 300 e 600°C.

Nessa parte do trabalho foram utilizados dois peões (um com canal de vazamento e outro sem) e uma torre com canal de vazamento. Os resultados dessa parte do trabalho, bem como as peças obtidas, são mostrados no capítulo seguinte.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na primeira tentativa, ao perceber que a Mistura I não aderiu de maneira satisfatória a peça, o detergente foi utilizado para proporcionar a adesão necessária. A ideia, que surgiu da possibilidade da polaridade da cera e do estrato serem opostas, funcionou perfeitamente.

Em relação as trincas que surgiram, acreditava-se que o único fator relevante era a quantidade de água utilizada, porém, com as tentativas subsequentes, percebeu-se que o tempo de secagem também era fundamental. Como prova disso, no cavalo da segunda tentativa, que empregou 19% (7,5g) menos água e tempo de secagem de duas horas para as duas camadas, a casca também trincou. Já no bispo, onde foi mantida a quantidade de água do cavalo, o tempo de secagem foi reduzido para 1,5 e 0,5 hora e com isso foi possível a aplicação da Mistura II.

As duas amostras da segunda tentativa receberam estuque, no entanto, os tempos de cura foram diferentes, logo, não é possível inferir se sua aplicação tem ou não influência no aumento da resistência das películas iniciais.

O bispo citado acima (tentativa dois) e as quatro amostras da tentativa três, trincaram no forno durante o vazamento da cera. Certamente isso ocorreu devido a proporção de cimento e areia utilizados para a preparação do concreto, como será discutido mais adiante. No primeiro caso, empregou-se 30% de cimento e no segundo, 35%.

O aumento do número de camadas de concreto com a proporção acima talvez fosse suficiente para solucionar o problema, porém, não seria uma solução eficiente, dado o tempo gasto para aplicação de todas as camadas necessárias, além do aumento no consumo dos materiais e da dificuldade de quebrar o investimento.

5.1 Peças da quarta tentativa

Nesta parte do experimento, testou-se o método do mergulho para o recobrimento dos modelos com a camada inicial, visando os objetivos citados no capítulo anterior, quais sejam: obtenção de camadas mais uniformes e redução na quantidade de água utilizada. Na preparação de 100g do composto foram necessárias apenas 16g de água. Esse valor representa uma redução de mais de 50% se comparado com o necessário para pincelar (40g). Vale lembrar que, nesse caso, foi utilizado 10%p de silicato de sódio neutro, ao invés de 5%p, como nos experimentos anteriores.

A técnica de imersão mostrou ótimo resultado, como era esperado, visto que é amplamente utilizado na indústria. A camada se apresentou bem mais uniforme e consistente. A comparação da 2ª camada da Mistura I aplicada pelas diferentes técnicas é mostrada na Figura 14.

Figura 14 - 2ª camada da Mistura I: aplicada com pincel (esquerda) e aplicada por mergulho (direita).



Fonte: Próprio autor.

Analisando a figura podemos notar que um dos motivos pelo qual o recobrimento mostrado na imagem da direita tem melhor aparência que o da esquerda, é a ausência de estuque após a primeira camada. Porém, também podemos observar uma diferença na espessura das camadas. Por ter menos água em sua composição, a mistura aplicada por mergulho é mais espessa e menos fluída. Por conseguinte, na primeira imagem, a seta aponta para a zona por onde a lama escorreu. Isso também aconteceu com outras amostras que foram preparadas com pincel.

O propósito inicial de se utilizar um parafuso na base da peça era apenas permitir a sua imersão completa. Com isso, no entanto, foi possível também obter um recobrimento perfeito na região inferior da amostra. Na figura 14 (esquerda), é notável a presença de falhas na aplicação do revestimento na referida área. Assim, apoios foram empregados em algumas amostras, ainda que elas não fossem ser submetidas à imersão.

Avançando para a análise da Mistura II, verificamos que o cimento passou a ser o componente majoritário (vide Tabela 2). Ao fazer isso, as cascas suportaram melhor as tensões aplicadas pela cera durante o aquecimento. As rachaduras que surgiram foram apenas superficiais, de modo que a cera escoou apenas pela base da peça. O resultado faz sentido, uma vez que o cimento é quem promove a união entre os componentes do estrato e com isso aumenta-se a resistência.

A Mistura III, que foi utilizada para reforçar o *investment*, cumpriu plenamente seu objetivo, qual seja, tornar a casca rígida o suficiente para suportar as etapas de calcinação e vazamento. Tal fato era esperado, uma vez que uma fórmula bastante similar havia sido usada em outro trabalho.

Neste ponto, vale relembrar a curva de aquecimento ao qual foi submetido cada um dos moldes durante a calcinação. Essa informação pode ser vista na Tabela 3, abaixo. Lembra-se, também, que o forno foi mantido por 20 minutos nas temperaturas T1 a T3 e por 60 minutos em T4.

Tabela 3 – Temperaturas de calcinação dos moldes da quarta tentativa.

| Amostras | T1 | T2 | T3 | T4 |
|----------|-----|-----|-----|-----|
| Cavalo | 200 | 300 | 450 | - |
| Torre | 200 | 300 | 400 | 600 |
| Peão | 200 | 600 | - | - |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Considerando o valor utilizado em outros trabalhos e os materiais empregados na construção do molde, acreditava-se que seria necessária uma temperatura de, pelo menos, 600°C para uma calcinação eficiente. Todavia, como tentativa de reduzir o tempo e a energia consumida, a temperatura máxima adotada para a amostra do cavalo foi menor.

5.1.1 Cavalo

Durante o preenchimento com o metal líquido, a casca entrou em combustão por um pequeno instante, deixando claro que a calcinação realizada não foi suficiente para a retirada de todos os voláteis. Após o resfriamento, a casca foi quebrada com o auxílio de um martelo picareta. É importante que a casca cerâmica seja facilmente removível ao final do processo, pois somente assim a peça metálica pode ser obtida. A casca produzida nesse

trabalho, apesar de composta por várias camadas e da busca contínua pelo aumento de resistência, foi quebrada sem grande esforço. Sendo esse mais um resultado positivo. A peça produzida nesse ensaio é exibida na Figura 15.

Figura 15 – Cavalo da quarta tentativa.



Fonte: Próprio autor.

Nas imagens é possível identificar a presença de vários defeitos, que em sua maioria, sem dúvidas, ocorreram graças a má execução da calcinação. A chama formada durante o vazamento pode ter fragilizado a casca cerâmica, sobretudo as camadas mais internas, que acabaram tendo pedaços arrancados. Com isso, alguns detalhes da peça foram omitidos. Para o verter o metal dentro do molde, este último é colocado numa caixa de areia de cabeça para baixo. Logo, a região que sofre maior impacto e, conseqüentemente tem maior chance de ser desgastada, é a superior. Tal fato explica porque temos uma grande incidência de vazios na cabeça do cavalo. Além dos vazios, comparando com os modelos em cera (ver figuras anteriores), percebe-se que as orelhas nem chegaram a se formar.

Nas laterais da peça, por sua vez, temos excesso de material. Partículas metálicas que não deveriam estar presentes. Provavelmente, esses são exatamente os pedaços arrancados da casca cerâmica, que foram empurrados para cima pelo metal líquido durante o preenchimento e se fixaram na superfície da peça devido a solidificação do alumínio.

Apesar desses indesejáveis acontecimentos, a peça possui superfície lisa, indicando o potencial da fórmula desenvolvida até aqui.

5.1.2 Torre e Peão

Com o resultado da amostra anterior, as temperaturas máximas de calcinação das outras duas foram elevadas. O valor adotado foi o mesmo para as duas, alterando-se apenas a curva de aquecimento. Durante o vazamento não foram observados fenômenos estranhos, como formação de chama ou de bolhas, evidenciando que, desta vez, a calcinação foi realizada adequadamente. A Figura 16 mostra as peças obtidas nessa etapa.

Figura 16 – Torre (esquerda) e Peão (direita) da quarta tentativa.



Fonte: Próprio autor.

Comparando as duas peças, surpreendentemente, nota-se que o peão possui acabamento bem superior ao da torre. Esta última possui várias irregularidades ao longo da superfície, como se metal líquido tivesse escorrido e solidificado sobre a peça pronta. Já o peão exibe superfície lisa, quase isenta de defeitos. O resultado surpreende, pois o modelo utilizado para a confecção do peão era de cera de parafina, que possui propriedades inferiores em relação a cera de abelha.

Considerando que a única diferença na confecção dos dois moldes foi a curva de aquecimento, temos que os possíveis fatores determinantes para a diferença de qualidade das peças foram: a qualidade inicial do modelo de cera utilizado e a habilidade do operador. Como falado na seção de defeitos em fundidos (item 3.2 deste estudo), a experiência do operador é uma das principais origens dos defeitos em fundição. Embora os dois moldes tenham sido preparados pela mesma pessoa (autor deste trabalho), a falta de experiência faz com que haja diferença na execução das etapas de amostras diferentes.

Olhando atentamente para a Figura 9 (página 28), fica evidente a diferença entre as duas peças em análise. A primeira camada aplicada sobre a torre apresenta imperfeições que não estão presentes no peão. Isso pode ter ocorrido devido a diferença na quantidade de detergente utilizado e/ou no tempo de imersão na mistura I. Esses dois fatores dependem diretamente do operador. Como já foi explicado, as primeiras camadas são as responsáveis por conferir uma reprodução fiel do modelo, ou seja, ela é quem terá maior participação na aparência final da peça. Uma má aplicação da primeira camada, como no caso da torre, comprometeu o produto final.

Olhando, por sua vez, para os modelos utilizados (Figura 17), não notamos nenhuma discrepância que justifique tamanha disparidade na qualidade das peças em metal.

Figura 17 – Modelos em cera da torre (esquerda) e peão (direita).



Fonte: Próprio autor.

No topo da torre de cera temos um ressalto que não está presente na peça pronta. Esse defeito do modelo foi removido da peça com o auxílio de um moto esmeril de bancada. Na próxima seção, será mostrada uma torre antes de ser submetida a esse procedimento.

Assim como a torre, o peão produzido nessa etapa também foi submetido a operações de acabamento. A Figura 18, a seguir, mostra essa peça após a remoção das rebarbas e de ser submetida a escova rotativa de aço. As referidas manipulações foram realizadas no LaF pelo próprio autor.

Figura 18 – Peão da quarta tentativa após etapas de acabamento.



Fonte: Próprio autor.

5.2 Novas peças

Temos que a redução de silicato e adição de areia gerou um aumento na quantidade de água utilizada na Mistura I. Na aplicação com pincel, eram adicionadas 40g a referida mistura (sem areia) para obter fluidez ideal. Com o incremento do arisco, essa massa passou a ser de 43g, que representa aumento de quase 10%.

Aprendemos com a Mistura III que a quantidade de água tem relação direta com a quantidade de silicato. Como, nesse caso, temos uma redução de silicato, esperava-se uma redução na água. No entanto, a massa de areia aumentou, o que prejudica bastante a fluidez do estrato e por isso a massa final de água sofreu um aumento ao invés de uma redução.

A curva de aquecimento escolhida para a calcinação destas amostras é diferente das anteriores para aumentar as possibilidades testadas. Contudo, esse processo foi idêntico para as três amostras, pois busca-se provar que essa técnica é capaz de produzir peças diferentes com qualidade semelhante.

Pela primeira vez nesse trabalho os moldes não sofreram nenhuma avaria durante a etapa de remoção da cera, mesmo sem a utilização de autoclave. Isso prova que, para a realização da deceragem por esse método, é imprescindível a adição de várias camadas de reforço para a casca cerâmica.

Além disso, as cascas se mantiveram íntegras durante a calcinação e vazamento, tendo o último ocorrido da maneira ideal. Com esse ensaio, foram testadas três curvas de aquecimento cuja temperatura máxima é 600°C e todas elas apresentaram desempenho

satisfatório. Assim, fica claro que essa temperatura, além de suficiente para o caso de amostras pequenas, é o fator determinante para uma calcinação bem sucedida, não sendo de grande relevância os patamares térmicos intermediários. Resultado natural, visto que em trabalhos anteriores realizados no LaF, o aquecimento era feito diretamente até a temperatura máxima e apresentava ótimos resultados.

A quebra do *investment* nesse experimento foi ainda mais fácil que no anterior, provavelmente porque nele foram utilizadas apenas duas camadas de concreto, contra três do outro. As peças obtidas nesse ensaio, antes de serem submetidas a operações de acabamento, são mostradas na Figura 19. O peão mostrado ao centro foi usinado no rebolo apenas para planificação de sua base.

Figura 19 – Peão com canal de vazamento (esquerda), peão sem canal de vazamento (centro) e torre com canal de vazamento (direita).



Fonte: Próprio autor

Como podemos ver, em linhas gerais, as peças possuem acabamento semelhante, com boa qualidade. Temos a presença de alguns defeitos, porém, a grande maioria pode ser resolvida por usinagem ou são provenientes do modelo, como será mostrado adiante. Destaca-se que as peças com canal de vazamento precisam ser submetidas a usinagem ainda que não apresentem defeitos.

Na região inferior do peão sem canal de vazamento vemos algo parecido com uma camada recobrendo a peça. Isso aconteceu durante a planificação de sua base. À medida que o moto esmeril arranca material, temos a formação dessa discreta camada.

O resultado desse ensaio é considerado muito bom, uma vez que seu objetivo maior foi alcançado, qual seja, mostrar que a técnica é capaz de manter um padrão em seus resultados, ainda que o fator humano impossibilite a igualdade na execução das etapas.

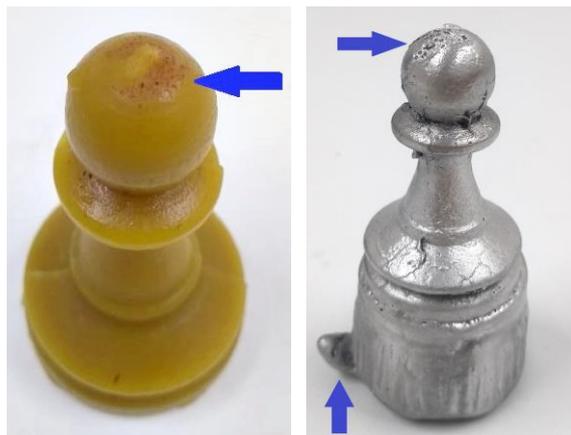
Haja vista que o mesmo molde de silicone é utilizado para produzir vários modelos de uma mesma peça, normalmente os modelos são praticamente idênticos. Assim, podemos considerar que o modelo utilizado para fabricar a torre desse ensaio (Figura 19) é o mostrado na Figura 17. A similaridade entre modelo e peça pode ser constatada através do defeito no topo, qual seja, um excesso de material que não pertence a uma torre comum de xadrez.

Todavia, o molde de silicone se desgasta à medida que é reutilizado, e algumas condutas podem acelerar esse desgaste, como por exemplo, preencher o molde com a cera em temperatura muito elevada. Ademais, é necessária a imposição de uma pressão mínima para unir as partes do molde, de modo que elas não se desloquem.

Nesse contexto, há casos em que dois modelos fabricados no mesmo molde são bem diferentes, como no caso dos peões desse ensaio, que são mostrados nas Figuras 20 e 21.

Primeiro será analisado o peão com canal de vazamento. O modelo e a respectiva peça produzida são mostrados na Figura 20.

Figura 20 – Modelo em cera (esquerda) e peça em alumínio (direita) do peão com canal de vazamento.



Fonte: Próprio autor.

Comparando as duas imagens notamos que o modelo possui defeitos no topo e esses defeitos foram reproduzidos e agravados na peça. A presença desses defeitos era esperada, já que eles foram formados vazando-se cera líquida no interior do molde de silicone, enquanto o ideal seria injeta-los a 100 bar.

As cavidades na peça de alumínio são mais profundas e mais largas do que as originais. Contudo, é necessário dizer que a cera é fosca o que prejudica a visualização dos defeitos, sobretudo por foto.

Os pequenos defeitos na peça são copiados pelas primeiras camadas da lama refratária. Essas microrregiões se tornam mais frágeis que o restante da casca e, conseqüentemente, sofrem maior desgaste durante o vazamento do metal líquido. Esse é provavelmente o motivo pelo qual os defeitos são acentuados.

Na imagem da direita temos também a presença de rebarba. Nesse caso, a rebarba não representa problema, pois ela está na região do canal de vazamento que deve ser removido posteriormente mesmo que não haja defeitos. Nesse ponto temos uma vantagem da utilização de canal de vazamento.

As primeiras camadas da Mistura I escorrem um pouco enquanto secam, logo, a tendência é que a região mais inferior da amostra seja pior recoberta, o que contribui para a ocorrência de defeitos. Quando se utiliza canal de vazamento, os defeitos decorrentes desse fato ficam em uma área da peça que será obrigatoriamente removida. No mais, existem outros defeitos espalhados pela superfície do peão de alumínio, porém, não se sabe ao certo sua origem.

Agora será analisado o peão sem canal de vazamento. A peça produzida e o modelo utilizado são exibidos na Figura 21.

Figura 21 – Modelo em cera (esquerda) e peça em alumínio do peão sem canal de vazamento.



Fonte: Próprio autor.

O modelo mostrado na Figura 21 possui o defeito conhecido como deslocamento do molde. Uma possível causa desse defeito se encontra nas ligas que são utilizadas para

aplicar pressão unindo as duas metades do molde de silicone. Com o tempo as ligas vão perdendo sua elasticidade e passam a aplicar cada vez menos pressão, não sendo mais capazes de manter o alinhamento das partes durante o preenchimento com a cera líquida. Uma vez que as metades do molde de silicone se deslocam, temos a formação de um degrau tanto no modelo quanto na peça, como pode ser visto nas imagens.

Destaca-se que, na Figura 18 esse defeito não é evidente, pois a foto mostra outro lado da peça. Entretanto, na mesma figura, já é possível visualizar parcialmente outra falha na peça.

Assim como no outro peão dessa etapa, temos pequenas cavidades no topo da amostra, contudo, o modelo utilizado aqui não possuía tal defeito. Algumas vezes, depois de finalizada a calcinação, pedaços muito pequenos da Mistura I eram encontrados soltos dentro do *investment*. Como dito anteriormente, as camadas iniciais escorrem um pouco pela superfície do modelo conforme secam, dessa forma, o topo da peça acaba ficando com um recobrimento ainda mais fino. Pode ser que as partes soltas sejam oriundas dessa região e que os defeitos tenham se formado graças a isso.

Voltando um pouco no trabalho, lembra-se que a Mistura I utilizada nas peças da quarta tentativa apresentava uma fluidez bem menor que a empregada no presente experimento, devido a diferença na quantidade de água utilizada. Nenhuma das peças da quarta tentativa possui essas cavidades no topo (exceto o cavalo, mas por falha na calcinação, conforme explicado, e as cavidades são bem maiores). Dessa forma, reafirma-se a grande possibilidade de a Mistura I ter sido a responsável pela formação da falha em análise.

Comparados os modelos das Figuras 18 e 19, curiosamente percebemos uma diferença no tom de suas cores. Durante a realização dos experimentos desse trabalho, constatamos que a cor da cera muda suavemente a cada vez que ela é reutilizada. A coloração mais clara mostra que a cera já foi reaproveitada várias vezes. Não foram detectadas diferenças ao se trabalhar com a cera nova ou com a reaproveitada.

6. CONCLUSÃO

Esse estudo foi realizado visando o desenvolvimento de uma nova fórmula de casca cerâmica, para ser aplicada na fundição por cera perdida do LaF, que seja capaz de produzir peças com boa qualidade, visto que esse é um requisito básico para fundidos. Para isso, foram utilizados materiais nunca testados no referido laboratório, como a argila refratária.

A peça com maior qualidade produzida nesse trabalho foi o peão de xadrez produzido na quarta tentativa (Figura 18). Nesse caso, as camadas iniciais da casca cerâmica foram aplicadas mergulhando o modelo em um recipiente com Mistura I, que é como se faz na indústria. A Mistura I utilizada nessa etapa é composta apenas de argila refratária, silicato de sódio neutro e água. Concluiu-se que o fator determinante para a melhor qualidade da peça foi a redução da quantidade de água que a técnica de imersão permite.

Entendeu-se também que utilizando menos camadas da Mistura 2 (concreto refratário) o molde é quebrado mais facilmente ao final do processo. Assim, como sugestão de melhoria, recomenda-se utilizar apenas uma ou nenhuma camada dessa mistura e, para compensar, aumentar o número de camadas da Mistura III. Além de facilitar a quebra do *investment*, haverá uma redução de custos, uma vez que o arisco é mais barato que o cimento a base de alumina.

Percebeu-se que o molde de silicone e, conseqüentemente os modelos em cera, são fundamentais para a qualidade da peça final. Devem ser utilizados modelos com melhor acabamento possível, pois defeitos no modelo sempre serão repassados a peça metálica. Além disso, deve-se ter atenção para a união das metades do molde, pois se eles não estiverem bem firmes, certamente o modelo terá problemas.

O método desenvolvido dispensa a utilização de autoclave para a retirada da cera do interior da casca. Isso é muito importante, pois gera redução de custos e de risco, uma vez que a autoclave trabalha com grandes pressões capazes de ocasionar graves acidentes.

Por fim, conclui-se que o trabalho atingiu seu objetivo, uma vez que, através da metodologia desenvolvida, foi possível a produção de uma peça de ótima qualidade. Contudo, é sabido que sempre há lugar para novos estudos e conseqüentes melhorias. Dito isso, ficam como sugestões para trabalhos futuros: pequenas modificações na fórmula da Mistura I, tentativa de produção de peças maiores e produção de várias peças simultaneamente com árvore modelo.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Alexia 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.

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

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

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.

<https://slideplayer.com.br/slide/9120217/>. Acesso em 18 fev. 2021.

https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/3685-macroporosidade. Acesso em 18 fev. 2021.

https://www.rioinox.com/index_arquivos/microfusao.htm. Acesso em 17 fev. 2021.

KLUG, Jeferson Leandro. Notas de aula. UFC, 2019.

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