



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

JOÃO HELÁDIO DUARTE

**DESENVOLVIMENTO DE CASCA CERÂMICA À BASE DE MULITA PARA
FUNDIÇÃO POR CERA PERDIDA**

FORTALEZA

2022

JOÃO HELÁDIO DUARTE

DESENVOLVIMENTO DE CASCA CERÂMICA À BASE DE MULITA PARA
FUNDIÇÃO POR CERA PERDIDA

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

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

Coorientador: Msc. Samuel Lucas Santos Medeiros.

FORTALEZA

2022

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)

D872d Duarte, João Heládio.

Desenvolvimento de casca cerâmica à base de mulita para fundição por cera perdida / João Heládio Duarte. – 2022.
33 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Jeferson Leandro Klug.

Coorientação: Prof. Me. Samuel Lucas Santos Medeiros.

1. Revestimento. 2. Fundição. 3. Mulita. I. Título.

CDD 669

JOÃO HELÁDIO DUARTE

DESENVOLVIMENTO DE CASCA CERÂMICA À BASE DE MULITA PARA
FUNDIÇÃO POR CERA PERDIDA

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

Aprovada em: __ / __ / ____

BANCA EXAMINADORA

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

MSc. Engenheiro Civil Pedro Henrique Nogueira Garcia
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

A Deus.

Aos meus pais, Francisco e Antonia.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por todos os ensinamentos ao longo da minha vida.

A todos os meus irmãos, pelo imenso apoio e encorajamento.

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

Ao Mestre Samuel Lucas Santos Medeiros pela presteza, atenção e ajuda.

Aos membros participantes da banca examinadora, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Ao formando Felipe Fonseca, por todo auxílio na realização das atividades no laboratório, pela amizade e o incentivo.

Aos professores do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, pelos conhecimentos compartilhados.

A todos os amigos da Universidade pelos momentos compartilhados e memórias construídas.

“A humildade é o primeiro degrau para a sabedoria”. São Tomás de Aquino.

RESUMO

O intuito deste trabalho é otimizar a fabricação de pequenas peças metálicas usando o processo de fundição de precisão por cera perdida a ser aplicado pelo Laboratório de Fundição da Universidade Federal do Ceará (UFC). O Laboratório de Fundição recebe todos os anos dezenas de estudantes da UFC que cursam a disciplina de fundição cuja aula prática ajuda a fixar os conhecimentos adquiridos em sala de aula. Dentre essas práticas destaca-se justamente o processo de fundição por cera perdida. Apesar das solicitações dos processos realizados em laboratório não possuírem as mesmas complexidades da indústria é importante o desenvolvimento de um processo que possa ser replicado no espaço acadêmico oferecendo aos alunos acesso na prática aos fundamentos básicos desse processo de fabricação. Este trabalho tem como ponto de partida outros estudos realizados no laboratório anteriormente, no entanto, dessa vez busca desenvolver um procedimento mais similar ao que acontece na indústria utilizando materiais simples que atendam aos objetivos propostos. Por isso será construída uma árvore modelo a base de cera, tal como ocorre na indústria, para a fabricação de mais de uma peça metálica por vez. Para isso será utilizado a mulita fundida como principal material para a construção do revestimento cerâmico que recobrirá a árvore de cera formando uma espécie de casca. A árvore revertida será, então, levada para aquecimento afim de fundir a cera. Finalmente o espaço deixado no revestimento será preenchido pelo metal que tomará a forma da casca cerâmica.

Palavras-chave: Revestimento; Fundição; Mulita.

ABSTRACT

The purpose of this work is to optimize the manufacture of small metal parts using the shell systems to be applied by the Foundry Laboratory of the Federal University of Ceará (UFC). Every year the Foundry Laboratory receives dozens of UFC students who attend the casting discipline, whose practical classroom helps to establish the knowledge acquired in the classroom. Among these practices, the investment casting shell stands out. Although the requests for processes carried out in the laboratory do not have the same complexities as in the industry, it is important to develop a process that can be replicated in the academic space, offering students practical access to the basic fundamentals of this manufacturing process. This work has as a starting point other studies carried out in the laboratory previously, however, this time it seeks to develop a procedure more similar to what happens in the industry using simple materials that meet the proposed objectives. Therefore, a wax-based model tree will be built, as in the industry, for the manufacture of more than one metallic part at a time. For this, refractory mullite will be used as the main material for the construction of the ceramic coating that will cover the wax tree forming a kind of bark. The reversed tree will then be heated to melt the wax. Finally, the space left in the coating will be filled by the metal that will take the shape of the ceramic shell.

Keywords: Coating; Foundry; Mullite.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Passo a passo do processo de fundição por cera perdida	18
Figura 2	– Comparação de tamanho entre os modelos utilizados na árvore- modelo (à esquerda) e o modelo que foi utilizado individualmente (à direita).....	20
Figura 3	– Posição da peça em madeira no copo para receber a borracha de silicone.....	21
Figura 4	– Molde de borracha de silicone.....	21
Figura 5	– Ilustração da produção de um modelo em cera.....	22
Figura 6	– Modelos em cera que receberão o revestimento cerâmico.....	22
Figura 7	– Moldes (à esquerda), massalotes e canal de vazamento conectados (à direita).....	23
Figura 8	– Partes da árvore- modelo a serem montadas.....	23
Figura 9	– Árvore- modelo montada.....	24
Figura 10	– Forno mufla.....	25
Figura 11	– Forno de calcinação.....	27
Figura 12	– Árvore- modelo e peão após calcinação.....	27
Figura 13	– Forno de indução.....	28
Figura 14	– Peças metálicas obtidas pelo processo de fundição por cera perdida.....	28
Figura 15	– Aplicação de detergente nas peças em cera.....	29
Figura 16	– Peça com estuque (à esquerda) e sem estuque (à direita).....	30
Figura 17	– Torre de xadrez em modelo de cera e metálica.....	30
Figura 18	– Comparação do peão em cera e metálico.....	31
Figura 19	– Cavalos produzidos utilizando a árvore- modelo.....	32
Figura 20	– Peão produzido utilizando a árvore- modelo.....	33
Figura 21	– Torre produzida utilizando a árvore- modelo.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise química por RFX (%).....	19
Tabela 2 – Mistura e quantidade dos constituintes da 1ª mistura.....	25
Tabela 3 – Mistura e quantidade dos constituintes da 2ª mistura.....	26

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a.C.	Antes de Cristo
g	Gramma
UFC	Universidade Federal do Ceará
Kg	Quilograma
DEMM	Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
kW	Quilowatt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivos gerais	16
2.2	Objetivos específicos	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	Fundição de metais	17
3.2	Cera perdida	17
3.3	Árvore- modelo	17
3.4	Mulita	18
4	MATERIAIS E MÉTODOS	20
4.1	Primeira etapa: fabricação dos modelos em cera	20
4.2	Segunda etapa: aplicação das misturas	24
4.2.1	<i>Primeira mistura</i>	24
4.2.2	<i>Segunda mistura</i>	25
4.3	Terceira etapa: remoção da cera e calcinação da casca cerâmica	26
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1	Torre	30
5.2	Peão	30
5.3	Árvore- modelo	31
5.3.1	<i>Cavalos</i>	32
5.3.2	<i>Peão</i>	32
5.3.3	<i>Torre</i>	33
6	CONCLUSÃO	34
	REFERÊNCIAS	35

1 INTRODUÇÃO

Uma das principais funções do Laboratório de Fundição do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMM) da Universidade Federal do Ceará (UFC) é apresentar aos alunos da disciplina de Fundição uma visão global prática das principais técnicas utilizadas na indústria. Dentre elas está o processo de fundição por cera perdida que permite a fabricação de peças com geometria complexa de maneira precisa. Dentro dessa perspectiva é necessário o desenvolvimento de um processo de fabricação utilizando essa técnica de fundição que atenda aos fins didáticos a que o laboratório se propõe atender levando-se em conta os limites de infraestrutura e materiais disponíveis.

No processo de fundição por cera perdida fabrica-se um modelo em cera no formato da peça que se deseja produzir. Então, o modelo é revestido por camadas de determinadas misturas. No presente trabalho o modelo em cera será revestido por três camadas de uma mistura à base de mulita e três camadas de mistura à base de areia comum (arisco). Logo após, o produto dessas etapas é levado ao forno para que a cera seja removida e a casca cerâmica obtida seja calcinada estando pronta para receber o metal líquido.

O ponto de partida do presente trabalho são os diferentes estudos que já foram realizados no Laboratório de Fundição da UFC a fim de se obter um método eficiente de produção de peças usando a técnica de fundição por cera perdida.

Um desses trabalhos fez uso de camadas à base de argila refratária, cimento à base de alumina e areia para produção das cascas cerâmicas bem como recomenda que trabalhos posteriores tentem realizar o procedimento sem o uso do cimento pois este tende a dificultar a quebra da casca cerâmica depois que o metal vazado solidifica além de aumentar os custos do processo (AMARAL, 2021).

No entanto a argila refratária apresenta uma alta tendência de reter umidade e quando a casca é colocada no forno para derretimento da cera tende a sofrer a ocorrência da quebra da casca cerâmica. Dessa forma, a mulita fundida foi utilizada no presente estudo a fim de que se analise a eficiência deste material quanto as requisições impostas no processo de fundição por cera perdida.

Outro diferencial deste trabalho é a tentativa de obtenção da confecção de peças metálicas por meio de uma árvore- modelo na qual mais de uma peça é montada. Além da árvore- modelo possibilitar a obtenção de mais de uma peça de uma única vez, também conta com um canal de vazamento e massalotes que permitem a produção de peças com boa qualidade. Esse canal de vazamento compõe o eixo central geralmente com formato cilíndrico

no qual será montado um cacho com diferentes modelos de peças menores.

Com a adoção desses novos procedimentos busca-se aproximar aquilo que acontece na indústria e o que é feito em laboratório ainda que diferenças marcantes entre os processos persista como o modo em que os modelos das peças são construídos, os materiais com o qual se fabrica esses modelos e também o material que é utilizado na construção das próprias cascas cerâmicas.

Assim o objetivo do presente trabalho é estudar novas composições da casca cerâmica com o intuito de melhorar as qualidades das peças metálicas produzidas no Laboratório de Fundição do DEMM da UFC usando uma árvore- modelo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Melhorar a qualidade das peças produzidas e testar novos materiais para fabricação da casca cerâmica.

2.2 Objetivos Específicos

Obter peças metálicas por meio da construção de árvore- modelo (método similar ao que ocorre na indústria), estudar a eficiência do uso de mulita fundida e da manta acrílica no processo de fabricação da casca cerâmica, analisar os principais defeitos presentes no processo e suas soluções e estabelecer recomendações para trabalhos futuros.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Fundição de metais

A fundição de metais consiste em uma prática milenar que esteve diretamente conectada com o desenvolvimento das sucessivas civilizações ao longo da história. No entanto, inicialmente, essa prática não era como a que conhecemos hoje. Podemos assim afirmar:

Antes do uso de metais fundidos, objetos eram fabricados através de alterações em suas formas obtidas a frio ou com aquecimento e golpeadas com algum tipo de massa para promover alterações na geometria. Isso não tinha o caráter de fundição, pois os metais não eram submetidos à temperatura suficiente para serem considerados fundidos. A fundição de metais e ligas metálicas passa a ser conhecida e utilizada por volta de 4000 a.C. (Tâmega, 2017, p.10).

Hoje a fundição ainda é largamente utilizada devido as suas características que são extremamente benéficas para determinadas indústrias, por exemplo, segundo Beeley (2001, p.1): “As peças fundidas, produtos da indústria de fundição de metais, são fabricados em passe único de metal líquido sem operações intermediárias de conformação mecânica como laminação e forjamento”.

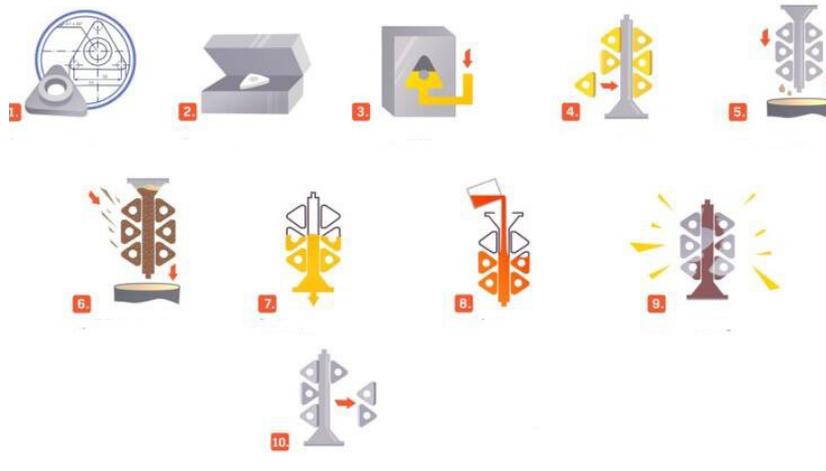
3.2 Cera perdida

O processo de fundição por cera perdida é conhecido como um processo de fundição de precisão. Uma das características que conecta fundição e indústria é justamente a capacidade daquela de permitir a produção de peças complexas com alta precisão. Com isso a fundição de precisão permite que o seu produto final seja muito próximo da peça já acabada sem que haja a necessidade da realização de conformação mecânica. Logo, esse processo permite a obtenção de maneira satisfatória da geometria desejada e um bom acabamento superficial (BEELEY, 2001).

3.3 Árvore- modelo

A árvore- modelo ou cacho cerâmico tem papel crucial no processo de fundição por cera perdida como pode ser observada na figura abaixo.

Figura 1 – Passo a passo do processo de fundição por cera perdida.



Fonte: Laszeray.com

O primeiro passo para construção da árvore- modelo consiste na fabricação do design da peça que será produzido. O produto dessa primeira etapa será então utilizado para construir o molde que receberá a cera na segunda etapa. Após produção do molde a cera líquida será introduzida. Após o modelo de cera esfriar e solidificar, assumindo a geometria do design construído, terá início a construção do cacho cerâmico. Os modelos individuais são colados no eixo central da árvore- modelo. Posteriormente terá início o mergulho do cacho cerâmico na mistura que será utilizada para revesti-la. Depois que o revestimento cerâmico seca, a árvore é levada para o forno a fim de fundir a cera. Com a remoção da cera um espaço vazio é produzido na casca cerâmica que receberá o metal líquido que assumirá o formato do modelo em cera derretido. Por último ocorre a quebra da casca cerâmica e limpeza da peça obtida retirando o material cerâmico encrustado. Logo depois as peças metálicas são cortadas da árvore finalizando o processo.

3.4 Mulita

A mulita é um importante composto químico para indústria cerâmica por sua diversidade de aplicações que vai desde o uso como refratário até a aplicação como revestimento cerâmico. Sua fórmula geral é $3Al_2 \cdot 2SiO_2$ (MACHADO, 2017).

Dentre as propriedades que destacam a mulita perante os outros materiais é a elevada refratariedade, o alto módulo de ruptura, a boa resistência ao choque térmico, a erosão e ao ataque químico (MAGLIANO; PANDOLFELLI, 2011).

A mulita fundida do tipo MUB da empresa Elfusa é produzida no forno elétrico a arco por meio da fusão de quartzo e alumina. Além disso esse material possui um baixo grau de expansão térmica e alta resistência ao choque térmico, por isso é um ótimo material para ser utilizado em microfusão e outras aplicações refratárias (ELFUSA, c2022).

Tabela 1 – Análise química por RFX (%)

Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	Na_2O	CaO
74,59	24,66	0,05	0,27	0,03

Fonte: Elfusa.com.br

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Todo o procedimento de produção de peças metálicas pelo método de fundição por cera perdida foi realizado por meio de três etapas principais: fabricação dos modelos em cera, aplicação das misturas (mulita e areia), remoção da cera e calcinação. As seguintes peças foram produzidas: uma torre de jogo de xadrez, um peão e uma árvore- modelo (dois cavalos, um peão e uma torre). Os modelos de cera que compõe o cacho cerâmico apresentam um tamanho menor que os outros modelos que serão trabalhados separadamente.

Figura 2 – Comparação de tamanho entre os modelos utilizados na árvore- modelo (à esquerda) e o modelo que foi utilizado individualmente (à direita).



Fonte: Autor

4.1 Primeira etapa: fabricação dos modelos em cera.

Com ajuda do professor- orientador Jeferson Klug foi possível construir os moldes de borracha de silicone que receberam a cera de abelha líquida. Nessa etapa foram utilizados os seguintes materiais:

- Borracha de silicone líquida;
- Catalisador rápido;
- Copo descartável;
- Peça de xadrez em madeira (design de peça em metal a ser produzida);
- Cola branca;
- Cera de abelha.
- Ligas de borracha.

Fixou- se, com uma cola branca, a peça de xadrez em madeira dentro do copo em posição vertical (Figura 3). O tamanho do copo escolhido nos diferentes moldes produzidos

mantinha relação com o tamanho da peça em madeira. Logo após foi adicionado a borracha de silicone líquida junto com o catalisador rápido no copo até preenchê-lo. A borracha de silicone reproduz com riqueza de detalhes o modelo da peça de madeira. Para cada 1kg de borracha de silicone é necessário utilizar 30g de catalisador rápido. O catalisador utilizado possui uma composição de solução de esteies silícico e de estanho. Após a aplicação do catalisador o tempo de cura gira em torno de 2 a 4 horas e então o molde poderá ser desenformado. O produto obtido será um molde de borracha de silicone pronto para receber a cera (Figura 4).

Figura 3 – Posição da peça em madeira no copo para receber a borracha de silicone.



Fonte: Autor.

Figura 4 – Molde de borracha de silicone.



Fonte: Autor.

A cera de abelha líquida é adicionada no molde de silicone assumindo o formato da peça de xadrez que serviu de *design* como está ilustrado na figura a seguir. As ligas de

borracha têm a função de fixar as partes do molde de silicone. O Laboratório de Fundição conta com dois tipos de cera: cera de abelha e parafina. A cera de abelha foi utilizada em detrimento da parafina nesse estudo pois possui menor coeficiente de expansão térmica, logo o revestimento cerâmico será submetido a menores tensões em sua estrutura quando for submetido a temperaturas mais altas.

Figura 5 – Ilustração da produção de um modelo em cera.



Fonte: Autor.

Os modelos em cera (torre e peão) estão mostrados a seguir (Figura 6).

Figura 6 – Modelos em cera que receberão o revestimento cerâmico.



Fonte: Autor.

Para construção da árvore- modelo há algumas diferenças no procedimento adotado. Foi necessário produzir um canal principal de formato cilíndrico além de duas bases (massalotes) moldados por pequenos copos descartáveis. As partes da árvore- modelo são conectados utilizando um ferro de solda (Figura 7).

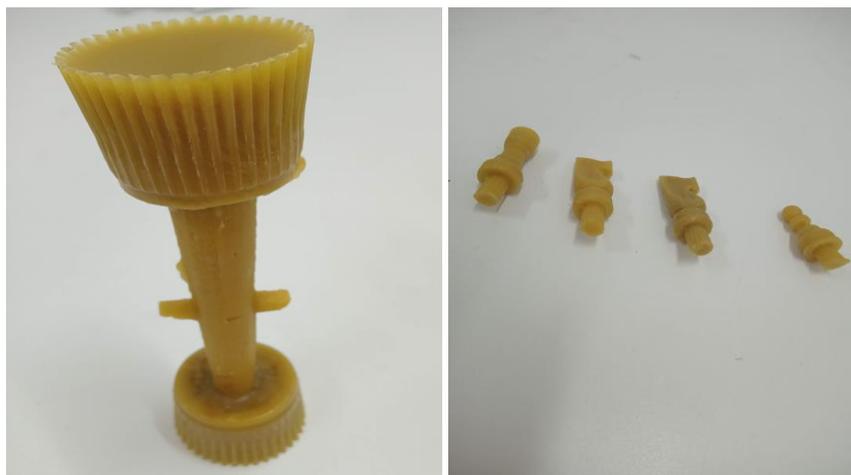
Figura 7 – Moldes (à esquerda), massalotes e canal de vazamento conectados (à direita).



Fonte: Autor.

Logo depois os modelos em cera das peças de xadrez foram fixados no canal cilíndrico do cacho cerâmico (Figura 8)

Figura 8 – Partes da árvore- modelo a serem montadas.



Fonte: Autor.

Assim teremos a árvore em seu formato final como é mostrado na figura 9. O tamanho da árvore utilizado limitou-se ao tamanho do forno mufla e do forno de calcinação para que pudesse ser colocada e retirada sem impedimentos.

Figura 9 – Árvore- modelo montada.



Fonte: Autor.

4.2 Segunda etapa: aplicação das misturas.

Nessa etapa duas misturas foram utilizadas para fabricar o revestimento que formará a casca cerâmica. Foram utilizados os seguintes materiais:

- Mulita fundida;
- Silicato de sódio neutro;
- Água;
- Areia comum (arisco);
- Areia de piscina (estruque).
- Peneira 300 mesh.

4.2.1 Primeira mistura

A tabela a seguir mostra os componentes e quantidades da primeira mistura à base de mulita que constitui a casca cerâmica.

Tabela 2 – Mistura e quantidade dos constituintes da 1ª mistura.

1ª Mistura	Mulita	Silicato de sódio neutro	Água
Quantidades	95%p	5%p	25ml para cada 100g de mistura

Fonte: Autor

A mistura à base de mulita fundida foi aplicada três vezes (três camadas). A mulita fundida utilizada é do tipo MUB da Elfusa com grãos TPF II. Mistura-se a mulita, o silicato de sódio neutro e a água agitando os componentes de modo a obter uma consistência pastosa que permita a mistura ser aplicada no modelo por mergulho ou mesmo por pincelamento. O silicato de sódio neutro foi adquirido da empresa de produtos químicos Daneto. Essa primeira mistura tem como principal objetivo reproduzir de maneira precisa a geometria e o acabamento superficial do modelo em cera. O tempo de secagem entre a primeira e segunda camada foi de quarenta e cinco minutos e entre a segunda e a terceira camada o tempo de secagem foi de uma hora. O peão, a torre e a árvore- modelo serão submetidos pelas três primeiras camadas. Antes da adição da primeira camada de mulita foi utilizada detergente em todos os modelos em cera uma vez que a mulita não estava aderindo a peça de cera. Ainda foi necessário utilizar areia para filtro de piscina Dancar como estuque após a aplicação de cada camada de mulita. O estuque (areia de piscina) têm a função de garantir que haja permeabilidade na casca cerâmica de modo que todos os gases retidos possam ser expelidos em temperaturas mais altas de modo a impedir que surjam defeitos da peça como trincas.

4.2.2 Segunda mistura

A segunda mistura utilizada à base de areia (arisco) peneirado com peneira comum de 300 *mesh* e silicato têm por função dar maior sustentação à casca cerâmica e garantir que as três primeiras camadas de mulita não quebrem quando forem submetidas a aquecimento. A tabela 2 descreve os materiais utilizados para essa mistura e suas respectivas quantidades.

Tabela 3 - Mistura e quantidade dos constituintes da 2ª mistura.

2ª Mistura	Areia	Silicato Neutro	Água
Quantidades	90%p	10%p	Dobro da quantidade de silicato neutro.

Fonte: Autor.

A segunda mistura foi adicionada três vezes com um intervalo de uma hora entre uma camada e outra por meio de pincelamento. O peão, a torre e a árvore- modelo serão submetidos pelas três camadas à base de areia. O modelo do peão de xadrez passou por um procedimento adicional, pois foi adicionado manta acrílica após a primeira camada da segunda mistura.

4.3 Terceira etapa: remoção da cera e calcinação da casca cerâmica

Na terceira e última etapa os modelos e a árvore- modelo já revestida com as misturas foram levados para o forno com o intuito de remover a cera do revestimento. A peça foi deixada por 120 minutos a uma temperatura de 90 °C para que toda cera fosse fundida e removida deixando apenas a casca cerâmica. Para isso foi utilizado o forno mufla (Figura 10) do laboratório de Fundição da UFC.

Figura 10 - Forno mufla.



Fonte: Autor

Logo depois a casca cerâmica já livre da cera de abelha foi levada para calcinação sendo mantida em uma temperatura de 700 °C por 60 minutos a fim de dispersar os gases presentes na casca. O forno onde foi realizada a calcinação está mostrado na figura abaixo.

Figura 11 – Forno de calcinação.



Fonte: Autor

A figura abaixo mostra a casca cerâmica da árvore- modelo e do peão após serem calcinados.

Figura 12 – Árvore- modelo e peão após calcinação.



Fonte: Autor.

Por fim ocorreu o vazamento, a partir da sucata de alumínio fundida, nas cascas cerâmicas. O alumínio foi fundido no forno de indução do Laboratório de Fundição da UFC da marca Servifor (Figura 13) o qual possui 50 kW de potência máxima. Antes de preencher a casca cerâmica com o metal líquido ela foi submetida a uma temperatura de 200 °C para diminuir as tensões térmicas no momento em que a sucata de alumínio fundida fosse introduzida.

Figura 13 – Forno de indução.



Fonte: Autor.

Após o resfriamento das cascas elas foram quebradas e as peças metálicas foram obtidas (Figura 14).

Figura 14 – Peças metálicas obtidas pelo processo de fundição por cera perdida.



Fonte: Autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Depois que as cascas cerâmicas foram quebradas e as peças da árvore removidas foi possível fazer uma análise mais detalhada do resultado final tanto da geometria quanto do acabamento superficial de todas elas.

Inicialmente a aplicação da mulita no molde de cera foi feito sem a aplicação de detergente o que ocasionava uma falta de aderência e toda a mistura escorria. Esse problema também tinha sido verificado em trabalhos anteriores realizados no laboratório e se deve a diferença de polaridade entre a mistura e o modelo por isso o detergente neutro foi adicionado (Figura 15).

Figura 15 – Aplicação de detergente nas peças em cera.



Fonte: Autor.

Todas as peças também receberam areia de piscina que foi utilizada como estuque após a adição de cada camada de mulita isso se deu pois quando não era usado o estuque as camadas iniciais ficavam sem muita resistência e eram arrancadas quando as demais camadas eram aplicadas. O estuque também aumenta a resistência da casca cerâmica quando submetida a altas temperaturas. Além disso o estuque tem a função de garantir a permeabilidade da casca uma vez que permite que em altas temperaturas os gases consigam escapar da sem ocasionar trincas e outros defeitos. A figura abaixo compara a primeira mistura sendo aplicada com e sem estuque.

Figura 16 – Peça com estuque (à esquerda) e sem estuque (à direita).



Fonte: Autor.

5.1 Torre

O revestimento cerâmico da torre apresentou trincas após a calcinação por isso foi utilizada manta acrílica na peça do peão como será explicado mais à frente. Na próxima figura é possível comparar o modelo em cera e a peça finalizada.

Figura 17 – Torre de xadrez em modelo de cera e metálica.



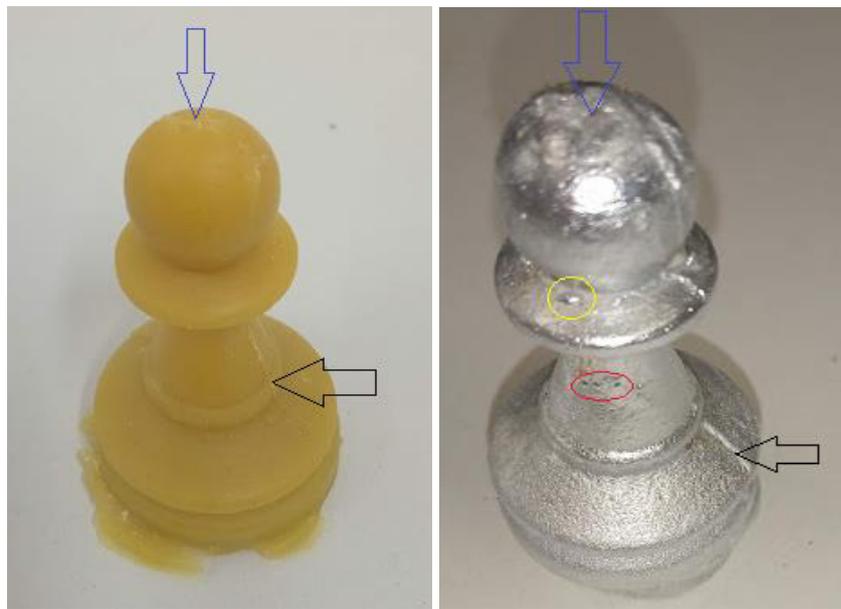
Fonte: Autor.

É possível notar uma certa rugosidade na base da torre metálica que já estava presente no modelo em cera o que mostra efetividade do processo ao copiar os detalhes superficiais. Outra questão a ser notada é que as trincas presentes na casca cerâmica da torre não trouxeram grandes defeitos para peça final então eram, provavelmente, apenas superficiais.

5.2 Peão

Na peça de peão foi empregada sobre uma das camadas da segunda mistura uma manta acrílica afim de melhorar a resistência do revestimento cerâmico quando submetido às tensões térmicas. Ainda verificou- se trincas mesmo que muito pequenas na casca, mas não houve grandes problemas na peça. Na figura abaixo a seta de cor azul aponta para rugosidades que já estavam presentes no modelo em cera e se repete na peça metálica produzida. Outro defeito é identificado pela seta preta, mas também já estava presente no modelo em cera isso se deve por conta da marca deixada no ponto de contato entre as duas partes do molde de borracha de silicone. Por isso é importante o uso correto das ligas de borracha que garantem uma junção das partes do molde de maneira mais homogênea além disso também se faz necessário ficar atento com o desgaste do molde de borracha de silicone a medida que vai sendo reutilizado.

Figura 18 – Comparação do peão em cera e metálico.



Fonte: Autor.

Nota- se no círculo amarelo a presença de um defeito chamado “gota fria” que pode ser melhorado com mecanismos de controle do derramamento do metal quando vazado na casca cerâmica por isso é importante canais de vazamento eficientes. O círculo vermelho destaca pequenas porosidades provavelmente decorrentes do contato entre grãos de areia com a peça em cera. Esse problema pode ser sanado com o uso de areia mais fina como estuque.

5.3 Árvore- modelo

Pela primeira vez peças metálicas foram produzidas a partir de uma árvore-modelo no Laboratório de Fundição utilizando o método por cera perdida. A árvore- modelo apresentou trincas após calcinação como foi visto anteriormente pois a casca cerâmica não conseguiu resistir aos esforços a que foi submetido quando levada ao forno. A árvore- modelo contava com quatro peças: um peão, dois cavalos e uma torre.

5.3.1 Cavalos

A figura abaixo mostra as duas peças de cavalos que foram produzidas utilizando a árvore- modelo. O cavalo da esquerda apresenta uma seta azul para um defeito causado por excesso de metal que se incrustou na peça devido a presença de uma trinca que desviou o metal do seu curso normal de trajetória pelo canal de vazamento. É necessário, por exemplo, colocar camadas com pano acrílico para melhorar a resistência da casca cerâmica da árvore. Já o cavalo da direita aparece com uma seta vermelha que aponta para um detalhe superficial bem específico, o olho do cavalo. Esse detalhe mostra o quão preciso é esse processo de fundição que tem a capacidade de copiar de maneira efetiva a geometria do modelo em cera.

Figura 19 – Cavalos produzidos utilizando a árvore- modelo.



Fonte: Autor.

5.3.2 Peão

A peça de peão parece com superfície lisa apesar de haver a presença de gota fria (Figura 20).

Figura 20 – Peão produzido utilizando a árvore- modelo.

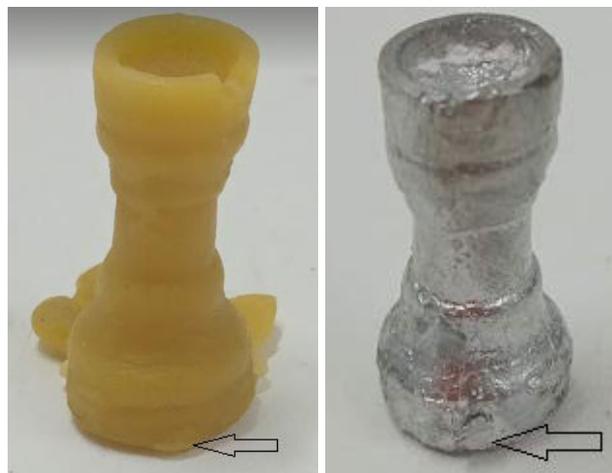


Fonte: Autor.

5.3.3 Torre

A torre metálica apresenta determinadas regiões com a presença de rugosidades principalmente na base da peça, mas é possível perceber que tais defeitos já estão presentes no próprio modelo em cera. A seta preta indica um desses defeitos na figura abaixo.

Figura 21 – Torre produzida utilizando a árvore- modelo.



Fonte: Autor.

6. CONCLUSÃO

O processo de fundição por cera perdida exige um controle desde a produção dos moldes de silicone até a quebra da casca cerâmica para retirada das peças metálicas.

A mistura a base de mulita demonstrou boa capacidade de copiar os detalhes de geometria superficiais dos modelos em cera, no entanto, a estrutura da casca cerâmica ainda precisa de melhorias para suportar as tensões térmicas a que é submetida quando postas no forno para remoção da cera e calcinação. Por isso recomenda-se que seja adicionado manta acrílica entre as camadas de mistura adicionadas afim de aumentar a resistência do revestimento cerâmico.

Outra recomendação para trabalhos futuros é a utilização da técnica de DSC (*Differential Scanning Calorimetry*) para relacionar as transições da casca cerâmica em função da temperatura com a finalidade de identificar possíveis causas do surgimento de trincas.

Assim sendo, o presente trabalho atendeu aos objetivos propostos uma vez que mostrou uma nova composição de casca cerâmica que apresenta uma boa capacidade de produzir peças metálicas de qualidade e foram fabricadas peças utilizando a árvore- modelo de modo a evidenciar um processo com maiores similaridades com o que ocorre na indústria utilizando a casca cerâmica à base de mulita.

REFERÊNCIAS

AMARAL, Fernando José Ribeiro. Desenvolvimento de uma nova fórmula de casca cerâmica para fundição em cera perdida. 2021. 43f. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

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

<https://laszeray.com/blog/investment-casting-steps-in-the-investment-casting-process/>. Acesso em 8 Fev. 2022.

MACHADO, Glauson Aparecido Ferreira. **Recobrimento à base de mulita em refratário de carbetto de silício obtidos a partir de pmsq[poli(metilsilsesquioxano)] e alumínio**. 2017. Tese (Doutor em Ciência na Área de Tecnologia nuclear – Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2017.

MAGLIANO, M. V. M.; PANDOLFELLI, V. C. **Multitização em refratários utilizando diferentes fontes: revisão**, São Carlos, 7 fev.2011.

TÂMEGA, Fábio. Siderurgia: importância, vantagens, limitações e perspectivas do processo de fundição no Brasil e no mundo: c. *In*: TÂMEGA, FÁBIO. **Fundição de processos siderúrgicos**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S. A., 2017. CAP. Seção 1.1, p. 9-10.

ELFUSA. **Produtos**. Disponível em <<http://www.elfusa.com.br/pt/produtos/refratarios/mub>>. Acesso em: 15 fev. 2004.