



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

ALEXIA JORGE DE SOUSA ARAUJO

**DESENVOLVIMENTO DE UM ROTOR DE BOMBA PARA FOGUETES DE
BAIXO EMPUXO POR MEIO DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO DE PRECISÃO**

FORTALEZA
2019

ALEXIA JORGE DE SOUSA ARAUJO

DESENVOLVIMENTO DE UM ROTOR DE BOMBA PARA FOGUETES DE BAIXO
EMPUXO POR MEIO DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO DE PRECISÃO

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

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

Coorientador: Samuel Lucas Santos Medeiros.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A687d Araujo, Alexia.
Desenvolvimento de um rotor de bomba para foguetes de baixo empuxo por meio do processo de fundição de precisão / Alexia Araújo. – 2019.
37 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Dr Ing Jeferson Leandro Klug .

Coorientação: Prof. Me. Samuel Lucas Santos Medeiros.

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

CDD 669

ALEXIA JORGE DE SOUSA ARAUJO

DESENVOLVIMENTO DE UM ROTOR DE BOMBA PARA FOGUETES DE BAIXO
EMPUXO POR MEIO DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO DE PRECISÃO

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Metalúrgica no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

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

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

Prof. Dr. Claus Franz Wehmann
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

À minha avó materna e às minhas tias.

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo a Deus pelo dom da vida, por seu amor e misericórdia.

Agradeço à minha amada avó materna por ter cuidado de mim com tanto amor, carinho e dedicação e que certamente estaria orgulhosa por esta conquista na minha vida.

Agradeço ao meu companheiro pela parceria, amor, atenção e pela minha evolução a cada dia.

Agradeço às minhas tias maternas por terem investido nos meus estudos, por sempre acreditarem em mim e pelos momentos felizes que vivemos.

Agradeço ao meu irmão Samuel pela infância que passamos juntos.

Agradeço aos meus primos e tios pela amizade, pelos momentos de descontração e pelas palavras motivadoras em situações difíceis.

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

Ao técnico de laboratório Samuel Medeiros, ao engenheiro mecânico Flávio Herculano e aos professores Jorge Luiz e Ricardo Emílio pela amizade e por todas as vezes que me auxiliaram na graduação.

Ao Prof. Dr. -Ing. Jeferson Leandro Klug pela orientação, pela disponibilização de materiais e pelos ensinamentos no laboratório.

Ao Prof. Claus Franz Wehmann pela disponibilização da peça utilizada neste trabalho.

Aos professores participantes da banca examinadora: Jeferson Leandro Klug, Claus Franz Wehmann e Jorge Luiz Cardoso pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

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

“Que ninguém se engane, só se consegue a simplicidade através de muito trabalho.”
(Clarice Lispector).

RESUMO

A fundição de precisão é uma técnica milenar para produzir peças de metal com o uso variado de ligas metálicas. Além disso, o método permite obter um ótimo acabamento e o controle rígido das propriedades mecânicas, sendo muito utilizado nas indústrias automobilística e aeronáutica, como em palhetas e rotores de turbinas de avião. O método utiliza metais não ferrosos e é mais vantajoso que outras técnicas de fundição, por aliar um alto grau de precisão dimensional e de detalhamento interno (produz peças acabadas sem a utilização posterior de uma usinagem ou de outras técnicas adicionais), utilizando um material acessível e de baixo custo. Foi utilizada a técnica de fundir em cera perdida para desenvolver um rotor de bomba feito de alumínio para uso em foguetes. A técnica de fundição de precisão consistiu em fabricar um modelo em cera, a partir da cera preaquecida no forno, a 100 °C, por um tempo pré-determinado (até escorrer toda a cera por efeito gravitacional), e que foi vazada dentro de um molde feito de silicone e catalisador até a cura. O molde em cera foi removido e, em seguida, revestido nas duas primeiras camadas com um material refratário (mistura de cimento à base de alumina, areia, silicato de sódio e um volume em mililitros de água), já as duas últimas camadas foram feitas com areia, silicato de sódio e um volume em mililitros de água. Posteriormente, a peça foi colocada no forno, invertida e aquecida até que a cera fundisse e escorresse por meio da gravidade. Por fim, a peça foi calcinada a 750 °C por 30 minutos e, com o molde ainda a quente, o metal líquido foi vazado.

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

ABSTRACT

Investment casting is an age-old technique for producing metal parts with the varied use of metal alloys. In addition, the method allows for optimum finishing and tight control of mechanical properties, being widely used in the automotive and aeronautics industries, such as airplane turbine blades and rotors. The method utilizes non-ferrous metals and is more advantageous than other casting techniques because it combines a high degree of dimensional accuracy and internal detailing (produces finished parts without further machining or other techniques) using an accessible material and low cost. The lost wax casting technique was used to develop a pump rotor made of aluminum for use in rockets. The investment casting technique consisted of fabricating a wax model from preheated oven wax at 100 °C for a predetermined time (until all the gravitational effect wax dripped), which was poured into a wax mold made of silicone and catalyst until cure. The wax mold was removed and then coated on the first two layers with a refractory material (alumina-based cement mixture, sand, sodium silicate and a volume in milliliters of water), while the last two layers were made with sand, sodium silicate and a volume in milliliters of water. Subsequently, the piece was placed in the oven, inverted and heated until the wax melted and drained through gravity. Finally, the workpiece was calcined at 750 °C for 30 minutes and, with the mold still hot, the liquid metal was poured.

Keywords: Foundry. Investment casting. Lost wax.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas do processo de fundição de precisão.....	16
Figura 2 - Inclusão de areia nas peças.....	16
Figura 3 - Rechupe com e sem o massalote.....	17
Figura 4- Porosidade.	17
Figura 5- Peça que apresenta falta de preenchimento.	18
Figura 6 - Peça com juntas frias.....	18
Figura 7- Trinças a quente.....	19
Figura 8 - Peça que apresenta o defeito de rebarbas.	19
Figura 9- Inclusões de óxido em uma peça obtida por fundição.	20
Figura 10- Gotas frias.	20
Figura 11- Rotor do foguete em cera de abelha.....	21
Figura 12- Forno mufla do Laboratório.	23
Figura 13- Molde de silicone para a fabricação de peças em cera.....	24
Figura 14- Peça em cera com o massalote.....	24
Figura 15- Peça coberta com duas camadas de refratário.	26
Figura 16- Peça com cinco camadas pronta para a retirada da cera.....	27
Figura 17- Primeira casca cerâmica a 200°C.....	28
Figura 18 Casca cerâmica após a retirada da cera.	29
Figura 19- Casca cerâmica após a calcinação.....	29
Figura 20- Terceira casca cerâmica após a calcinação a 750 °C.....	30
Figura 21- Forno de indução do Laboratório para a fusão de Alumínio.	31
Figura 22- Peça após a solidificação e a retirada da casca refratária.	31
Figura 23- Casca cerâmica um dia após a calcinação. Uso de flash fotográfico.	32
Figura 24- Peça após a limpeza da casca e o corte do massalote.....	33
Figura 25- Peça em cera com o massalote.....	34
Figura 26- Peça em cera vista por outro ângulo.	34

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1- Processos de fundição	14
3.1.1 Fundição de precisão	15
3.2 Defeitos em peças fundidas	16
4 MATERIAIS E MÉTODOS	21
4.1- Materiais utilizados	21
4.2 Confeção da casca cerâmica	22
4.3 Etapas do estudo	23
6 CONCLUSÃO	36
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	37
8 REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

No Laboratório de Fundição, localizado no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, são aplicados diversos processos de fundição, sendo utilizados os conhecimentos adquiridos em sala de aula. Dentre eles, a fundição de precisão, por meio da cera perdida.

Primeiramente, um modelo feito em cera é coberto com várias camadas de material refratário, essa casca cerâmica será o futuro molde para o metal fundido. Para a confecção do molde refratário, os materiais utilizados são: cimento à base de alumina (nas duas primeiras camadas), areia, silicato de sódio neutro e água. Com tais elementos faz-se uma mistura no qual o modelo em cera é banhado. Após a secagem de todas as camadas, a peça é levada ao forno para o modelo de cera derreter. Em seguida, realiza-se a calcinação a cerca de 750 °C e no fim, o vazamento do metal líquido no molde. A técnica é bastante simples, mas é possível obter peças metálicas com poucos defeitos.

Visando produzir uma peça de dimensões complexas com poucos defeitos, este trabalho foi realizado na tentativa de desenvolver um novo método de confecção do molde refratário, utilizando outros materiais que possibilitem a produção de peças com melhor acabamento. Ao final do trabalho, a peça em metal será apresentada e serão discutidos os seus defeitos, utilizando-se o mesmo objeto em cera para efeitos de comparação.

2 OBJETIVOS

Desenvolver e avaliar o processo de fundição de precisão, utilizando diferentes materiais, como cera alveolada de abelha para a peça e o massalote, um diferente ligante (silicato de sódio neutro) e um refratário (cimento de alta alumina) para a confecção das cascas cerâmicas. Além disso, a finalidade específica deste trabalho é produzir um rotor de bomba de um foguete de baixo empuxo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1- Processos de fundição

A fundição é o processo pelo qual os metais ou ligas metálicas em estado líquido são vazadas em um molde para a fabricação dos mais variados tipos de peças, objetos decorativos, joias, carcaças de máquinas, lingotes e outros. Em muitos casos, a fundição é o processo mais simples e econômico de se produzir uma peça, principalmente quando esta é de grande porte, de geometria intrincada ou com canais internos e cavidades.

Este processo pode dar origem a peças acabadas, já em seu formato final, ou não. Nesse caso, elas podem passar por processos de conformação mecânica (por exemplo, forjamento), ajustes dimensionais, soldagem ou usinagem. Porém, de modo geral, as peças fundidas passam por processos de acabamento como corte de canais, usinagem e rebarbação. Quando necessário, as peças também podem passar por tratamento térmico para conferir maior resistência mecânica, como solubilização e envelhecimento. A fundição apresenta algumas vantagens, as quais serão citadas abaixo:

- É um processo com baixo custo inicial.
- Alguns materiais podem ser reaproveitados, como cera, areia, dentre outros.
- Pode utilizar tanto metais ferrosos ou não-ferrosos.
- Capacidade de produção em série ou de peças únicas e de vários tamanhos, massas e formas.

Contudo, também apresenta algumas desvantagens, como:

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

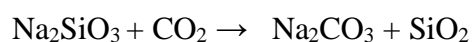
3.1.1 Fundição de precisão

Segundo Peter Beeley (2001), a fundição de precisão é um grupo de processos nos quais os moldes são produzidos a partir de materiais refratários de pequena granulometria. Assim, obtêm-se moldes com textura superficial fina, a qual é transmitida às peças fundidas.

Além disso, tal processo, também conhecido como fundição por cera perdida, oferece altos padrões de precisão dimensional, bom acabamento superficial e flexibilidade de projeto e, diferentemente da fundição sob pressão, é aplicável a ligas de praticamente qualquer composição.

Na indústria, modelos de cera são produzidos, os quais são fixados num local para formar a “árvore de fundição” (modelo), esta será invertida e recoberta com camadas de material refratário suficientes para torná-la rígida.

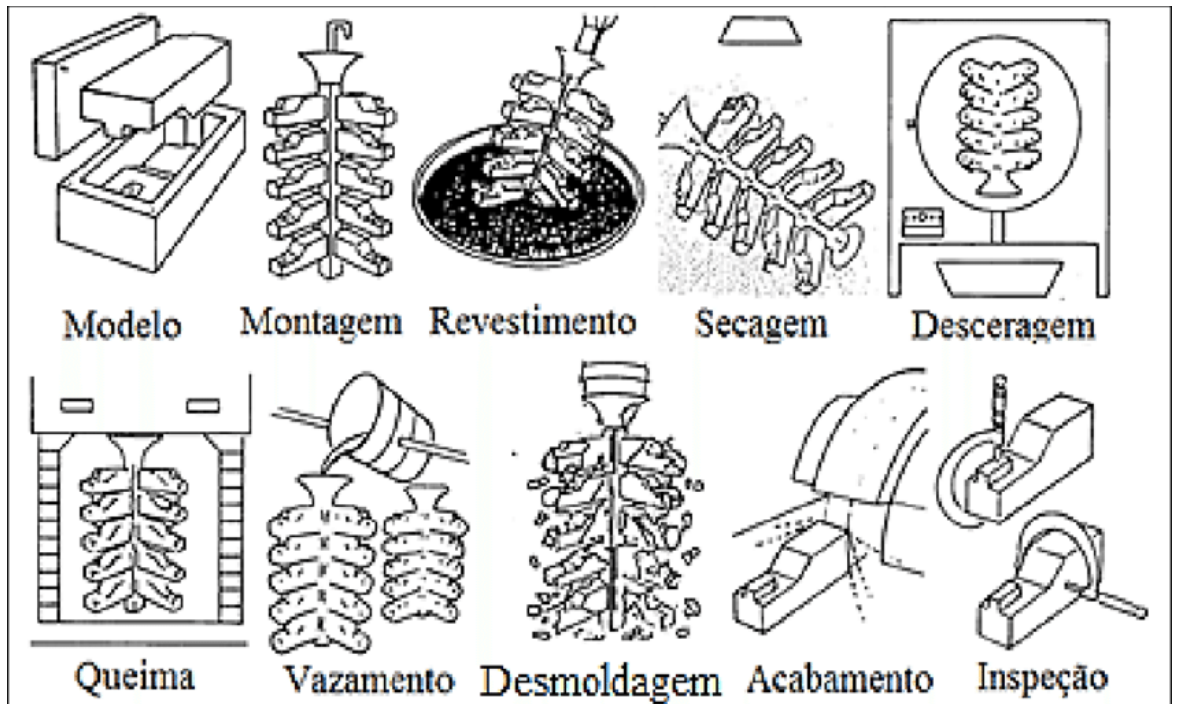
Outro processo bastante utilizado na indústria consiste em injetar gás carbônico (CO₂), o qual entra em contato com as cascas refratárias, gerando ácido carbônico na solução aquosa. O teor de água é reduzido e a viscosidade aumenta pelo fluxo do gás seco. A redução do pH (potencial hidrogeniônico) causa um aumento na proporção SiO₂: Na₂O e a formação de uma sílica gel coloidal, que endurece e forma a ligação. As reações complexas são totalmente descritas na literatura, mas o efeito geral pode ser resumido na equação:



A vantagem desse processo é a rápida secagem das camadas de casca refratária, sendo possível produzir muitas peças em um curto intervalo de tempo.

Após a aplicação de todas as camadas, o molde é aquecido para fundir a cera e permitir que ela escorra da cavidade. Então o molde é preaquecido a uma temperatura elevada que garanta que todos os contaminantes tenham sido eliminados dele, além de facilitar a fluidez do metal fundido que será vazado. Este metal sofre solidificação, sendo separado do molde, conforme mostra a figura 1:

Figura 1 - Etapas do processo de fundição de precisão.



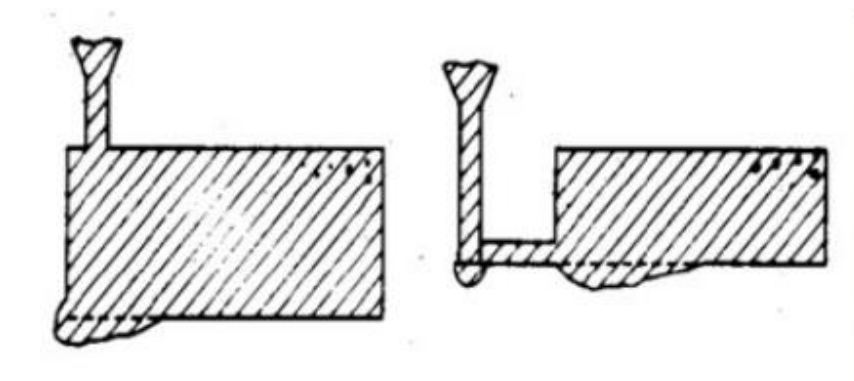
Fonte: Adaptado de (ASM INTERNACIONAL, 2008).

3.2 Defeitos em peças fundidas

Como ocorre em todo processo de fabricação, as peças finais apresentam alguns defeitos, como:

Inclusão da areia do molde nas paredes internas ou externas da peça: Isso causa problemas de usinagem: os grãos de areia são abrasivos e, por isso, estragam a ferramenta. Além disso, causam defeitos na superfície da peça usinada. Outros fatores são erosão, quebra de cantos do molde, fechamento inadequado do molde, transporte inadequado do molde e limpeza inadequada do molde. A figura 2 mostra algumas peças com esse defeito.

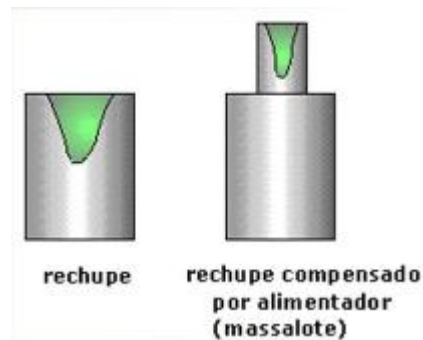
Figura 2 - Inclusão de areia nas peças.



Fonte: Site slideplayer. Slides sobre tixofundição. Autor: Derek Weber.

Rechupe, ou seja, falta de material devido ao processo de solidificação, causado por projeto de massalote malfeito. Esse defeito é formado na última porção de metal líquido que solidifica. Além disso, ocorre geralmente quando há grande diferença de espessura nas paredes. A figura 3 mostra a importância do uso de massalote.

Figura 3 - Rechupe com e sem o massalote.



Fonte: Site do Instituto Federal de Santa Catarina.

Porosidade: Ocorre quando os gases que existem dentro do metal líquido não são eliminados durante o processo de vazamento e solidificação. Isso causa fragilidade e defeitos superficiais na peça usinada. Tal defeito pode ocorrer devido ao excesso de umidade e/ou baixa permeabilidade da mistura, à elevada temperatura da areia, ao grau inadequado de compactação do molde, à composição inadequada da mistura ou a um sistema de alimentação mal projetado. A figura 4 mostra uma peça que apresenta porosidade.

Figura 4- Porosidade.



Fonte: Site da Associação Brasileira de Alumínio.

Falha de preenchimento: O metal solidifica antes de preencher completamente o molde. Tal defeito pode ocorrer devido à baixa fluidez do metal líquido, a baixa velocidade do vazamento ou o metal não ter recebido calor suficiente para que ficasse líquido por tempo suficiente até finalizar o preenchimento. A figura 5 demonstra esse defeito.

Figura 5- Peça que apresenta falta de preenchimento.



Fonte: Site slideplayer. Slides sobre tixofundição. Autor: Derek Weber.

Juntas frias: São confrontos de duas correntes de metal líquido fluindo em diferentes direções, conforme mostra a figura 6.

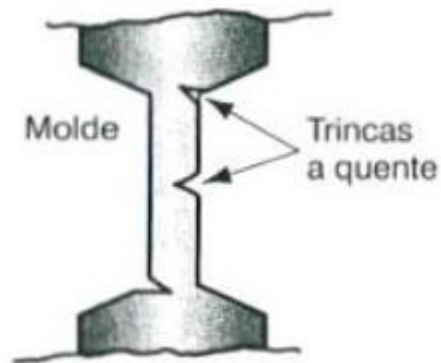
Figura 6 - Peça com juntas frias.



Fonte: Site slideplayer. Slides sobre tixofundição. Autor: Derek Weber.

Trincas de contração: Resultam de tensões mecânicas que ocorrem no resfriamento, conforme mostra a figura 7.

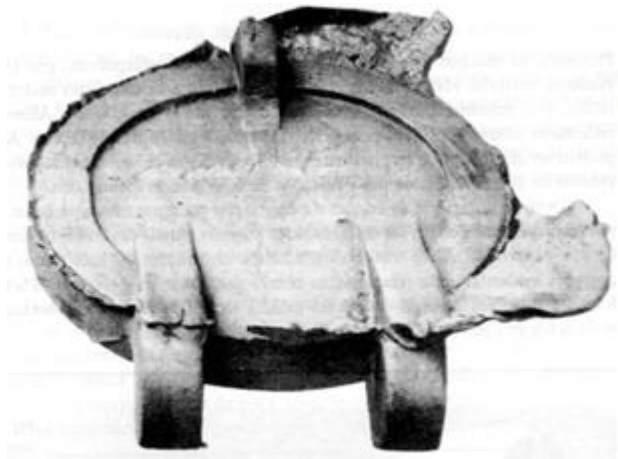
Figura 7- Trincas a quente.



Fonte: Slides da disciplina de fundição. Autor: Professor Dr Ing Jeferson Klug.

Rebarbas: Ocorrem quando o metal líquido penetra em trincas e frestas do molde ou macho, conforme mostra a figura 8.

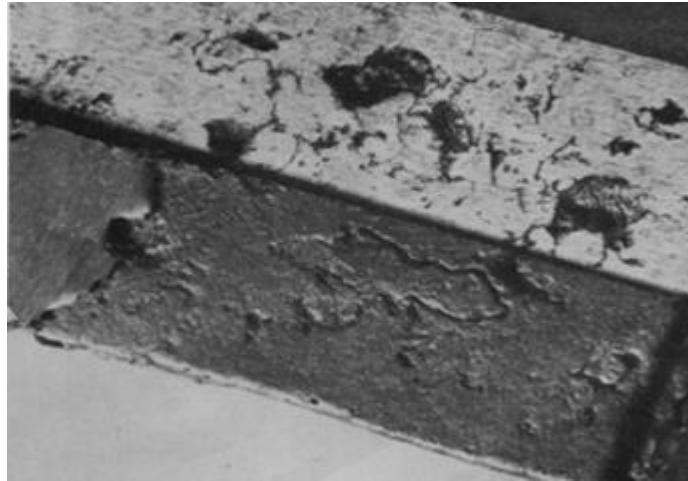
Figura 8 - Peça que apresenta o defeito de rebarbas.



Fonte: Site slideplayer. Slides sobre tixofundição. Autor: Derek Weber.

Inclusões de óxidos: É o aprisionamento de óxidos superficiais durante o vazamento, conforme mostra a figura 9.

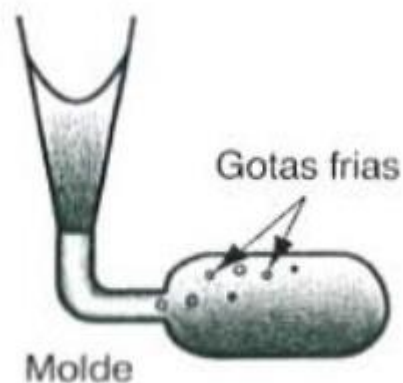
Figura 9- Inclusões de óxido em uma peça obtida por fundição.



Fonte: Site slideplayer. Slides sobre tixofundição. Autor: Derek Weber.

Gotas frias: Resultam de respingos durante o vazamento, causando a formação de grânulos sólidos de metal que ficam aprisionados no fundido. Procedimentos de vazamento e projeto de sistema de canais, para evitar respingos, podem evitar esse defeito. A figura 10 ilustra estes grânulos em uma peça metálica.

Figura 10- Gotas frias.



Fonte: Slides da disciplina de fundição. Autor: Professor Dr Ing Jeferson Klug.

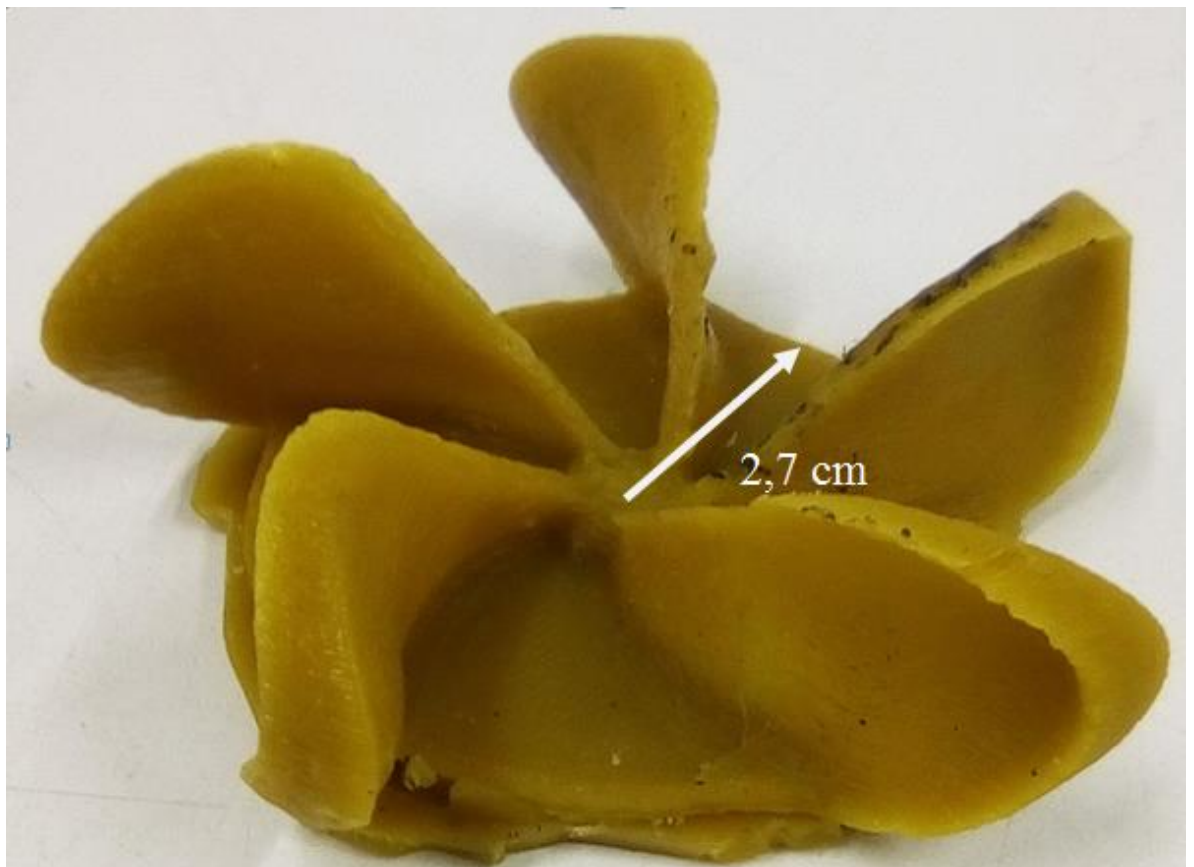
4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1- Materiais utilizados

Para a confecção do molde refratário, foram utilizados os seguintes materiais: silicato de sódio neutro, areia do tipo arisco, cimento de alto teor de alumina e água.

O silicato de sódio neutro desempenha a função de ligante. O cimento refratário é à base de Óxido de Cálcio (CaO) e Óxido de Alumínio (Al_2O_3). Ele suporta altas temperaturas e foi utilizado nas duas primeiras camadas para copiar o mais próximo possível o formato da peça em cera. O cimento deve possuir uma pequena granulometria. A peneira utilizada foi de 60 mesh (Mesh é uma unidade de medida que significa o número de aberturas da peneira por polegada). Já a cera utilizada foi produzida por abelhas e é proveniente do Piauí, conforme mostra a figura a seguir:

Figura 11- Rotor do foguete em cera de abelha.



Fonte: Própria autora.

Para o vazamento das cascas cerâmicas foi utilizado o Alumínio .

4.2 Confeção da casca cerâmica

Para a confecção da casca cerâmica, misturou-se 25% de areia (em massa), 60% de cimento refratário, 15% de silicato de sódio neutro e um volume de água igual ao triplo de silicato e banhar a peça em cera, esperá-la secar por um dia e aplicar a camada subsequente. Esse período de secagem é maior do que o tempo utilizado na indústria pois a concentração de gás carbônico no ar atmosférico é de apenas 0,04%. Por esse motivo, a reação entre o silicato de sódio e o CO_2 é bem mais lenta.

Nesta etapa, tanto a areia e o cimento devem ser peneirados a 60 mesh, e são necessárias cerca de duas camadas finas para copiar as dimensões da peça e cobrir toda a cera.

Posteriormente, são aplicadas três camadas compostas apenas por 90% de areia, 10% de silicato de sódio e água, cujo volume equivale ao triplo de silicato. A areia deve passar por uma peneira comum de cozinha, a qual possui uma granulometria mais grosseira, com o objetivo de obter-se uma casca mais rígida.

Após a finalização de todas as camadas, a peça é levada ao forno a 200 °C por cerca de 30 minutos para a eliminação da cera. Depois, a peça permanece no forno a 750°C para a calcinação. No fim, o metal líquido é despejado na casca cerâmica. Para essas duas etapas, o forno do tipo mufla é usado, o qual será mostrado na figura 12.

Figura 12- Forno mufla do Laboratório.

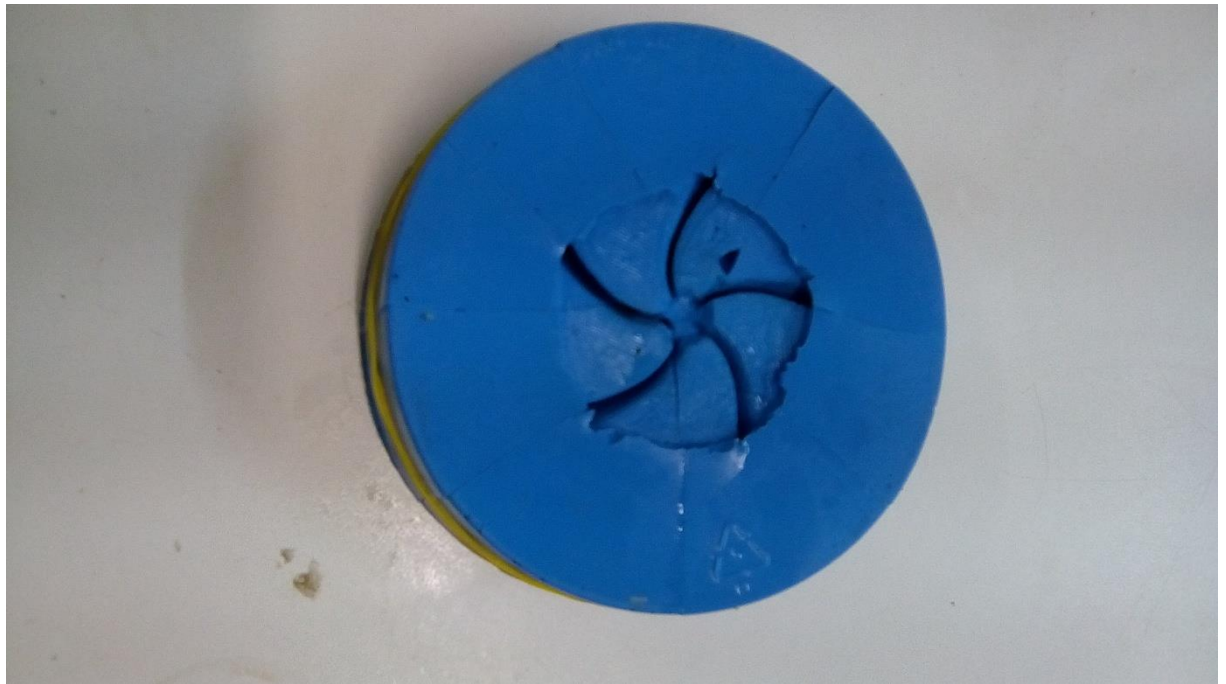


Fonte: Própria autora.

4.3 Etapas do estudo

Inicialmente, foram criadas peças de cera que serviram de modelo. Para isso, despejou-se cera líquida em forma de silicone com o formato do rotor, obtendo, assim, as unidades usadas para a realização dos experimentos, conforme mostra a figura 13.

Figura 13- Molde de silicone para a fabricação de peças em cera.



Fonte: Própria autora.

Após a solidificação da cera de abelha, o rotor é removido da forma de silicone e é feito o massalote. Para isso, despeja-se cera líquida em um funil de alumínio, espera-se a solidificação, retira-se do funil e cola-se com a própria cera na peça do foguete, conforme mostra a figura a 14:

Figura 14- Peça em cera com o massalote.



Fonte: Própria autora.

Após todos os ajustes de defeitos com uma faca aquecida na peça, começa a produção da casca cerâmica. Primeiramente, banha-se a peça em uma mistura formada por 60% de cimento, 25% de areia, 15% de silicato e um volume de água em mililitros igual ao triplo da quantidade de silicato. Esse processo foi realizado para as duas primeiras camadas, as quais possuem a função de copiar o mais próximo possível das dimensões da peça. Cada intervalo para a secagem da peça foi de um dia.

Figura 15- Peça coberta com duas camadas de refratário.



Fonte: Própria autora.

Após a aplicação de duas camadas, a peça foi coberta com uma mistura de 90% de areia, 10% de silicato de sódio e um volume em mililitros de água, mantendo-se a proporção dos testes anteriores. A finalidade dessas últimas camadas é tornar a casca refratária mais resistente às altas temperaturas. Este processo foi repetido por três vezes.

Estando a peça coberta com cinco camadas de refratário, é levada ao forno mufla a 200 °C por 30 minutos para eliminar a cera, e depois deve ser calcinada a 750 °C por cerca de meia hora. A calcinação é um conjunto de reações químicas de decomposição térmica para eliminar gases, como $\text{CO}_2(\text{g})$ e $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$, além de possíveis vestígios de cera.

Posteriormente, e com a peça ainda aquecida a cerca de 300 °C, para facilitar a fluidez do metal fundido, alumínio líquido é vazado na casca, o metal solidifica-se, a casca é retirada e obtém-se a peça.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na primeira tentativa, para as duas primeiras camadas, foram utilizados cimento à base de alumina, areia do tipo arisco, silicato de sódio, além de água. Para as três últimas camadas, uma mistura de areia arisco, silicato de sódio e a mesma regra das camadas anteriores para a quantidade de água utilizada.

Ao atingir 200 °C para a eliminação da cera, a casca mostrou-se bastante quebradiça, conforme mostram as figuras 16 e 17:

Figura 16- Peça com cinco camadas pronta para a retirada da cera.



Fonte: Própria autora.

Figura 17- Primeira casca cerâmica a 200°C.



Fonte: Própria autora.

Já na segunda tentativa, foram utilizados os seguintes materiais: areia do tipo arisco, cimento à base de alumina, silicato de sódio e água, para as duas camadas finas, nas mesmas proporções citadas anteriormente. Para as três camadas grosseiras, utilizou-se areia argilosa, silicato de sódio e água, mantendo-se a mesma proporção.

A casca cerâmica apresentou algumas trincas internas e externas, especialmente na região do massalote, a 200 °C na etapa de retirada da cera. No entanto, após a calcinação, a casca mostrou-se bastante quebradiça, não sendo possível o vazamento de alumínio líquido, conforme mostram as figuras 18 e 19:

Figura 18 Casca cerâmica após a retirada da cera.



Fonte: Própria autora.

Figura 19- Casca cerâmica após a calcinação.



Fonte: Própria autora.

Na terceira tentativa, decidiu-se utilizar três camadas finas compostas por cimento à base de alumina, areia argilosa, silicato de sódio e água, sempre se mantendo as proporções. Já nas quatro camadas grosseiras, usou-se areia argilosa, silicato de sódio e água. Aumentou-se o número de camadas como uma tentativa de obter-se uma casca mais resistente aos choques térmicos e às altas temperaturas.

A peça apresentou trincas tanto internas como externas nas etapas de retirada da cera e calcinação. Não se observou grande diferença em relação ao aparecimento de trincas ou fragilidade da casca entre uma etapa e outra.

Figura 20- Terceira casca cerâmica após a calcinação a 750 °C.



Fonte: Própria autora.

Após a calcinação, o forno foi desligado e a peça esfriou lentamente durante vinte e quatro horas. No dia seguinte, a casca foi aquecida novamente a 300 °C durante trinta minutos para a realização do vazamento no forno de indução do Laboratório. Além disso, a temperatura usada foi de aproximadamente 800° C, ou seja, cerca de 100° C acima do ponto de fusão do Alumínio (660° C), conforme explicado na revisão bibliográfica, a temperatura de vazamento deve ser alta o suficiente para que o metal permaneça líquido o suficiente para preencher todo o molde. O forno utilizado para fundir o alumínio e a peça obtida na terceira tentativa serão mostrados nas figuras 21 e 22, respectivamente.

Figura 21- Forno de indução do Laboratório para a fusão de Alumínio.



Fonte: Própria autora

Figura 22- Peça após a solidificação e a retirada da casca refratária.



Fonte: Própria autora.

Apesar da obtenção de uma casca resistente e de um vazamento bem-sucedido, obteve-se extrema dificuldade para retirar a casca refratária da peça, apesar do uso de escova de aço, faca, água e sabão e de uma micro retífica. Depois, cortou-se o massalote.

Na quarta tentativa, realizou-se uma mistura de areia argilosa, silicato de sódio e água, mantendo-se a proporção dessas substâncias para todas as cinco camadas.

Após a retirada da cera a 200 °C, obteve-se uma casca bastante resistente e com bom acabamento superficial interno, as poucas trincas existentes encontravam-se na parte externa do molde. Já após a calcinação, os resultados foram os mesmos em relação à etapa anterior.

Após a etapa da calcinação, a peça esfriou lentamente no forno durante vinte e quatro horas. No dia seguinte, foi aquecida novamente a 300 °C durante trinta minutos, colocada em uma caixa de areia e o alumínio fundido foi despejado. A casca será mostrada na figura 23.

Figura 23- Casca cerâmica um dia após a calcinação. Uso de flash fotográfico.



Fonte : Própria autora.

Posteriormente, esperou-se a solidificação do metal e removeu-se a casca cerâmica. A quantidade de areia residual foi removida com escova de aço, faca, água e sabão. Percebeu-se maior facilidade para a limpeza da peça, a qual será mostrada na figura 24.

Figura 24- Peça após a limpeza da casca e o corte do massalote.



Fonte: Própria autora.

É possível comparar a hélice acima com a sua versão em cera para explicar alguns defeitos presentes, conforme mostram as figuras 25 e 26.

Figura 25- Peça em cera com o massalote.



Fonte: Própria autora.

Figura 26- Peça em cera vista por outro ângulo.



Fonte: Própria autora.

Portanto, alguns defeitos da peça metálica obtida são provenientes do desgaste do molde de silicone com o uso. Observa-se, conforme a figura acima, que há falta de cera em uma das pás e excesso de cera em algumas regiões. Além disso, a aplicação não uniforme de mistura refratária contribui de modo significativo para alguns desníveis de metal existentes.

Outro ponto a ser destacado foi a dificuldade de vazamento de metal líquido mesmo com o massalote, havendo um pouco de turbulência, a qual pode ser brevemente definida como um estado de escoamento do fluido no qual as variáveis instantâneas exibem flutuações irregulares e aparentemente aleatórias.

6 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento do processo de fundição por cera perdida, bastante utilizado na indústria. Este método permite gerar peças metálicas com um bom acabamento superficial. Houve algumas novidades em relação aos testes realizados anteriormente no Laboratório, como uso de cera orgânica de melhor qualidade, testes com dois tipos de areia, uso do cimento à base de alumina e comparação entre diferentes métodos.

Percebeu-se que a peça feita apenas com areia com alto teor de argila, silicato e água obteve melhor acabamento superficial e maior facilidade de limpeza do molde refratário em relação à peça feita a partir de um molde com cimento à base de alumina nas primeiras camadas. Este fato é de extrema relevância, visto que a areia argilosa possui custo inferior ao do cimento. Portanto, além do fator qualidade, já que as peças necessitam o mínimo possível da utilização de outros processos associados, o método tem um custo acessível.

Notou-se, porém, que essa técnica carece ser desenvolvida e estudada com mais profundidade, visto que, a areia utilizada faz total diferença nas propriedades mecânicas do molde. Além disso, apesar do massalote ter cumprido o seu papel, que é evitar rechupe, houve um pouco de turbulência durante o vazamento e, nos próximos experimentos, uma árvore de fundição deve ser utilizada. Outro fator de extrema importância é não usar moldes de silicone desgastados, fazendo a troca quando apresentarem defeitos, com o objetivo de produzir objetos em cera com melhor acabamento.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a realização desses experimentos e dando continuidade aos trabalhos de conclusão do curso dos colegas Ronaldo Souza (2017) e José Rubson Guimarães (2019), pode-se afirmar que houve inovação no que se refere ao processo de fundição por cera perdida, como o uso de cera orgânica, o banho da peça em cera ao invés do pincelamento, o uso do silicato de sódio como ligante e a introdução de outros tipos de areia. Entretanto, é possível realizar algumas mudanças durante trabalhos futuros, como:

- Utilização de árvore modelo, a qual também é utilizada na indústria para evitar defeitos como turbulência, rechupe, produzindo-se peças com melhor acabamento superficial. Além disso, facilita a produção de peças em maior escala;
- Utilizar peneiras granulométricas mais finas nas duas primeiras camadas para a obtenção de cópias com formato mais próximo da peça em cera;
- Utilizar novos moldes de silicone para a produção de peças em cera de melhor qualidade;
- Estudar a influência do tipo de areia para a obtenção das cascas refratárias, obtendo-se moldes mais resistentes;
- Medir e comparar os coeficientes de dilatação térmica de diferentes tipos de cera, visto que, quanto maior a expansão com o aumento da temperatura, maior a possibilidade de ocorrência de trincas no molde refratário;

8 REFERÊNCIAS

<http://abal.org.br/img-curso-porosidade-em-pecas-fundidas-de-aluminio/> : Acesso em 10 de dezembro de 2019.

Barbosa, Cássio Metais não ferrosos e suas ligas [recurso eletrônico] : microestrutura, propriedades e aplicações / Cássio Barbosa. - 1. ed. - Rio de Janeiro : E-papers, 2014.

BEELEY, Peter. Foundry technology. 2.ed. 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.

http://joinville.ifsc.edu.br/~valterv/Processos_de_Fabricacao/aula%20%20Processo%20de%20Fundicao.pdf : Acesso em 10 de Dezembro de 2019.

Klug, Jeferson Leandro. Notas de aula. UFC, 2017.

http://mmborges.com/processos/Conformacao/cont_html/fundicao.htm : Acesso em 15 de Outubro de 2019.

<https://slideplayer.com.br/slide/9120217/> : Acesso em 04 de Novembro de 2019.

SOARES, G. de A. Fundição: Mercado, Processo e Metalurgia, Editora: UFRJ, 2000.