



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

VINÍCIUS MORAES DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA CASCA CERÂMICA À BASE DE SILICATO DE
SÓDIO E ALUMINA PARA O PROCESSO DE ESPUMA PERDIDA**

FORTALEZA

2023

VINÍCIUS MORAES DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA CASCA CERÂMICA À BASE DE SILICATO DE
SÓDIO E ALUMINA PARA O PROCESSO DE ESPUMA PERDIDA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais do Departamento de Graduação 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

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

O52d Oliveira, Vinícius Moraes de.
Desenvolvimento de uma casca cerâmica à base de silicato de sódio e alumina para o processo de espuma perdida / Vinícius Moraes de Oliveira. – 2023.
43 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Jeferson Leandro Klug.

Coorientação: Prof. Me. Samuel Lucas Santos Medeiros.

1. Fundação. 2. Poliestireno expandido. 3. Alumina. 4. Argila Refratária. I. Título.

CDD 669

VINÍCIUS MORAES DE OLIVEIRA

DESENVOLVIMENTO DE UMA CASCA CERÂMICA PARA PROCESSO DE ESPUMA
PERDIDA EM PEÇAS DE GRANDE COMPLEXIDADE

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

Aprovada em: __/__/__.

BANCA EXAMINADORA

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

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

Profa. Dra. Mariana Monteiro Xavier de Lima
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Valdir e Maria da Conceição.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Jesus, que sem Ele nada do que existe, existiria.

Aos meus pais, Valdir e Maria, aos quais amo muito e me deram todo o sustento financeiro e emocional para realizar esse sonho.

A minha esposa, Ashley, que também amo muito e que esteve comigo durante quase todo o tempo de curso.

Ao Prof. Dr. Jeferson Leandro Klug, pela excelente orientação, apoio e tempo despendido. Ao Técnico de Laboratório Samuel Medeiros, por toda disponibilidade e suporte para o presente trabalho. Ao Prof. Dr. Ricardo Emílio às excelentes aulas ministradas e a todo conhecimento repassado nas mais diversas disciplinas.

Aos professores participantes da banca examinadora pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos colegas da turma de graduação Davi Duarte, Matheus, Bruno Fontenele, José Rubson, Renato, Felipe, Cícero Targino, Paulo Vitor, José Anazildo, Luís Caraúba e Luis Antônio, pela ajuda e companheirismo em toda essa jornada.

Aos colegas de laboratório Leoni Laerth, Heládio, Jeffson e Felipe.

A todos os servidores e professores do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, em especial ao Secretário Antônio, por toda ajuda, paciência e dedicação.

“Escreva algo que valha a pena ler ou faça algo que valha a pena escrever. ” (BENJAMIN FRANKLIN).

RESUMO

O processo de fundição com poliestireno expandido (EPS) é amplamente utilizado na indústria metalúrgica para produzir peças de alta precisão. No entanto, um dos principais desafios deste processo e o objeto de estudo deste trabalho, realizado no Laboratório de Fundição da Universidade Federal do Ceará, é o desenvolvimento de uma cobertura cerâmica capaz de resistir às altas temperaturas envolvidas na fundição e também ter resistência mecânica para não quebrar nem empenar, comparando com o processo de cobertura com argila refratária estudado em um Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) anterior. Nesse sentido, a alumina ou óxido de alumínio é um material promissor nesse sentido, devido às suas propriedades térmicas e mecânicas. O objetivo deste TCC foi desenvolver uma casca à base de alumina para o processo de fundição com poliestireno expandido (isopor). O processo de desenvolvimento envolveu a seleção de alumina com granulometria adequada, a formulação correta da quantidade de óxido com silicato de sódio, a realização de testes de resistência térmica e a otimização da formulação. Os resultados dos testes indicaram que a cobertura desenvolvida apresentou bons resultados, e foi capaz de resistir às altas temperaturas do processo e de copiar, com boa precisão, os detalhes da peça estudada. Além disso, a casca mostrou boa aderência à superfície das peças fundidas e foi fácil de aplicar. Em resumo, o desenvolvimento da cobertura à base de óxido de alumínio foi bem-sucedido e pode ser uma alternativa viável para o processo de fundição por espuma perdida. A cobertura pode ajudar a reduzir custos e melhorar a qualidade das peças fundidas produzidas nesse processo.

Palavras-chave: Fundição; Poliestireno expandido; Alumina; Argila Refratária.

ABSTRACT

The expanded polystyrene (EPS) casting process is widely used in the metallurgical industry to produce high precision parts. However, one of the main challenges of this process and the object of study of this work, carried out at the Foundry Laboratory of the Federal University of Ceará, is the development of a ceramic cover capable of resisting the high temperatures involved in casting and also having mechanical resistance so as not to break or warp, compared to the refractory cover process studied in a previous Capstone Project (CP). In this sense, alumina or aluminum oxide is a promising material in this sense, due to its thermal and mechanical properties. The objective of this CP was to develop an alumina-based shell for the casting process with expanded polystyrene (Styrofoam). The development process involved the selection of alumina with adequate granulometry, the correct formulation of the amount of oxide with sodium silicate, the performance of thermal resistance tests and the optimization of the formulation. The results of the tests indicated that the developed coating showed good results, and was able to resist the high temperatures of the process and to copy, with good precision, the details of the studied piece. In addition, the shell showed good adhesion to the surface of the castings and was easy to apply. In summary, the development of the aluminum oxide-based shell was successful and can be a viable alternative to the lost foam casting process. The coating can help reduce costs and improve the quality of castings produced in this process.

Keywords: Casting; Expanded polystyrene; Alumina; Refractory clay.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Peça para motor naval	31
Figura 2	Representação de um processo de fundição por espuma perdida	32
Figura 3	– Representação esquemática de defeitos em fundição	34
Figura 4	– Representação esquemática de defeitos em fundição que geralmente ocorrem em moldes de areia	34
Figura 5	– Modelo em EPS feito mecanicamente	38
Figura 6	– Molde em EPS artesanal	39
Figura 7	– Modelo sendo criado em programa computacional AdStudio - Engraving Machine Control System – EMCS	39
Figura 8	– Fabricação do modelo EPS em fresadora CNC	39
Figura 9	– Fresadora CNC do LEAU	40
Figura 10	– Materiais da casca sendo pesados em balança	40
Figura 11	– Molde sob a areia e representação do canal de vazamento	42
Figura 12	– Rechupe	42
Figura 13	– Forno Mufla	43
Figura 14	– Resfriamento em água	44
Figura 15	– Limpeza	44
Figura 16	– Esmerilhamento	45
Figura 17	– Polimento	45
Figura 18	– Molde em argila refratária	46
Figura 19	– Modelo em fresa CNC coberto com casca cerâmica	46
Figura 20	– Modelo em EPS feito artesanalmente	47
Figura 21	– Modelos artesanais cobertos com casca cerâmica	47
Figura 22	– Primeiro molde	49

Figura 23 – Molde e peça artesanal com uma camada de material cerâmico	50
Figura 24 – Peça feita com cobertura de argila refratária	51
Figura 25 – Molde e peça feito em fresa CNC	52
Figura 26 – Molde e modelo produzido em laser no LEAU	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pontos de fusão para alguns metais	23
Tabela 2 – Quadro comparativo entre as duas coberturas estudadas	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNC	Controle Numérico Computadorizado
LaF	Laboratório de Fundição
UFC	Universidade Federal do Ceará
ISGEC	Indian Sugar and General Engineering Corporation
LTD	Limitada
Ed.	Edição
LEAU	Laboratório de Arquitetura e Urbanismo
DAUD	Departamento de Arquitetura e Urbanismo e de Design
EPS	Poliestireno Expandido
EMCS	Engraving Machine Control System

LISTA DE SÍMBOLOS

ton	Tonelada
%	Porcentagem
°C	Graus Celcius
cm	Centímetros
g	Gramas
cm ³	Centímetros Cúbicos
W	Whatts
h	Horas
mm	Milímetros
®	Marca Registrada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Princípios da Fundição	17
2.2	Vantagens e desvantagens	17
2.3	Método do Poliestireno Expandido	18
2.4	Imperfeições em Peças Fundidas	19
3	METODOLOGIA	24
3.1	Materiais utilizados	24
3.2	Métodos	24
3.2.1	<i>Fabricação do molde em EPS</i>	25
3.2.2	<i>Fabricação da casca cerâmica</i>	27
3.2.3	<i>Aplicação da casca cerâmica</i>	28
3.2.4	<i>Medição do volume do molde</i>	28
3.2.5	<i>Secagem</i>	28
3.2.6	<i>Confecção do modelo</i>	28
3.2.7	<i>Fusão da liga de alumínio e Resfriamento</i>	30
3.2.8	<i>Limpeza</i>	31
3.2.9	<i>Fabricação da cobertura refratária</i>	32
3.2.10	<i>Corpos de prova</i>	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1	Exemplar artesanal coberto com duas camadas de casca cerâmica de alumina	35
	35
4.2	Exemplar artesanal coberto com apenas uma camada de casca cerâmica de alumina	36
4.3	Modelo produzido em argila refratária	37
4.4	Modelo produzido em fresadora CNC	38
4.5	Modelo produzido a laser	39
5	CONCLUSÃO	42
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho visa mostrar o quanto o processo de fundição por espuma perdida é eficiente, podendo ser utilizado tanto para peças de menores proporções tanto para peças de maiores proporções e detalhes. Além de espuma-perdida o processo também pode ser chamado de modelo-perdido ou espuma evaporável, tendo pouca ou nenhuma diferença entre eles. As principais vantagens do processo vão desde não haver necessidade de desenhar o molde, pouca usinagem final e até o fato de produzir peças extragrandes e complexas.

Dentre os vários processos de fundição existentes, dois grandes campos se destacam e a escolha correta do processo é fundamental na definição de alguns aspectos, tais como: do grau de precisão dimensional, do acabamento e das propriedades mecânicas da peça a ser fabricada. Os processos são molde perecível, por exemplo: areia verde, cura a frio e cera, e molde permanente, por exemplo: por pressão e por gravidade.

O trabalho foi realizado no Laboratório de Fundição (LaF) da Universidade Federal do Ceará (UFC), através de exaustivos ensaios, testando inúmeras composições para a casca e vários modelos de moldes, um dos principais problemas encontrados foi a questão da cola entre as letras e a base, pois essa não conseguiu “segurar” bem as letras, as mesmas desgrudavam, sendo assim, foi colocado um peso em cima para sustentá-las, outra dificuldade percebida foi o fato de o metal esfriar-se muito rápido, pelo fato de ser uma peça de maiores proporções e detalhes, o material não conseguia “copiar” todos os detalhes do molde, pois o alumínio resfriava-se precocemente, além disso, devido à própria morfologia do isopor, onde há muitos vazios, a peça final apresentou muitos defeitos, defeitos estes que serão explicados posteriormente. Como também fazer uma comparação entre um processo estudado anteriormente no próprio LaF que é o de cobertura por argila refratária que também pode ser usado em fundição de espuma evaporável, mas este último apresentou muito empenamento, rebarbas e erosão por lavagem, situações que não foram evidenciadas ou foram, mas com um grau bem menor de aparecimento com relação ao de casca cerâmica de alumina.

Diante dessa temática, o objetivo geral que orienta este trabalho consiste em: compreender a construção de uma casca cerâmica que possa resistir às altas temperaturas do alumínio fundido e que possa replicar o formato e detalhes da peça em questão, que no caso é de isopor. Além disso, estudar um método que seja eficaz para trabalhos de alta complexidade e detalhamento.

Sabendo que a casca é formada por dois componentes: óxido de alumínio (Al_2O_3) 100 mesh (malha em inglês) e silicato de sódio (Na_2SiO_3), foram aplicadas uma ou duas camadas com a mesma constituição, para cada parte de alumina, 1/3 de silicato de sódio foi adicionado.

Para permitir uma compreensão mais ampla, buscou-se: investigar a melhor constituição para a casca cerâmica e estudar o método de fundição com poliestireno expandido para peças complexas. Vale ressaltar que tanto alumina quanto a argila refratária são materiais cerâmicos, mas no presente trabalho a cobertura de alumina foi chamada de casca cerâmica e a de argila refratária foi chamada de cobertura de argila refratária.

O resultado final mostrou que as peças cobertas com alumina apresentaram melhores resultados do que as cobertas com argila refratária, apresentando peças com melhor qualidade no geral. Foi estudado, ainda, moldes feitos em máquinas; em fresadora e a laser, verificou-se que os modelos confeccionados mecanicamente, tanto em fresadora quanto a laser obtiveram os melhores resultados, pois foi feito em uma peça maciça, ou seja, sem a necessidade de se colocar algo para unir as partes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Princípios da Fundição

O processo de Fundição se baseia na elevação da temperatura de certo material, no caso desse estudo, de metais, a tal ponto que chegue ao estado líquido, podendo ser conformado e moldado de tal maneira que o fabricante coloque a forma e tamanho que desejar. Através da força da gravidade o líquido flui pelas partes internas do molde e toma a forma dele. Segundo GROOVER (2014) a fundição é um dos processos mais antigos de fabricação, remontando a 6000 mil anos atrás.

Existem dois tipos de processos dentro da fundição, o intermediário para a produção de lingotes, onde posteriormente haverá uma conformação por laminação ou forjamento do mesmo, para atingir a forma final, e a fundição de peças, onde por esse processo o componente já atinge sua configuração definitiva. O presente trabalho se atentará a estudar com mais detalhes esse último.

2.2 Vantagens e desvantagens

Segundo Groover (2014) a fundição é usada para produzir peças com formatação e geometrias mais detalhadas e complexas, tanto para a parte interna quanto para a externa, alguns processos de fundição podem produzir unidades já com a formatação final (*net shape*), onde nenhuma finalização é necessária, já para o processo *near net shape* a geometria da peça terá que passar por um processo para acabamento final, geralmente usinagem. Uma outra vantagem é a possibilidade de produzir peças de grande dimensão, com pesos superiores a 100 ton. O processo de fundição pode ser aplicado a qualquer metal, mas no processo de espuma perdida, poderá ser utilizado apenas alumínio, ligas de alumínio ou ferro fundido. Como desvantagens podemos citar o fato de existência de porosidades ao final do processo, baixa precisão dimensional, onde o fundido pode ter dimensões maiores ou menores do que o molde inicial, podendo apresentar problemas quanto ao acabamento superficial e também riscos quanto ao manuseio do metal em estado líquido, devido as altas temperaturas.

Na figura 1, é possível observar uma grande peça de motor naval feito por fundição, mostrando que o método funciona para modelos de grandes proporções, também é possível

inferir que foi necessário pouco acabamento final para o exemplar atingir seu objetivo de uso, apenas algumas partes passaram por polimento e usinagem.

Figura 1: Peça para motor naval



Fonte: (ISGEC – Heavy Engineering LTD)

2.3 Método do Poliestireno Expandido

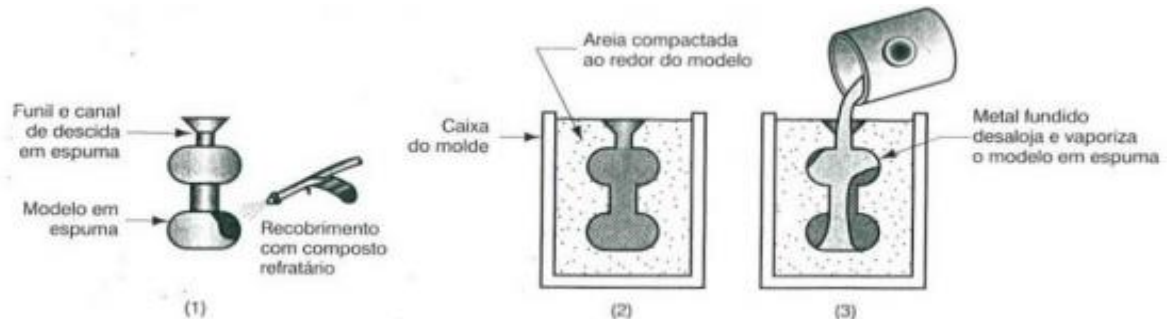
O processo de Fundição por Poliestireno Expandido tem como princípio básico a evaporação do isopor ao ter contato com o alumínio ou liga de alumínio fundido ($650\text{ }^{\circ}\text{C}$), pois sua constituição é basicamente de 98% de ar.

...usa um molde com areia compactada ao redor de um modelo em espuma de poliestireno... O processo e suas variações são conhecidos por diversos outros nomes, incluindo processo espuma-perdida, processo modelo-perdido, fundição com espuma evaporável e molde cheio (este último é uma marca comercial). O modelo em espuma inclui o canal de descida, massalotes e o sistema de canais, e pode também conter machos internos (se necessário), eliminando, assim, a necessidade de se produzir um macho separadamente... O modelo é em geral recoberto com um composto refratário para garantir uma superfície lisa a fim de melhorar sua resistência a altas temperaturas. As areias de moldagem usualmente incluem elementos aglomerantes. No entanto, areia-seca é usada em determinados processos desse grupo, o que facilita sua recuperação. (GROOVER, 2014)

Uma grande vantagem do processo reside no fato da facilidade de se produzir a casca, o modelo não precisar ser retirado do molde pois a casca é destruída, facilitando a desmoldagem. Segundo Groover (2014) o método estudado tem embutido em si algumas etapas do processo de fundição em comparação, por exemplo, ao método em areia-verde, não

precisando de duas metades com igual tamanho e formato, não precisa também de tolerância para ângulos de saída, nem de machos, nem de canais e nem de adição de massalotes.

Figura 2 – Representação de um processo de fundição por espuma perdida



Fonte: Mikell P.Groover (2010)

A figura mostra etapas do processo de fundição por espuma perdida, na primeira parte tem-se o molde em isopor mostrando o funil e canal de vazamento como também o revestimento sendo feito por jateamento, que é uma das maneiras de se fazer a colocação da cobertura cerâmica, no presente trabalho foi utilizado o pincelamento. Na segunda parte vê-se a presença do receptáculo da areia, esta tem que ser compactada e peneirada para melhores resultados. Por fim a última imagem mostra a descida do metal fundido e ocupando os espaços vazios do isopor que foi evaporado.

Vale salientar que a etapa mais importante é a da feitura do revestimento, visto que é através dele que se chegará a um bom acabamento da peça, ele tem que ser fino, permitindo a saída dos gases com facilidade e uniforme para copiar bem todos os detalhes do modelo seja ele de que material for (Soares, 2000).

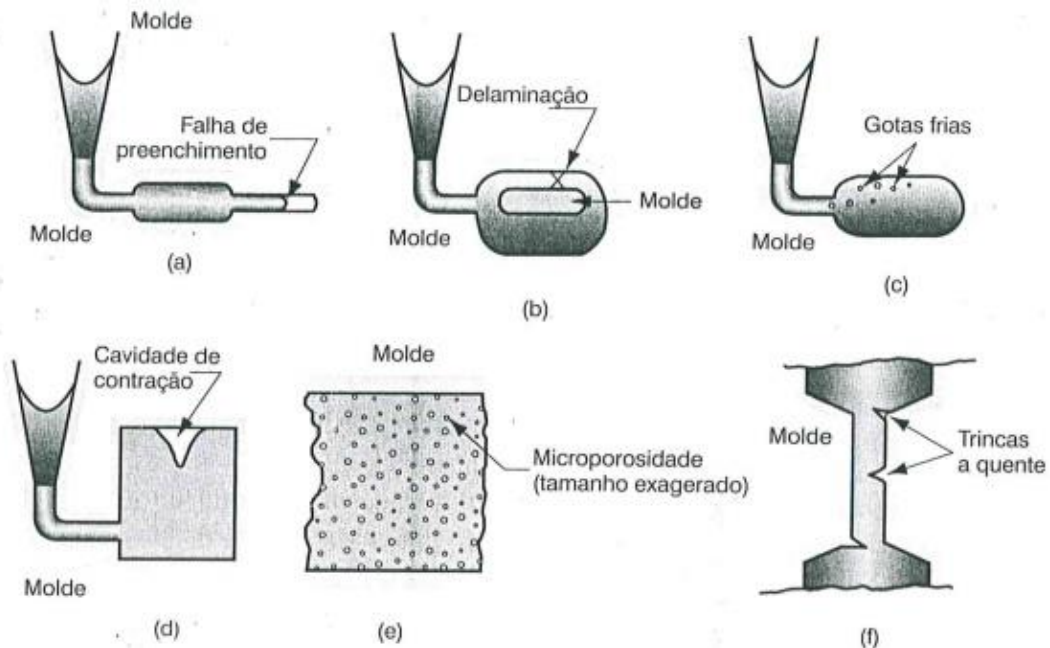
2.4 Imperfeições em Peças Fundidas

No decorrer do processo de fundição, existem muitas formas de surgirem imperfeições e defeitos na peça definitiva, segue uma lista das mais comuns e também figuras que explicam e exemplificam tais ocorrências.

- (a) **Falha de preenchimento** aparece em fundidos que solidificam antes de a cavidade do molde estar totalmente preenchida. As causas típicas incluem: (1) fluidez do metal fundido insuficiente, (2) temperatura de vazamento muito baixa, (3) vazamento feito de forma muito lenta, e/ou (4) seção transversal do fundido muito fina.

- (b) **Delaminação** ocorre quando duas porções do metal fluem juntas, mas falta fusão das duas frentes devido à solidificação prematura. As causas são similares às de falha de preenchimento.
- (c) **Gotas frias** resultam do respingo 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 que evite os respingos podem evitar esse defeito.
- (d) **Cavidade de contração** é a depressão na superfície ou um vazio interno no fundido, causado pela contração de solidificação que restringe a quantidade de metal fundido disponível na última região a se solidificar. Geralmente é formado próximo à superfície do fundido e, nesse caso, é denominado “rechupe”[...] O problema pode ser na maior parte das vezes resolvido pelo projeto de um massalote adequado.
- (e) **Microporosidade** consiste numa rede de pequenos vazios distribuídos por todo o fundido, causada pela contração que ocorre no fim da solidificação do metal nos espaços entre a estrutura dendrítica. Esse defeito é usualmente associado a ligas, por causa da forma pela qual a solidificação ocorre nesses metais, que apresentam tendência à larga diferença entre as temperaturas líquido e sólido.
- (f) **Ruptura a quente**, também chamada de trinca a quente, ocorre quando nos estágios finais da solidificação ou nos primeiros estágios do resfriamento, a contração do fundido é restringida devido ao molde ser pouco deformável. O defeito se manifesta pela separação (daí vem o termo ruptura e trinca) no ponto de elevada tensão de tração, causada pela impossibilidade de o metal contrair naturalmente. Na fundição em areia e outros processos de fundição com moldes perecíveis, o defeito é evitado pela escolha de um molde com propriedade de colapsibilidade. Nos processos com moldes permanentes, a ruptura a quente é reduzida removendo a peça do molde imediatamente após a solidificação (GROOVER, 2014, p.136 e 137).

Figura 3 – Representação esquemática de defeitos em fundição



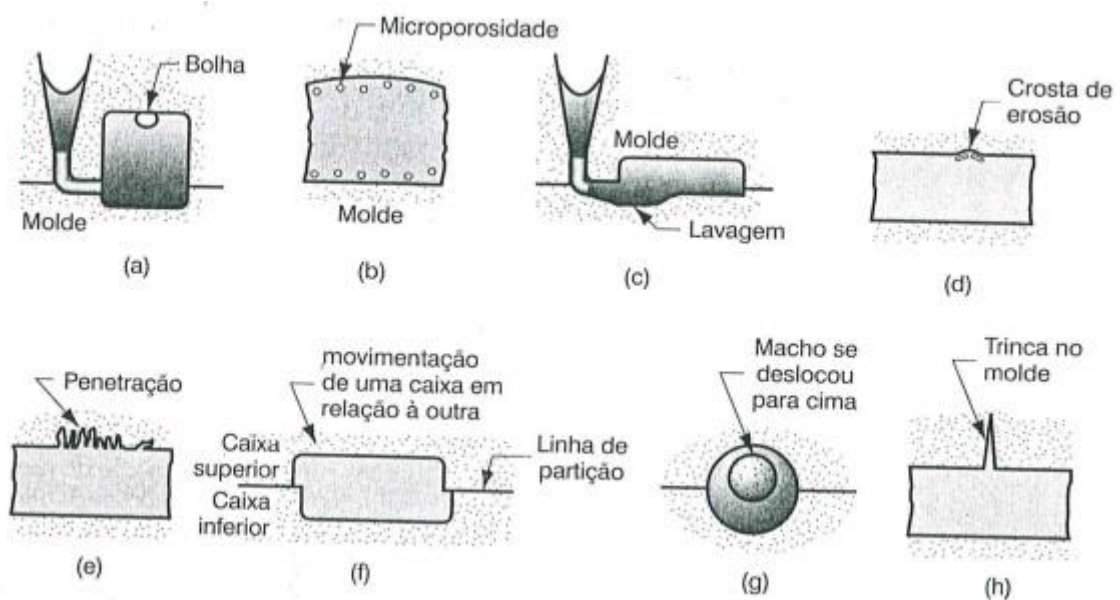
Fonte: Mikell P.Groover (2014)

Segundo Groover (2014) há também defeitos que ocorrem prioritariamente em moldes de areia, mas ocorrem em menor número em outros tipos de processos, são eles:

- (a) **Bolha** é um defeito que consiste numa cavidade de gás com a forma de um balão, causada pela liberação de gases do molde durante o vazamento. Ela ocorre na superfície do fundido, ou pouco abaixo, próximo do topo da peça. Baixa permeabilidade, ventilação insatisfatória e elevada umidade na areia do molde são as causas usuais.
- (b) **Microporosidade**, também causada pela liberação de gases durante o vazamento, consiste em diversas e pequenas cavidades formadas na superfície da peça, ou logo abaixo dela.
- (c) **Erosão por lavagem** é uma irregularidade na superfície do fundido que resulta da erosão da areia do molde durante o vazamento, e o contorno da erosão será produzido na superfície da peça.
- (d) **Crosta de erosão** são áreas rugosas na superfície do fundido devido a incrustações de areia e metal. Elas são causadas por pequenas porções da superfície do molde que se descamam durante a solidificação e ficam entranhadas na superfície da peça.
- (e) **Penetração** é um defeito superficial que ocorre quando a fluidez do metal líquido é alta, penetrando no molde ou no macho em areia. Durante a solidificação, a superfície do fundido consiste numa mistura de grãos de areia e metal. Maior compactação do molde de areia ajuda a reduzir esse defeito.

- (f) **Deslocamento do molde** se refere ao defeito causado pela movimentação da parte superior do molde em relação à parte inferior; o resultado é um degrau no fundido na altura da linha de partição.
- (g) **Deslocamento do macho** é similar ao deslocamento do molde, mas é o macho que se movimenta, e o deslocamento é geralmente vertical. O deslocamento é causado pela tendência do metal de movimentar o macho, dada a sua massa específica ser menor que a do metal.
- (h) **Trinca no molde** ocorre quando a resistência mecânica do molde é insuficiente e uma trinca se desenvolve, na qual o metal líquido pode penetrar para formar um “apêndice” na peça final (GROOVER, 2014, p.137 e 138).

Figura 4 – Representação esquemática de defeitos em fundição que geralmente ocorrem em moldes de areia



Fonte: Mikell P.Groover (2014)

A tabela 1 mostra os valores de alguns pontos de fusão para metais puros, o alumínio é um metal de baixa densidade, boa maleabilidade e fluidez, ideia para ser utilizado no processo de fundição por espuma perdida.

Tabela 1 - Pontos de fusão para alguns metais

<i>Metal</i>	<i>Pontos de Fusão em graus Celsius</i>
<i>Ferro</i>	1535
<i>Niquel</i>	1453
<i>Cobre</i>	1083
<i>Alumínio</i>	660
<i>Magnésio</i>	649
<i>Zinco</i>	420
<i>Chumbo</i>	327
<i>Estanho</i>	232

Fonte: Próprio autor (2023).

3 METODOLOGIA

Com o arcabouço adquirido na literatura e também com os conhecimentos adquiridos na disciplina de Fundição, deu-se início à parte prática, conduzido no interior do Laboratório de Fundição (LaF) como também no Laboratório de Arquitetura e Urbanismo (LEAU) no interior do Departamento de Arquitetura e Urbanismo e de Design (DAUD), localizados na Universidade Federal do Ceará (UFC).

O presente trabalho visa a obtenção de peças com um teor de dificuldade e detalhes maiores do que os já realizados no Laboratório de Fundição, como também testar o processo de fundição em EPS com uma cobertura cerâmica em comparação ao que foi estudado anteriormente com argila refratária. O trabalho também tem como objetivo auxiliar os alunos e profissionais das mais diversas áreas, em especial aos alunos do curso de engenharia metalúrgica no decorrer da cadeira de Fundição.

3.1 Materiais utilizados

Os materiais empregados no experimento foram todos fornecidos pelo Laboratório de Fundição, sendo eles: Alumina (Óxido de Alumínio – Al_2O_3) 100 mesh, Silicato de Sódio Neutro (Na_2SiO_3), Argila Refratária ($Al_2O_3 + SiO_2$) e água. O silicato atua como ligante e o óxido de alumínio como refratário para resistir às altas temperaturas do alumínio líquido do processo e para que o mesmo não entre em contato com a areia compactada ao redor do molde.

Outro material utilizado foi o poliestireno expandido, que foi utilizado na confecção do molde perecível, o material em questão tem a capacidade de evaporar durante o processo e tem em sua constituição 2% de poliestireno (C_8H_8)_x e 98% de ar.

Ainda foi utilizado areia de construção peneirada e pedaços de sucata de bloco de motor em alumínio.

3.2 Métodos

Foram confeccionados alguns modelos, um na fresadora CNC (Controle Numérico Computadorizado), um a laser e três manualmente, quatro cobertos com cerâmica refratária e um de argila refratária, as principais avaliações feitas foram com relação a obtenção de uma peça que replicasse a máxima similaridade com o modelo original e qual material da casca seria melhor; argila refratária ou casca cerâmica.

Foram analisados alguns parâmetros, tais como: qual modelo conseguiu atingir o melhor acabamento e quantas camadas de refratário foram suficientes para o sucesso da técnica.

O processo dá-se início com a feitura do molde, com geometria e material específicos, em seguida é feita a aplicação do refratário com tempo de secagem de 24 h entre as camadas ou lados, pois o material ainda úmido não adere bem ao isopor, caso não seja respeitado esse intervalo de tempo a cobertura tende a se separar do molde com muita facilidade. Finalizada a confecção do molde, o metal líquido é levado a temperaturas em torno de 750 °C e então vazado por sobre o molde. O experimento é finalizado com a retirada da casca cerâmica, esmerilhamento, limpeza e inspeção visual da mesma.

Figura 5 – Modelo em EPS feito mecanicamente



Fonte: Próprio autor (2023).

3.2.1 Fabricação do molde em EPS

Inicialmente foram feitos 3 moldes de EPS de aproximadamente 13 cm de comprimento por 6 cm de altura por 1 cm de profundidade, a figura 6 mostra um exemplo de um deles. As letras foram cuidadosamente cortadas e coladas com pequenos pingos de cola de isopor, é importante se colocar o mínimo de cola possível para não atrapalhar no caminho em que o metal líquido vai percorrer.

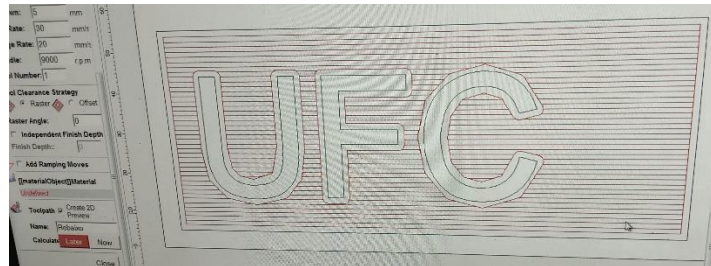
Em seguida foi feito um protótipo todo maciço em uma fresadora, para analisar como seria o resultado sem a presença de cola para união da base com as letras.

Figura 6 – Molde em EPS artesanal



Fonte: Próprio autor (2023).

Figura 7 – Modelo sendo criado em programa computacional AdStudio - Engraving Machine Control System – EMCS.



Fonte: Próprio autor (2023).

Figura 8 – Fabricação do modelo EPS em fresadora CNC



Fonte: Próprio autor (2023).

Figura 9 – Fresadora CNC do LEAU

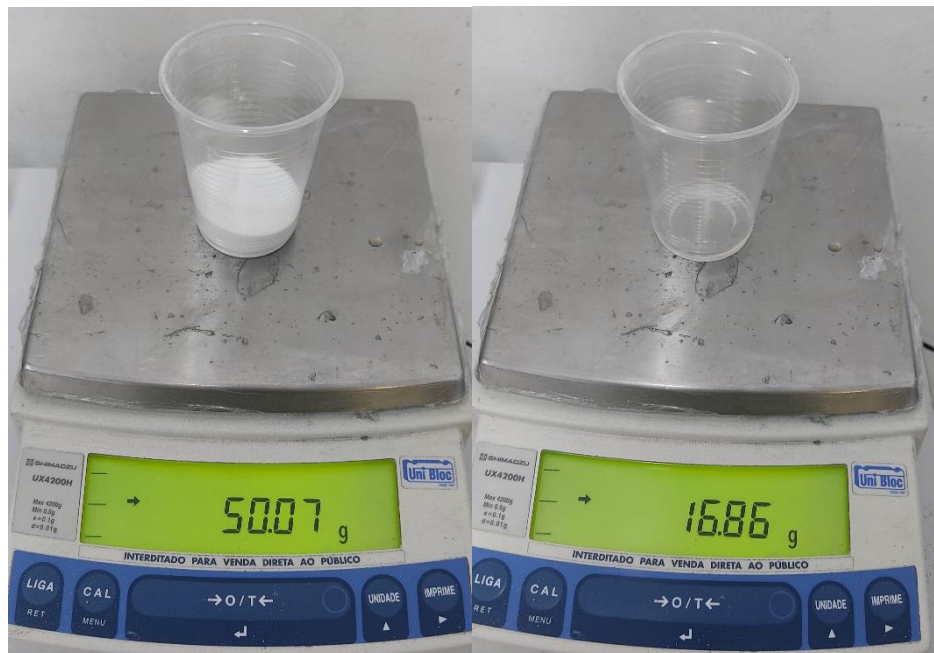


Fonte: próprio autor (2023).

3.2.2 *Fabricação da casca cerâmica*

Inicialmente pesa-se a massa de alumina 100 mesh e logo após o silicato de sódio neutro, a proporção é de 100 g de alumina para 33 g de silicato, para algumas partes da cobertura, utilizou-se frações dessa medida. Para alguns experimentos utilizou-se duas camadas e para outros apenas uma camada, tendo mostrado boa eficiência em ambos.

Figura 10 – Materiais da casca sendo pesados em balança



Fonte: Próprio autor (2023).

3.2.3 Aplicação da casca cerâmica

Para a deposição do material refratário sobre o molde utilizou-se o pincelamento, sendo aplicado com maior cuidado ao redor das letras e também nos cantos vivos para conseguir um bom acabamento superficial e boa similaridade com a peça base.

É válido salientar que as camadas têm que estar bem compactas, para isso pode se aplicar uma força com os dedos (sempre com o auxílio de luvas) ou com espátula, para que não sejam gerados trincas ou canais por onde o metal líquido possa escorrer.

Apenas a parte superior do molde é deixada sem cobertura, pois é por lá que o metal será despejado.

3.2.4 Medição do volume do molde

É importante sempre calcular o volume do molde, pois é através dele que será medido o volume de alumínio necessário para cobrir toda a peça, é de suma importância esse cálculo pois se a quantidade de metal líquido não for o suficiente para preencher todas as cavidades do molde o experimento terá sido falho, e um novo processo terá que ser iniciado do zero.

Neste trabalho buscou-se a maior similaridade possível entre os exemplares, em geral tiveram 13 cm x 6 cm x 1 cm, gerando um volume de 78 cm³.

3.2.5 Secagem

Como já foi abordado anteriormente, o tempo mínimo necessário para secagem total do molde ou de parte dele é de 24 h, o CO₂ do ar auxilia nesse quesito, pois reage com o silicato de sódio presente na mesma.

3.2.6 Confeção do modelo

Com os moldes prontos, dá-se início ao processo final, que é o de vazamento do metal líquido, onde o molde é colocado dentro de um balde ou recipiente de metal com areia peneirada em volta e bem compactada (figura 11), deve-se deixar uma região próxima ao canal de vazamento rebaixada como uma espécie de “vulcão” para facilitar a descida do metal, como mostrado na figura. A região também precisa ser levemente umedecida para o metal não

penetrar a areia. Depois de despejado o fundido a força da gravidade ajuda a preencher as cavidades internas do molde e evaporar o isopor. O canal de vazamento também é importante pois é nele onde fica localizado o “rechupe” (figura 12), região que se contrai quando o fundido se solidifica, se não existisse, a peça poderia ficar defeituosa ou com vazios, segundo Klug (2021).

Figura 11 – Molde sob a areia e representação do canal de vazamento



Fonte: Próprio autor (2023)

Figura 12 - Rechupe



Fonte: Neto (2019)

3.2.7 Fusão da liga de alumínio e Resfriamento

A liga de alumínio-zinco utilizada no experimento veio proveniente de sucata de bloco de motor, foi fundida no forno mufla presente no Laboratório de Fundição a aproximadamente 750 °C. O metal foi vazado com bastante cuidado, retirando o óxido de alumínio que fica sobrenadando o banho. Finalizada essa etapa esperou-se em torno de 15 minutos para resfriamento ao ar e depois foi colocado em água corrente.

Figura 13 – Forno Mufla



Fonte: Próprio autor (2023)

Figura 14 – Resfriamento em água



Fonte: Próprio autor (2023)

3.2.8 Limpeza

Após o resfriamento, a peça passa pela etapa de desmoldagem, foi utilizado primeiramente um martelo simples (figura 15) para quebrar a casca cerâmica, um motoesmeril (figura 16) da marca QUALIFORTE-300W para retirar a parte mais grosseira da mesma e para finalizar foi usada uma mini retífica da marca Dremel (figura 17), extraindo a sobra de material refratário que ficou retido na peça.

Figura 15 – Limpeza



Fonte: Próprio autor (2023)

Figura 16 - Esmerilhamento



Fonte: próprio autor (2023)

Figura 17 - Polimento



Fonte: Próprio autor (2023)

3.2.9 Fabricação da cobertura refratária

De acordo com VAZ FILHO (2021), a composição dessa camada refratária constitui-se de 97% de argila refratária e 3% de silicato de sódio neutro, com uma quantidade de 20 g de água a cada 100 g do total. A aplicação é feita manualmente por pincelamento e tempo de secagem de 24 h. Como se vê na figura 18.

Figura 18 – Molde em argila refratária



Fonte: Próprio autor (2023)

3.2.10 Corpos de prova

Esses procedimentos foram repetidos algumas vezes, dois com duas camadas de cobertura cerâmica (figura 21) e outros dois com apenas uma camada (figura 19). A peça que foi feita na fresa CNC recebeu apenas uma camada, todas apresentando bons resultados. Ainda foi feito uma peça recoberta por argila refratária, não apresentando bons resultados, o que será estudado posteriormente.

Figura 19 – Modelo em fresa CNC coberto com casca cerâmica



Fonte: Próprio autor (2023)

Figura 20 – Modelo em EPS feito artesanalmente



Fonte: Próprio autor (2023)

Figura 21 – Modelos artesanais cobertos com casca cerâmica



Fonte: Próprio autor (2023)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o fundido ser vazado e a peça ser resfriada e limpa, parte-se para a análise do modelo, verificando-se se o projeto teve êxito ou não. A princípio vale salientar que o isopor é um material que possui muitos vazios e muitas imperfeições, mas até nisso pode-se ver êxito, já que uma das principais análises recai na questão da boa cópia do molde com relação ao modelo final.

4.1 Exemplar artesanal coberto com duas camadas de casca cerâmica de alumina

O exemplar em questão (figura 22), foi cortado com um estilete bem afiado, assim como suas letras, as partes arredondadas foram as que exigiram maior precisão e cuidado. A

peça final obteve um resultado satisfatório, mas houve uma pequena dificuldade para o alumínio fluir pelas letras, apresentando gotas frias e falta de penetração em algumas letras, em especial a letra “F”. É provável que resquícios de cola tenham ficado presas e dificultado uma melhor penetração do fundido e também na peça final houve a presença de resquícios da casca, devido aos poros que existiam no próprio molde de EPS, sendo esses de difícil remoção.

É possível que pela espessa camada de material cerâmico os gases não tenham conseguido se dissipar bem pelas paredes da casca, ficando retido e gerando bolhas, delaminação e falta de preenchimento.

Pode-se ver que não houve a existência de “barriga” ou rebarbas, mostrando a boa resistência da casca para o processo e que a mesma “segurou” o metal em seu interior, não deixando o mesmo escapar do molde.

Também foi possível aferir que o modelo respeitou o formato da peça, as laterais ficaram bem preservadas e a maioria das letras bem definidas.

Quanto ao revestimento cerâmico, ele apresentou ótima aderência à peça pós-fundição e boa resistência mecânica, não existindo esfrelamento ou desprendimento de pedaços e nem amassamento, mesmo exercendo leve pressão sobre a casca com os dedos, sendo assim, não ocorreu vazamento de metal, rebarbas ou penetração na areia.

A dureza da cobertura também foi importante pois evitou o empenamento da peça, esse verificado no modelo que foi coberto com argila, principalmente com moldes de maior dimensão.

Uma outra característica importante para um revestimento do tipo que vem sendo estudado nesse TCC, é a necessidade de ele ser facilmente removido. A prática mostrou que ele é retirado com bastante facilidade na região onde não existem letras, nas “costas” do modelo. Já a parte da frente, apresentou uma maior resistência à remoção, muito por causa das letras, que de alguma maneira conseguem “segurar” o refratário, sendo exigido mais de uma etapa nesse processo. Teria que se desenvolver uma forma melhor para que a casca pudesse ser removida com apenas uma etapa, jateada com areia, por exemplo.

Figura 22 – Molde e peça artesanal com duas camadas de cerâmico



Fonte: Próprio autor (2023)

4.2 Exemplo artesanal coberto com apenas uma camada de casca cerâmica de alumina

O modelo da figura 23 apresentou, como pontos positivos, boa definição das letras, laterais bem definidas e ótima cópia do molde original, como aspectos negativos, pode-se citar o fato da letra “U” ter apresentado falta de preenchimento, devido principalmente a proximidade com o massalote, região onde há a presença de muitos gases e possivelmente a areia do massalote estava muito úmida. A letra “F” apresentou delaminação que é uma região onde duas frentes de fundido se encontram e não conseguem se unir, devido principalmente ao resfriamento do metal.

Os demais defeitos já estavam presentes no molde de isopor, que, como já foi dito, naturalmente apresentam defeitos pela união defeituosa de suas células de estireno.

Pelo fato de se aplicar apenas uma camada de alumina, a peça conseguiu liberar melhor os gases provenientes do fundido, não apresentando bolhas

Figura 23 – Molde e peça artesanal com uma camada de material cerâmico



Fonte: Próprio autor (2023)

4.3 Modelo produzido em argila refratária

A peça apresentada na figura 24 foi feita com a cobertura de argila refratária, nela pode-se constatar que houve na “letra F” uma fuga de fluido, o material refratário não conseguiu bloquear o fluxo de alumínio líquido, defeito comumente chamado de “barriga” ou “rebarba”, ocorreu fuga de metal também na letra “C”. Falta de preenchimento na região compreendida entre as letras “U” e “F”. Esta última também apresentou deformidades em sua morfologia, a parte de cima decaiu e a de baixo se elevou um pouco, é possível que na colocação da cobertura houve um manuseio incorreto, aplicando-se força excessiva ou ainda, a cola que foi colocado para unir a letra à base tenha sido posta em quantidade insuficiente.

No contorno externo da peça houve a presença de muita rebarba e também muitos empenamentos, pouca exatidão nas partes que anteriormente eram retas não respeitando a formatação inicial.

Houve a presença de muitas rachaduras na cobertura em questão, fato evidenciado pelo aparecimento de muitos veios e linhas que não existiam no molde, a letra “C” e a letra “U” mostram bem esse fato, prejudicando muito o resultado final.

Como diagnóstico positivo, pode-se citar o fato de as letras conseguirem manter uma morfologia satisfatória, ainda que sem tanta definição e a pouca presença de região com falta de penetração, já que, pelo fato de haver muitas rachaduras, o modelo conseguiu “respirar” bem e expelir seus gases pela parede refratária.

Figura 24 – Peça feita com cobertura de argila refratária



Fonte: Próprio autor (2023)

4.4 Modelo produzido em fresadora CNC

O modelo da figura 25 foi construído através do programa de computador NcStudio AD®. Engraving Machine Control System (EMCS), possui 13 cm de comprimento e foi feito com broca de 3 mm.

As letras foram desenhadas com uma largura um pouco menor e uma altura maior do que as anteriores, era de se esperar que tivessem menos penetração nas mesmas, mas não foi isso que ocorreu, a peça copiou muito bem as características iniciais do molde, as células de poliestireno foram bem preservadas, como também alguns defeitos da peça de isopor, como na letra “U” que apresentou uma pequena descontinuidade e orifícios em sua ponta esquerda e também em sua base no canto direito, ambos defeitos já provenientes do molde. Um defeito não esperado foi a presença de bolhas na letra “F”, houve uma falta de preenchimento, provavelmente gerado pelo resfriamento prematuro do fundido ou porosidade devido a presença de gases retidos no interior da peça. A letra “C” apresentou um ótimo aspecto visual e um bom preenchimento, copiando quase que fielmente as características iniciais.

Constata-se assim, que o uso de “colas” e outros materiais utilizados para unir o EPS em projetos de fundição por espuma perdem consideravelmente o resultado final. Constata-se também que o ideal é que se aplique apenas uma camada de casca cerâmica, pois o ideal é que ela seja fina para que haja a liberação dos gases durante o vazamento do metal líquido, a diminuição de material refratário, especialmente a alumina, também é importante, visto que economicamente se torna mais viável, pois é um insumo que possui um valor financeiramente alto comparado à argila refratária.

Figura 25 – Molde e peça feito em fresa CNC



Fonte: Próprio autor (2023)

4.5 Modelo produzido a laser

Uma última unidade, de tamanho reduzido, em torno de 4 cm, agora produzida pelo processo de laser no laboratório de Arquitetura e Urbanismo, apresentou ótimos resultados no que diz respeito a copiar as características iniciais.

A peça respeitou muito bem a sua morfologia inicial, as letras ficaram bem definidas e a base apresentou vazios que já existiam no molde.

Os defeitos presentes em sua base foram provenientes do laser, como o EPS apresenta muitos vazios o laser penetrou de maneira desigual na mesma. O laser da figura que apresenta o molde de isopor foi confeccionado com a metade da potência utilizada pelo laser da figura da peça final, mas o resultado esperado não foi o esperado, os raios penetraram o isopor de uma forma muito mais agressiva. É necessário que se façam mais testes com potências diferentes, para que se obtenham melhores resultados.

Devido a rápida contração do alumínio, a peça apresentou alguns vazios na base das letras, é possível que, fazendo um pré-aquecimento na caixa de areia ou deixando-a resfriar naturalmente por mais tempo, essas contrações internas possam ser diminuídas.

É importante que haja maiores estudos com laser, pois apresentou ótimos resultados, tanto na confecção do molde, pois apresentou ótima precisão, quanto na qualidade da peça final, exibindo ótimos resultados e poucos defeitos. É possível se fabricar inúmeras peças e figuras também, já que o laser é computadorizado.

Figura 26 – Molde e modelo produzido em laser no LEAU



Fonte: Próprio autor (2023)

Tabela comparativa entre os dois processos, analisando vários aspectos, tais como: custo, dureza e toxicidade.

Tabela 2 - Quadro comparativo entre as duas coberturas estudadas

	<i>Argila Refratária</i>	<i>Alumina</i>
Descarte	Não-biodegradável. Descarte em aterros apropriados para resíduos sólidos	Descarte em aterros sanitários regulamentados
Toxicidade	Não-tóxico e inerte	Não-tóxico e inerte
Reciclagem	Incomum. Material perde suas características após queima	Reciclagem apenas para fins metalúrgicos, inviável para ser utilizada em produtos de consumo devido a presença de muitos contaminantes
Custo	Metade do custo da alumina em média	Dobro do custo da alumina em média
Tempo	2 dias no total. 24h para secagem de cada camada	Com uma camada: 4 dias em média Com duas camadas: 8 dias em média
Dureza	Baixa	Alta
Condutividade Térmica	Baixa	Baixa
Resultado Final	Apresentou bons resultados, mas não conseguiu segurar o fundido em seu interior, por ser frágil, apresentou muitas rachaduras, rebarbas e empenou a peça final	Apresentou resultados superiores ao da argila, manteve a morfologia da peça, copiou melhor as características do molde, letras mais definidas, não deixou que o metal escapasse para a caixa de areia, porém é mais difícil de ser aplicado no molde, pois não tem uma aderência tão boa ao EPS

Fonte: Próprio autor (2023)

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho mostraram que é possível utilizar o processo de fundição por espuma perdida com casca cerâmica para reproduzir peças com detalhes e

complexidade, como no caso dos modelos estudados. O uso do poliestireno expandido como molde perecível mostrou-se eficaz, permitindo a evaporação do material durante o vazamento do metal líquido. A casca cerâmica, composta por óxido de alumínio e silicato de sódio, apresentou boa aderência ao molde e resistência às altas temperaturas do alumínio fundido.

Com base nisso, percebeu-se que a cobertura utilizando alumina é mais eficiente do que a de argila refratária, pois esta apresentou melhores resultados, principalmente quanto à morfologia e exatidão na peça.

Também foi possível perceber que os modelos artesanais, confeccionados manualmente, mostraram resultados satisfatórios, reproduzindo as características iniciais do molde com boa fidelidade. Neles, houve a presença de algumas imperfeições, como gotas frias e falta de penetração em letras específicas, mas no geral, a casca cerâmica se manteve intacta e a peça final apresentou um bom acabamento superficial.

No entanto, o modelo produzido em fresadora CNC apresentou resultados ainda melhores, com uma reprodução mais precisa dos detalhes do molde. Porém, também foram observadas algumas imperfeições, como bolhas e falta de preenchimento em algumas letras. Assim, foi constatado que a presença de materiais de união, como colas, prejudicou o resultado final, indicando a importância de evitar esses elementos para obter peças de melhor qualidade.

Com relação aos modelos produzidos a laser, apresentaram ótimos resultados, sendo muito fácil o manuseio e produção de moldes, mas ainda se faz necessário mais estudos com relação a calibração da máquina para se trabalhar com EPS, visto que é um material poroso, apresentando muitos vazios.

Em relação à casca cerâmica, foi observado que a aderência e a resistência mecânica foram satisfatórias, não ocorrendo desprendimento ou esfarelamento durante o processo de fundição. A dureza da casca contribuiu para evitar o empenamento das peças, e a facilidade de remoção do revestimento em regiões sem letras foi comprovada.

No entanto, ainda são necessários aprimoramentos nesse processo, pois a remoção da casca cerâmica nas regiões com letras apresentou certa dificuldade, demandando mais de uma etapa neste processo. Além disso, foram identificadas algumas imperfeições na peça final, como porosidade, falta de preenchimento e presença de resquícios da casca. Esses aspectos podem ser objeto de estudos futuros para a melhoria do processo.

Em resumo, os resultados obtidos neste trabalho mostraram que é possível utilizar o processo de fundição por espuma perdida com casca cerâmica para a reprodução de peças com alta complexidade e detalhamento. O uso do poliestireno expandido como molde perecível e a aplicação da casca cerâmica com a proporção adequada de alumina e silicato de sódio

demonstraram ser eficazes. No entanto, ainda são necessários ajustes e aprimoramentos para a obtenção de peças com menores imperfeições e com um processo de remoção da casca mais eficiente.

REFERÊNCIAS

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

KLUG, Jeferson Leandro. **Notas de aula**. UFC, 2021.

NETO, Mário Sônego. PPT - **O que você precisa saber?** PowerPoint Presentation, free download - ID:4577256 (slideserve.com). Acesso em 06 jul. 2023.

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

VAZ FILHO, Cesanildo Sousa. **Desenvolvimento de um revestimento à base de argila refratária para o processo de fundição com poliestireno expandido**. 2021. p.21. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.