



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

RENAN MARQUES PAIVA

**DESENVOLVIMENTO DE RECOBRIMENTO REFRAATÁRIO PARA
POLIESTIRENO EXPANDIDO NO PROCESSO DE FUNDIÇÃO ESPUMA-
PERDIDA**

FORTALEZA

2023

RENAN MARQUES PAIVA

DESENVOLVIMENTO DE RECOBRIMENTO REFRAATÓRIO PARA POLIESTIRENO
EXPANDIDO NO PROCESSO DE FUNDIÇÃO ESPUMA-PERDIDA

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

Orientador: Prof. Dr. Jeferson Leandro Klug.

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)

- P17d Paiva, Renan Marques.
Desenvolvimento de recobrimento refratário para poliestileno expandido no processo de fundição espuma-perdida / Renan Marques Paiva. – 2023.
42 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.
1. Fundição com poliestireno expandido. 2. Recobrimento refratário. 3. Processo de espuma-perdida. 4. Fundição. I. Título.

CDD 669

RENAN MARQUES PAIVA

DESENVOLVIMENTO DE RECOBRIMENTO REFRAATÓRIO PARA POLIESTIRENO
EXPANDIDO NO PROCESSO DE FUNDIÇÃO ESPUMA-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: 14/12/2023.

BANCA EXAMINADORA

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

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

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

A Deus.

À minha mãe, Tayza Helena e ao meus Avós,
Antônio Marques e Luiza Helena.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe e ao meu avô, em especial, que apoiaram minha jornada.

Aos meus amigos e colegas presentes nos momentos importantes, em especial Natacha, Gabriel e Leticia.

Aos colegas de curso Thomas e Sérgio pelo suporte durante a trajetória acadêmica.

Ao Prof. Dr. Jeferson Klug, pela excelente orientação e parceria dentro do laboratório de fundição.

Aos professores participantes da banca examinadora Jorge Luiz e Ricardo Emílio, pelo tempo disponibilizado e pelas valiosas contribuições para o devido sucesso do trabalho.

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

RESUMO

De acordo com Groover (2014, p. 121). “O processo de fundição com poliestireno expandido usa um molde com areia compactada ao redor de um modelo em espuma de poliestireno que é vaporizado quando o metal fundido é vazado no molde”. Essa técnica despertou interesse do Laboratório de Fundição da Universidade Federal do Ceará (UFC) por sua facilidade na produção de peças, sendo esse processo utilizado para o melhor aprendizado dos alunos de disciplinas ligadas à fundição. Apesar de possuir teoria inicial simples, este processo é amplamente utilizado na indústria automobilística, utilizando o processo de espuma-perdida para a produção de motores automobilísticos com o auxílio da automatização para a produção de modelos de poliestireno expandido (Isopor®). Este trabalho é fundamentado em diversas pesquisas realizadas no Laboratório de Fundição da UFC. Destaca-se o TCC de Vaz Filho (2021), que desenvolveu uma fórmula à base de argila refratária, permitindo a produção de peças de até 30 centímetros. Adicionalmente, o TCC de Oliveira (2023) é considerado, no qual foi realizada uma comparação minuciosa entre a alumina e a argila refratária, com o objetivo de determinar qual delas apresentaria as melhores propriedades em diferentes aspectos. No decorrer do estudo, foram testadas oito diferentes receitas de recobrimento refratário com o objetivo de analisar o seu comportamento em diversas condições. Avaliamos cada receita com base em critérios, incluindo a facilidade de aplicação do produto, a simplicidade da remoção da casca após a fundição e, o mais importante, se o produto mantinha as características do molde de poliestireno expandido. Por fim, 3 receitas apresentaram resultados satisfatórios, apresentando excelentes resultados.

Palavras-chave: Fundição com Poliestireno Expandido; Recobrimento Refratário; Processo de Espuma-Perdida; Fundição.

ABSTRACT

According to Groover (2014, p. 121), “The expanded polystyrene foundry process uses a mold with compacted sand around a polystyrene foam model that is vaporized when the molten metal is poured into the mold.” This technique sparked interest from the Foundry Laboratory of the Federal University of Ceará (UFC) due to its ease in producing parts, this process being used for better learning of students in disciplines related to casting. Despite having a simple initial theory, this process is widely used in the automotive industry, using the lost-foam process for the production of automotive engines with the aid of automation for the production of expanded polystyrene models (Styrofoam®). This work is based on several researches carried out at the UFC Casting Laboratory. The TCC of Vaz Filho (2021) stands out, who developed a formula based on refractory coating, allowing the production of parts up to 30 centimeters. Additionally, the study of Oliveira (2023) is considered, in which a meticulous comparison was made between alumina and refractory clay, with the aim of determining which one would present the best properties in different aspects. During the study, eight different refractory coating recipes with the aim of analyzing their behavior under various conditions were tested. We evaluated each recipe based on criteria, including the ease of product application, the simplicity of shell removal after casting, and most importantly, whether the product maintained the characteristics of the expanded polystyrene mold. In the end, 3 recipes presented satisfactory results, presenting excellent results.

Keywords: Expanded Polystyrene Casting Process; Refractory Coating; Lost-Foam Process; Foundry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processos de fundição	15
Figura 2 – Tipos de fornos indiretos a combustão. (a) removível (b) fixo (c) basculante.....	16
Figura 3 – Processo de fundição por poliestireno expandido.....	17
Figura 4 – Fundido obtido do modelo sem revestimento do TCC do Vaz Filho.....	17
Figura 5 – Fundido obtido do modelo com revestimento do TCC do Vaz Filho.....	18
Figura 6 – Modelo de poliestireno expandido da manopla e bailarina para revestimento de casca	21
Figura 7 – Forno a cadinho	22
Figura 8 – Vazamento do alumínio	23
Figura 9 – Gato produzido por processo de Fundição de espuma perdida	24
Figura 10 – Modelo para fundição de espuma perdida	25
Figura 11 – Protótipo da bailarina sem recobrimento refratário alimentada pelo centro.....	26
Figura 12 – Região crítica da peça	27
Figura 13 – 4 Protótipos de isopor para a confecção	28
Figura 14 – Resultado após o vazamento	29
Figura 15 – Peça 01 – Teste de depósito.....	29
Figura 16 – Peça 02 – Teste de depósito.....	30
Figura 17 – Peça 03 – Teste de depósito.....	31
Figura 18 – Peça 04 – Teste de depósito.....	32
Figura 19 – Modelo e produto produzido a partir do recobrimento refratário usando as proporções de 70 g de alumina 60 mesh + 30g silicato	32
Figura 20 – Molde e resultado da manopla solicitada pelo laboratório	33

Figura 21 – Modelo e produto produzido do recobrimento refratário usando as proporções 70 g de alumina 60 mesh + 10 g de silicato + 20 g de água	34
Figura 22 – Modelo produzido do recobrimento refratário usando as proporções 70 g de alumina 60 mesh + 10 g de silicato + 20 g de água + 30g gesso	35
Figura 23 – Modelo produzido do recobrimento refratário usando as proporções 70 g de alumina 60 mesh + 10 g de silicato + 20 g de água + 30g gesso + 5 g amido de milho	36
Figura 24 – Modelo produzido a partir do recobrimento refratário usando as proporções 50 g de alumina 60 Mesh + 5 g de silicato + 15 g de água + 0,1g surfactante	37
Figura 25 – Produto produzido do recobrimento refratário usando as proporções 50 g de alumina 60 mesh + 5 g de silicato + 15 g de água	38
Figura 26 – Produto produzido do recobrimento refratário usando as proporções 70 g de areia 60 mesh + 3 g de silicato + 30 g de água	39
Figura 27 – Modelo produzido do recobrimento refratário usando as proporções 70 g de areia 60 mesh + 3 g de silicato + 30 g de água	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação da utilização de argila refratária e alumina para a confecção de recobrimento refratário.....	19
---	----

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
%	Porcentagem
g	Grama
UFC	Universidade Federal do Ceará
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Fundição	15
2.2 Forno a cadinho	16
2.3 Processo com poliestireno expandido	16
3 MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1 Materiais	20
3.2 Metodologia	20
3.2.1 Confeção do modelo de Isopor®	20
3.2.2 Recobrimento refratário	21
3.2.3 Preparação do modelo	22
3.2.4 Vazamento do metal	22
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	24
4.1 Teste de fundição em espuma sem revestimento refratário	24
4.2. Utilizando recobrimento refratário	26
4.2.1. Recobrimento refratário seguindo as proporções: 100 g de alumina 100 mesh + 10 g de silicato + 20 g de água	27
4.2.1.1. Influência da espessura em peças negativas - Peça 01	29
4.2.1.2. Influência da espessura em peças negativas - Peça 02	30
4.2.1.3. Influência da espessura em peças negativas - Peça 03	30
4.2.1.4. Influência da espessura em peças negativas - Peça 04	31
4.2.2 Recobrimento refratário seguindo as proporções: 70 g de alumina 60 mesh + 30g silicato	32
4.2.3 Recobrimento refratário seguindo as proporções: 70 g de alumina 60 mesh + 10 g de silicato + 20 g de água	33
4.2.4. Recobrimento refratário seguindo as proporções: 70 g de alumina 60 mesh + 10 g de silicato + 20 g de água + 30g gesso	35
4.2.5. Recobrimento refratário seguindo as proporções: 70 g de alumina 60 mesh + 10 g de silicato + 20 g de água + 30g gesso + 5 g amido	36
4.2.6. Recobrimento refratário seguindo as proporções: 50 g de alumina 60 mesh + 5 g de silicato + 15 g de água + 0,1g surfactante	37
4.2.7. Recobrimento refratário seguindo as proporções: 50 g de alumina 60 mesh + 5 g	

<i>de silicato + 15 g de água</i>	38
4.2.8. Recobrimento refratário seguindo as proporções: 70 g de areia 60 mesh + 3 g de silicato + 30 g de água	39
5 CONCLUSÃO	41

1 INTRODUÇÃO

Conforme Groover (2014, p. 121) “O processo de fundição com poliestireno expandido usa um molde com areia compactada ao redor de um modelo em espuma de poliestireno que é vaporizado quando o metal fundido é vazado no molde”. Em peças pequenas (até 10 centímetros), esse processo funciona muito bem, mas com o aumento do tamanho da peça, falhas começam a serem observadas, necessitando o uso de revestimento refratário.

Dessa forma, foram utilizados trabalhos anteriores realizados no laboratório de Fundição da Universidade Federal do Ceará como bases teóricas para início do trabalho. Em seu TCC, Vaz Filho (2021) desenvolveu uma receita de revestimento refratário, a base de argila refratária, que produziu uma peça de quase 30 centímetros. Já no trabalho de Oliveira (2023), foi desenvolvido revestimento refratário com o objetivo de resistir a altas temperaturas do alumínio fundido e replicar com detalhes peças confeccionadas de poliestireno expandido.

Utilizando forno de cadinho alimentado por carvão e o forno mufla, foi possível transformar a sucata em metal líquido em temperaturas acima do ponto de fusão do alumínio com o objetivo de gerar uma maior fluidez para o metal. Neste trabalho são apresentados resultados dos testes com as possíveis receitas de revestimento refratário e a possibilidade do uso delas para obter peças com geometria mais complexas e de maiores tamanhos.

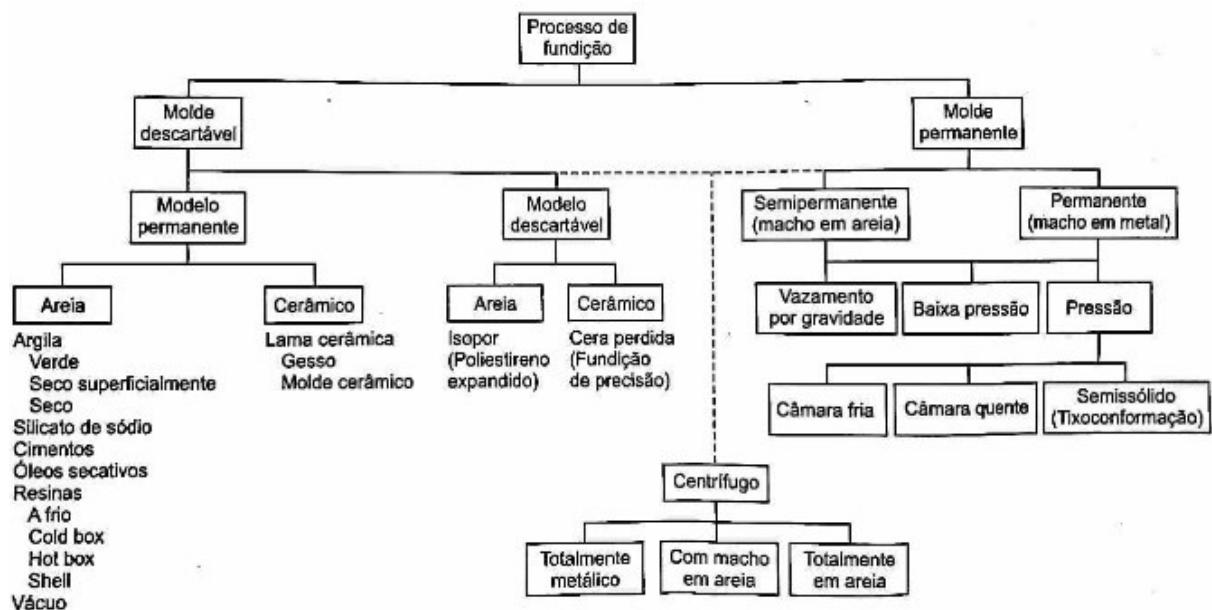
Dessa forma, com o auxílio do professor orientador e alunos do Laboratório de Fundição da Universidade Federal do Ceará (UFC), foram desenvolvidas receitas de revestimento refratário com o objetivo de aprimorar estudos anteriores de processos de fundição utilizando a técnica de espuma-perdida, desenvolvendo revestimentos distintos objetivando peças de boa qualidade com geometria e tamanhos diferentes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fundição

Groover (2014, p. 100) define o processo de fundição como, “Processo no qual um metal fundido flui pela força da gravidade, ou por ação de outra força, num molde em que solidifica com a forma da cavidade do molde”. Com o desenvolvimento de novas técnicas ao longo do tempo, conhecer e classificar os principais processos se torna importante. Essa classificação, segundo Baldam e Vieira (2014), é apresentada na Figura 1.

Figura 1: Processos de Fundição.



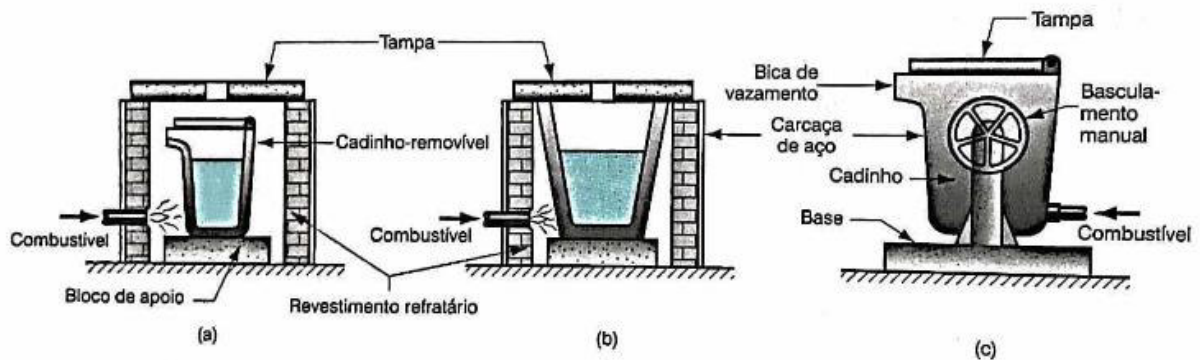
Fonte: Baldam e Vieira (2014, p. 29).

A fundição se tornou uma das bases da indústria, sendo produzidas 90 milhões de toneladas por ano de fundidos de acordo com o Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES). Nesse contexto, a versatilidade das diferentes técnicas de fundição possibilita diversas oportunidades para que as empresas produzam com o menor custo, como é o caso do processo com espuma-perdida, que segundo Groover, tem sido aplicada na produção em massa de fundidos para motores de automóveis nos quais utilizam sistemas automatizados para a confecção de modelos de espuma de poliestireno.

2.2 Forno a cadinho

De acordo Groover (2014), pelo fato de não fundir o metal de forma direta, ou seja, não existe contato entre o metal e o combustível, ele pode ser chamado de forno indireto a combustão. Observado na Figura 2 pode-se ver a diferença entre os tipos de forno a cadinho.

Figura 2 – Tipos de Fornos Indiretos a Combustão. (a) removível (b) fixo (c) basculante.

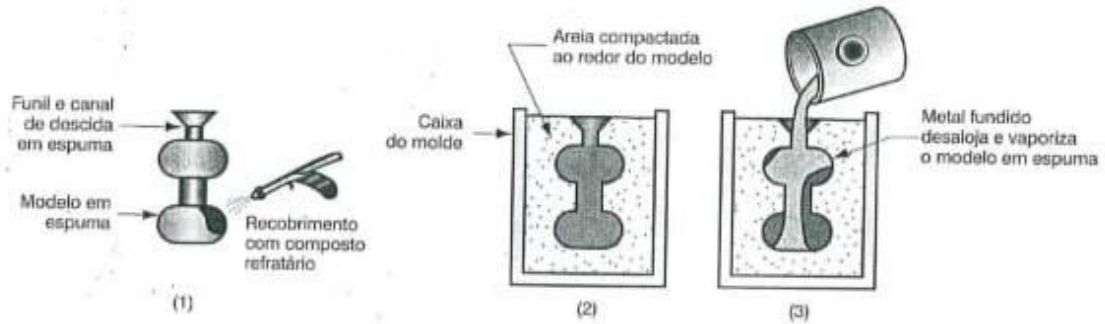


Fonte: Groover (2014, p. 134).

2.3 Processo com poliestireno expandido

Segundo Groover (2010), existem várias denominações para o processo de fundição de poliestireno expandido, tais como espuma perdida, padrão perdido, ou processo de molde completo, sendo este último o termo comercialmente utilizado. O processo utiliza areia, sem a necessidade de adição de outras substâncias, envolta do material de poliestireno que será vaporizado quando o metal fundido for derramado no molde, como visto na Figura 3.

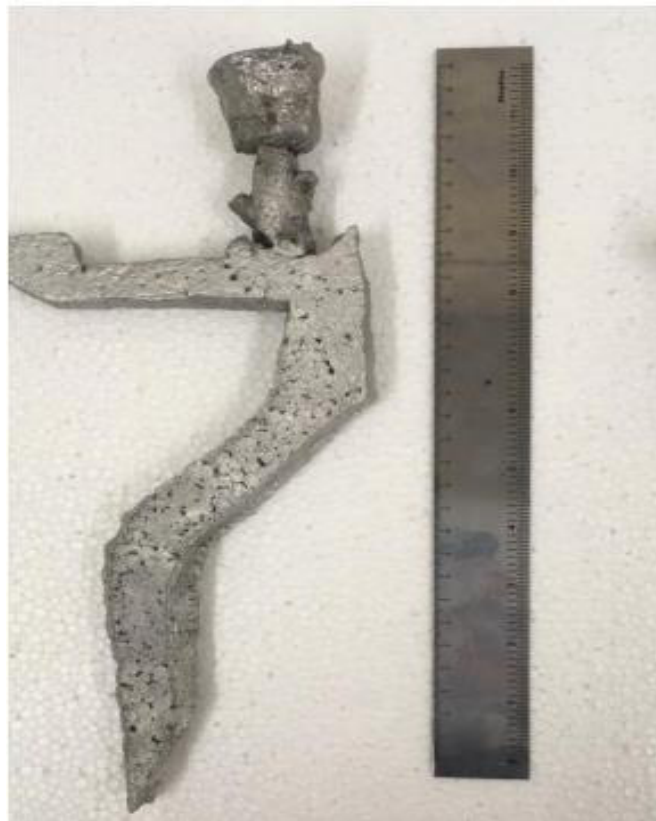
Figura 3 – Processo de fundição por poliestireno expandido.



Fonte: Introdução aos processos de fabricação, Mikell P. Groover.

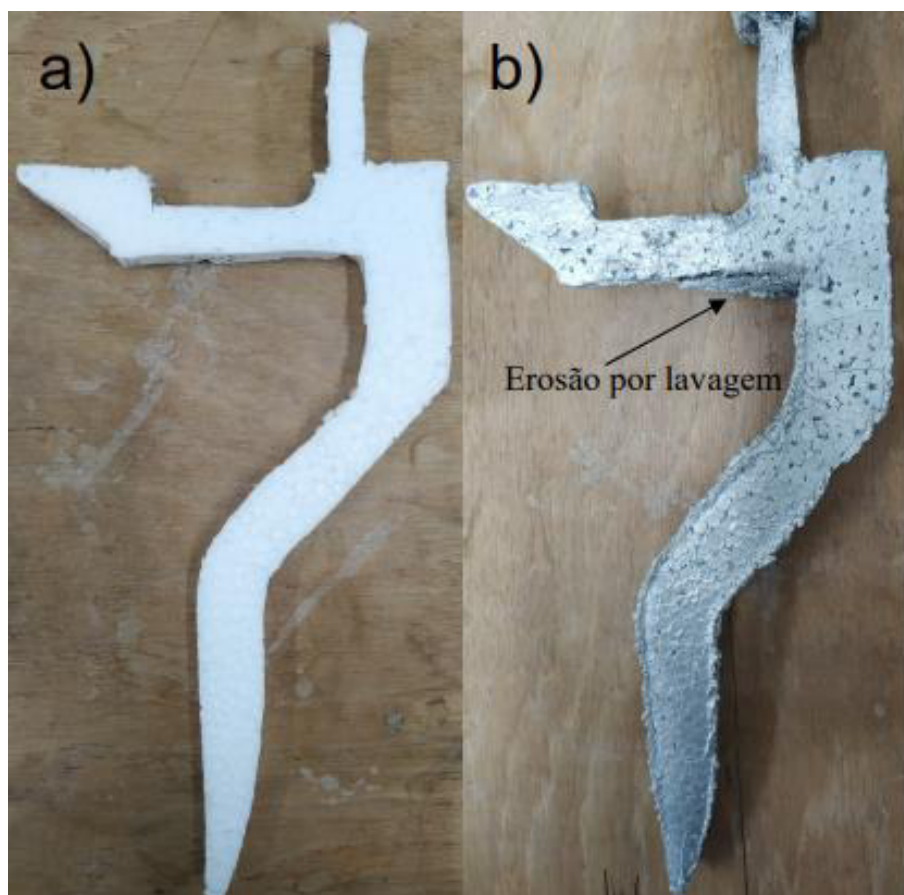
Em seu trabalho de conclusão de curso (TCC), Vaz Filho (2021) cita que por meio dos experimentos realizados nos modelos com geometria complexa, percebeu-se a importância do revestimento refratário para o processo, pois permite que a peça final possua o mesmo formato do modelo adotado, resultado não obtido pelo processo utilizado sem a peça recoberta. Conforme mostra a Figura 4 e a Figura 5, pode-se comparar os resultados obtidos por ele.

Figura 4 – Fundido obtido do modelo sem revestimento do TCC do Vaz Filho.



Fonte: Cesanildo Sousa (2021).

Figura 5 – Fundido obtido do modelo com revestimento do TCC do Vaz Filho.



Fonte: Cesanildo Sousa (2021).

De acordo com o TCC de Oliveira (2023), observou-se que no recobrimento refratário utilizando alumina, há maior eficiência em relação a argila refratária, pois esta apresentou melhores resultados, principalmente quanto à morfologia e à exatidão das dimensões na peça. Observando a Tabela 1, tem-se mais detalhes da comparação entre os dois materiais.

Tabela 1 – Comparação da utilização de argila refratária e alumina para a confecção de recobrimento refratário.

	<i>Argila Refratária</i>	<i>Alumina</i>
<i>Descarte</i>	Não-biodegradável. Descarte em aterros apropriados para resíduos sólidos	Descarte em aterros sanitários regulamentados
<i>Toxicidade</i>	Não-tóxico e inerte	Não-tóxico e inerte
<i>Reciclagem</i>	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
<i>Custo</i>	Metade do custo da alumina em média	Dobro do custo da alumina em média
<i>Tempo</i>	2 dias no total. 24h para secagem de cada camada	Com uma camada: 4 dias em média Com duas camadas: 8 dias em média
<i>Dureza</i>	Baixa	Alta
<i>Condutividade Térmica</i>	Baixa	Baixa
<i>Resultado Final</i>	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: Vinícius Oliveira (2021).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Os materiais utilizados nos experimentos foram todos fornecidos pelo Laboratório de Fundição da UFC. Dessa forma, foram utilizados:

- Poliestireno expandido (Isopor®), para a confecção dos modelos.
- Forno a cadinho a carvão e Mufla, para a obtenção do metal fundido
- Sucata de alumínio, metal que foi usado para a confecção das peças.
- Alumina 100 e 60 mesh, participando da composição da receita do revestimento refratário.
- Silicato, participando da composição da receita do revestimento refratário.
- Gesso, participando da composição da receita do revestimento refratário.
- Amido de Milho, participando da composição da receita do revestimento refratário.
- Areia 60 mesh, participando da composição da receita do revestimento refratário.
- Surfactante, participando da composição da receita do revestimento refratário.

3.2 Metodologia

Para avaliar a qualidade do revestimento refratário foram feitos testes em peças com geometria, tamanho e revestimento distintos para identificar qual o melhor revestimento e que tipo de peças necessitavam ou não de revestimento refratário. É possível separar o processo de trabalho em 4 etapas: Confecção do Modelo de Isopor®, Revestimento do Modelo, Preparação do Modelo e Vazamento do Metal.

3.2.1 Confecção do modelo de Isopor®

A confecção é a etapa em que se define as características da peça final de alumínio que se deseja produzir. A definição dessa peça segue de acordo com a aplicação, como é caso da manopla, que foi solicitada por um laboratório parceiro para resolver o problema da máquina de ensaio de tração, ou por efeito de estudo como o caso na bailarina.

Esta última foi escolhida para estudo pelo grau de dificuldade da peça. Todos os modelos do trabalho foram feitos de forma manual. Ambas as peças podem ser vistas na Figura 6.

Figura 6: Modelo de poliestireno expandido da manopla e bailarina para revestimento de casca.



Fonte: Próprio autor (2023).

3.2.2 *Recobrimento refratário*

O recobrimento refratário teve algumas variações em relação a forma que foi aplicado ao modelo, na receita que utiliza a areia 60 mesh é aplicado o recobrimento refratário em forma de banho sobre a peça. As demais receitas de recobrimentos refratários foram aplicadas de forma direta na peça, e as outras etapas do processo foram idênticas para todas as receitas, que iniciavam com a pesagem das substâncias na balança de precisão do Laboratório de Fundição da UFC.

Após realizar a pesagem dos componentes, a mistura é feita. A regra seguida é sempre priorizar a mistura dos componentes líquidos primeiro e, em seguida, adicionar os componentes sólidos. Após a unificação da mistura, o recobrimento refratário é aplicado sobre um dos lados do modelo de polietileno expandido (Isopor®) e permanece em descanso por 24 horas para que as reações necessárias aconteçam. Em seguida é aplicado no outro lado,

completando a peça, ao passo que necessita aguardar mais 24 horas para que o modelo esteja adequadamente preparado para a etapa de vazamento do metal.

Além disso, em algumas peças foram utilizadas as aplicações de CO₂ para acelerar as reações, para que em sequência, possa ser efetuado o revestimento no outro lado da peça ou até mesmo o vazamento do metal.

3.2.3 Preparação do modelo

Após conclusão das etapas anteriores, é feito o cobrimento da peça revestida com areia para a etapa do vazamento. Essa etapa é realizada utilizando uma peneira simples, resultando em uma areia mais uniforme sobre o molde e permitindo que uma parte do canal de vazamento fique fora da areia. A partir dessa pequena parte fora da areia, é feita uma proteção de areia umedecida com o intuito de criar uma poça de metal em volta do canal de vazamento para auxiliar na descida do metal, ao passo que, quanto maior a parede e mais estreita, menos metal será gasto para formar a mesma peça.

3.2.4 Vazamento do metal

Por fim, foi utilizado um forno a cadinho a carvão como ilustra a Figura 7, ou forno de mufla no Laboratório de Fundição, para a fusão do alumínio no processo de vazamento. Na maioria das peças foi utilizado o forno mufla, pois é mais eficiente e rápido de trabalhar em comparação ao forno a cadinho, mais utilizado em aulas experimentais de fundição que foram realizadas no período.

Figura 7: Forno a cadinho.



Fonte: Próprio autor (2023).

Como a temperatura de fusão do alumínio é $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, foi utilizada temperatura entre $750 - 800\text{ }^{\circ}\text{C}$, pois além de fundir o alumínio ele precisava de uma fluidez aceitável, como visto na Figura 8. Dez minutos após o vazamento, as peças eram retiradas com o auxílio do tenaz para a lavagem em água corrente para resfriar a peça. Em sequência, é efetuada a remoção do canal de vazamento para ser reutilizado em novas peças.

Figura 8: Vazamento do alumínio.



Fonte: Próprio autor (2023).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram utilizados diversos testes de cascas para a produção dos modelos, obtendo diferentes resultados. Os principais problemas encontrados foram causados principalmente por excesso de água nas cascas ou falta de adesão do revestimento ao modelo, que também, em alguns casos, podem ter sido causados por excesso de água.

4.1 Teste de fundição em espuma sem revestimento refratário

Para avaliar a eficiência do método de fundição de espuma perdida primeiramente foram realizados alguns testes para determinar a necessidade da casca cerâmica dependendo do tamanho e formato da peça, primeiramente foi feito o molde de um gato de geometria simples, como se pode observar na Figura 9. O primeiro teste teve um resultado esperado, por ser uma peça pequena de geometria simples, não houveram grandes deformações do protótipo original.

Figura 9: Gato produzido por processo de Fundição de espuma-perdida.



Fonte: Próprio autor (2023).

Dessa forma, foram utilizados outros modelos para verificar a necessidade do recobrimento refratário, chegando ao segundo modelo, como pode ser observado na Figura 10.

Figura 10: Modelo para fundição de espuma-perdida



Fonte: Próprio autor (2023).

O resultado obtido com o segundo modelo não foi satisfatório, visto que a produção resultou na infidelidade ao modelo. Verificou-se que a alimentação desse procedimento foi de cima para baixo, o que auxiliou que a parte de cima do protótipo não tivesse grandes distorções, diferente da parte inferior que ficou completamente deformada e sem similaridade nenhuma com o modelo utilizado. Foi feito um novo teste alterando a posição da alimentação do metal, para determinar se era possível obter um resultado satisfatório sem a utilização da casca cerâmica e novamente o resultado não foi positivo, como pode-se observar na Figura 11. No resultado, obteve-se melhoria na geometria das pernas, porém ocorreram deformações nas laterais e formação incompleta das mãos. Este resultado de formação incompleta pode ter causa raiz na falta de contato da peça com o alimentador, pois havendo material suficiente, podemos ver que o massalote conteve bastante alumínio que poderia vazar para a peça. Dessa forma, foram realizados outros testes e nenhum obteve resultado satisfatório.

Figura 11: Protótipo da bailarina sem revestimento alimentada pelo centro.



Fonte: Próprio autor (2023).

4.2. Utilizando revestimento refratário

Após uma série de experimentos, a bailarina foi selecionada como a peça principal para produção, apesar dos desafios encontrados. A complexidade da geometria da peça apresentou dificuldades significativas durante a produção do modelo, o revestimento e o manuseio da peça. A região correspondente ao quadril, por ser extremamente fina, se mostrou um ponto de fragilidade, facilitando a ocorrência de cisão em alguns testes com o modelo, conforme ilustrado na Figura 12. Além disso, foi produzida a manopla para a máquina de ensaio de tração, e uma garra do lobo de madeira, que de modo similar a bailarina, não foi possível produzir sem o revestimento refratário.

Figura 12: Região crítica da peça.



Fonte: Próprio autor (2023).

4.2.1. Recobrimento refratário seguindo as proporções: 100 g de alumina 100 mesh + 10 g de silicato + 20 g de água

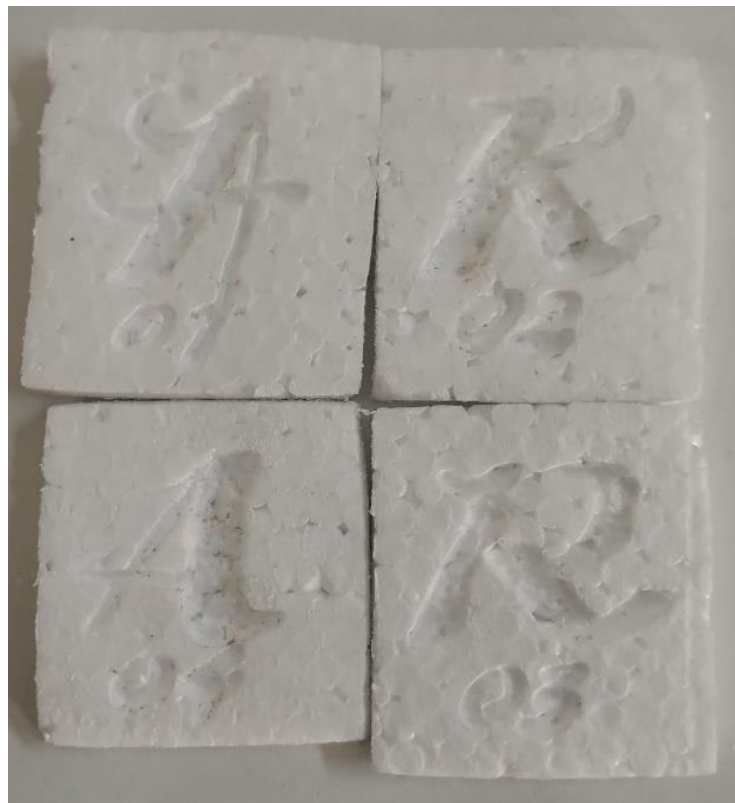
No trabalho de Oliveira (2023) foi utilizado revestimento refratário nas proporções de 100 g de alumina e 100 mesh com 33 g de silicato. Optou-se por substituir parte do silicato por água para observar o comportamento do revestimento refratário. Na aplicação do revestimento refratário ao modelo, foi observada certa dificuldade, pois o revestimento não se incorporava a peça com facilidade e mecanicamente estava inadequada para o manuseio. No período de 48 a 72 horas após a aplicação sua estrutura estava se desfazendo, por conta disso não foi vazada.

Concomitante ao teste descrito acima, foi realizado um estudo de como seria o comportamento dessa casca em relação à quantidade de material usada para a confecção do revestimento refratário, fazendo a relação de volume do modelo de Isopor® com o volume de revestimento refratário que seria aplicado.

Para esse procedimento foram feitos 4 modelos de volumes similares e colocadas diferentes proporções de revestimento refratário para observar os resultados. Os resultados

alcançados foram satisfatórios, indicando que existe a possibilidade de diminuir a quantidade de material utilizado e ainda assim obter resultados semelhantes. Foi observado que a peça 03, que utilizou a razão de $2,14 \text{ cm}^3$ de recobrimento refratário para cada centímetro cúbico do modelo de Isopor®, foi a mais adequada ao processo, visto que teve resultado similares às peças 01 e 02 que utilizaram mais material e resultado superior à peça 04, que apresentou algumas falhas. Podem-se comparar os resultados obtidos observando as Figuras 13 e 14.

Figura 13: 4 Protótipos de Isopor® para a confecção.



Fonte: Próprio autor (2023).

Figura 14: Resultado após o vazamento.



Fonte: Próprio autor (2023).

4.2.1.1. *Influência da espessura em peças negativas - Peça 01*

A primeira peça, apesar de ter a maior espessura apresentou alguns problemas próximo ao canal de vazamento. Acredita-se que essa falha foi causada por falta de contato do canal de alimentação com a peça: como se pode ver na Figura 15 a área de contato com a peça é muito pequena o que influenciou nos defeitos encontrados.

Figura 15: Peça 01 – Teste de depósito.



Fonte: Próprio autor (2023).

4.2.1.2. *Influência da espessura em peças negativas - Peça 02*

Peça 02 apresentou qualidade desejada: pode-se observar na Figura 16 uma falha no lado esquerdo de baixo da letra K, contudo essa falha foi apresentada no modelo confeccionado em Isopor®, visto anteriormente na Figura 13, então esse problema foi produzido na confecção e falha foi copiada, o que mostra que a espessura está adequada.

Figura 16: Peça 02 – Teste de depósito.



Fonte: Próprio autor (2023).

4.2.1.3. *Influência da espessura em peças negativas - Peça 03*

A terceira peça apresentou resultado igual às anteriores, copiando exatamente como estava no modelo. Foi visto como ilustrado na Figura 17 que o centro da alimentação foi prejudicado porque o canal de alimentação acabou furando o Isopor® e na hora do vazamento do metal não houve contato adequado nessa região. Mesmo assim, a peça 03 não foi prejudicada.

Figura 17: Peça 03 – Teste de depósito.



Fonte: Próprio autor (2023).

4.2.1.4. Influência da espessura em peças negativas - Peça 04

A última amostra, conforme mostra a figura 18, apresentou algumas imperfeições, principalmente na parte inferior e na formação da base da letra “A”, causada por fatores como o contato inapropriado com a alimentação do canal de vazamento, visto que o modelo de Isopor® está furado no contato entre a peça e o canal de vazamento, ou pelo fato do revestimento estar muito fino. Nos testes realizados das peças 01 a 03, foram constatados que o recobrimento refratário continuava na peça após o vazamento do metal, sendo necessária a retirada da peça em seguida. Entretanto, na peça 04 não é constatada tal situação, pois ocorreram rupturas na geometria da peça no momento do vazamento do material. Ou seja, ao realizar a retirada da peça fundida de dentro da areia, a casca continuava cobrindo o fundido. No teste realizado na peça 04, ao se retirar o fundido da areia, a casca apresentou estado quebradiço em partes localizadas, influenciando em imperfeições na região inferior da peça.

Figura 18: Peça 04 – Teste de depósito



Fonte: Próprio autor (2023).

4.2.2 Recobrimento refratário seguindo as proporções: 70 g de alumina 60 mesh + 30g silicato

O recobrimento refratário funcionou aplicado ao modelo e apresentou resistência mecânica satisfatória. Entretanto no vazamento do metal, o recobrimento refratário não preservou as características do modelo inicial. Logo, resultou no produto com face diferente do modelo, com vários pontos que parecem respingos, além de que a peça rompeu no local frágil discutido anteriormente neste trabalho. Apesar de ocorrer o rompimento, a passagem do metal para as regiões superiores da bailarina não foi prejudicada, como visto na Figura 19, porém não atingiu as expectativas.

Figura 19: Modelo e produto produzido a partir do recobrimento seguindo as proporções: 70 g de alumina 60 mesh + 30g silicato.



Fonte: Próprio autor (2023).

4.2.3 Recobrimento refratário seguindo as proporções: 70 g de alumina 60 mesh + 10 g de silicato + 20 g de água

Com objetivo de resolver o problema aparente de excesso de silicato, visto no tópico anterior, a nova receita de casca foi elaborada com o auxílio do professor orientador. A resistência mecânica observada no tópico anterior permaneceu, o acréscimo de água possibilitou maior facilidade no momento de aplicar o revestimento. Entretanto, observou-se que caso a água passasse um pouco ou se utilizasse CO₂ para acelerar as reações, a casca não apresentaria adesão suficiente em alguns pontos e em outros ocorreria desprendimento do modelo de Isopor®.

A escolha dessa receita foi assertiva para alguns modelos de peças. Foi utilizada essa receita para realizar o revestimento do projeto da manopla para a máquina de ensaios de tração, como mostra a Figura 20. O resultado do revestimento para esse tipo de peça alcançou o objetivo desejado, visto que, em comparação com o modelo inicial é difícil encontrar inconsistência. Entretanto, como o modelo inicial foi feito de forma manual, o produto final não ficou adequado para o uso, pois a peça necessitava de um furo central para o acoplamento com a máquina, furo central que será fornecido os dados necessários para a produção de um novo modelo, usando essa receita que obteve um bom resultado. Esse tópico futuramente, poderia ser explorado com o auxílio de parceria com laboratório que possua impressora à laser, a fim de produzir modelos com melhor qualidade inicial, e conseqüentemente a produção de peças com maior valor aparente.

Figura 20: Molde e resultado da manopla solicitada pelo laboratório.



Também foi utilizada a mesma receita de revestimento refratário com a bailarina, visto na Figura 21, ela apresentou alguns problemas, a parte inferior não foi formada corretamente, que pode ter sido causado pela falta de metal na alimentação. A partir disto, esta situação prejudicou a formação da bailarina por completo, pois o fato de a alimentação ter sido de cima para baixo, ocasionou que na região das pernas seja mais difícil de obter a formação desejada, necessitando o metal precisar vencer a força da gravidade nas regiões laterais. Este contexto ocasionou regiões com excesso de metal nas laterais que não possuíam revestimento, pois o revestimento refratário não teve ligação corretamente com o polietileno expandido nas regiões laterais.

Figura 21: Modelo e produto produzido a partir do revestimento refratário usando as proporções 70 g de alumina 60 mesh + 10 g de silicato + 20 g de água.



Fonte: Próprio autor (2023).

4.2.4. Recobrimento refratário seguindo as proporções: 70 g de alumina 60 mesh + 10 g de silicato + 20 g de água + 30g gesso

Buscando a melhor fixação na peça, utilizou-se a adição de gesso para obtenção de uma melhor adesão, mas o resultado foi de um recobrimento refratário com formação de pequenas esferas de gesso que contribuíram para a descontinuidade do recobrimento. Além disso, o recobrimento refratário não conseguiu se unir ao Isopor® causando um resultado ruim, como observado na Figura 22.

Figura 22: Modelo produzido a partir do recobrimento refratário usando as proporções 70 g de alumina 60 mesh + 10 g de silicato + 20 g de água + 30g gesso.



Fonte: Próprio autor (2023).

4.2.5. Recobrimento refratário seguindo as proporções: 70 g de alumina 60 mesh + 10 g de silicato + 20 g de água + 30g gesso + 5 g amido

Com o resultado ruim da casca anterior foi utilizado o amido para verificar o seu comportamento junto ao gesso, e com a união dos dois eram esperados resultados melhores, mas infelizmente esses não foram observados. O recobrimento refratário não revestiu o modelo de forma satisfatória. A Figura 23 mostra um pouco desse problema.

Figura 23: Modelo produzido a partir do recobrimento refratário usando as proporções 70 g de alumina 60 mesh + 10 g de silicato + 20 g de água + 30g gesso + 5 g amido.



Fonte: Próprio autor (2023).

4.2.6. Recobrimento refratário seguindo as proporções: 50 g de alumina 60 mesh + 5 g de silicato + 15 g de água + 0,1g surfactante

O surfactante foi testado para verificar se poderia ser utilizado com modelos de Isopor®, mas o resultado não foi favorável, com a casca não conseguindo se unir adequadamente ao modelo de Isopor®. A receita, apesar de não ter se firmado de forma adequada, foi superior aos itens anteriores com a adição de gesso. Contudo, continuou apresentando defeitos similares aos do Tópico 5.2.3 com friagem em algumas regiões e a casca não unida adequadamente, visto na Figura 24.

Figura 24: Modelo produzido a partir do recobrimento refratário usando as proporções 50 g de alumina 60 mesh + 5 g de silicato + 15 g de água + 0,1g surfactante.



Fonte: Próprio autor (2023).

4.2.7. Recobrimento refratário seguindo as proporções: 50 g de alumina 60 mesh + 5 g de silicato + 15 g de água

O recobrimento refratário apresentou um bom desempenho, entretanto teve uma pequena quebra de parte do recobrimento refratário no momento do manuseio da peça que causou “barriga” no local quando a peça foi vazada. Esse problema pode ter sido causado por excesso de água na peça que contribuiu para essa falha no manuseio da casca, ou por má manipulação da peça pelo operador. Como se pode observar na Figura 25, a casca proporcionou um resultado interessante, apresentando falhas apenas no local que a casca quebrou, onde ocorreu um excesso de material depositado, que pôde ser retirado em processos posteriores. Além disso, apresentou excesso de metal no local entre os braços e a cabeça da bailarina, porém de fácil remoção. Apesar da “barriga” formada no local onde o revestimento refratário quebrou, a peça teve um resultado desejado, bem superior aos demais testes com o modelo de bailarina.

Figura 25: Produto produzido a partir do recobrimento refratário usando as proporções 50 g de alumina 60 mesh + 5 g de silicato + 15 g de água.



4.2.8. Recobrimento refratário seguindo as proporções: 70 g de areia 60 mesh + 3 g de silicato + 30 g de água

O recobrimento refratário a base de areia apresentou facilidade na hora da aplicação da casca, sem a necessidade de aplicação de pequenas quantidades de material com a pinça. Esse processo foi substituído por um banho duplo na peça com o recobrimento refratário. Além disso, o resultado obtido apresentou peças com boa qualidade mesmo com geometrias mais complexas, como observado na Figura 26.

Figura 26: Produto produzido a partir do recobrimento refratário usando as proporções 70 g de areia 60 mesh + 3 g de silicato + 30 g de água.



Fonte: Próprio autor (2023).

Em relação a teste com a bailarina, por conta da dificuldade do manuseio do modelo, houveram dois testes em que o modelo cisalhou no ponto crítico antes do vazamento. Contudo, pôde-se observar que o recobrimento refratário utilizando a areia 60 mesh apresentou boa adesão ao modelo de Isopor®, como evidenciado na Figura 27.

Figura 27: Modelo de bailarina produzido a partir do recobrimento refratário usando as proporções 70 g de areia 60 mesh + 3 g de silicato + 30 g de água.



Fonte: Próprio autor (2023).

5 CONCLUSÃO

O objetivo inicial desse trabalho foi dar continuidade aos estudos no Laboratório de Fundição da UFC para o desenvolvimento de uma receita de revestimento refratário para peças que serão fundidas a partir de modelos produzidos por Isopor®. Os revestimentos refratários apresentaram diferentes resultados, com destaque negativo para o uso do amido de milho, gesso e surfactante que tiveram problemas com a adesão aos modelos de Isopor® produzidos.

As receitas usando alumina 100 e 60 mesh tiveram resultados satisfatórios, com peças produzidas com geometria complexas e tamanhos distintos. Além disso, a casca a base de areia teve um surpreendente resultado favorável, destacando a parte do preparo: diferentemente das demais, a casca permite o banho sobre o modelo produzido. Consequentemente diminuiu drasticamente o tempo de aplicação em relação aos demais revestimentos refratários.

O revestimento refratário que utilizou as proporções 50 g de alumina 60 mesh + 5 g de silicato + 15 g de água foi o destaque positivo no trabalho, com a produção por espuma-expandida do modelo de bailarina. Além disso, outras receitas produziram peças complexas que não foram possíveis sem o revestimento, como a receita que utilizou a areia 60 mesh para a produção da pata do tigre e a receita de revestimento refratário seguindo as proporções de 70 g de alumina 60 mesh + 10 g de silicato + 20 g de água para a produção da manopla.

Para trabalhos futuros, pode-se avaliar a utilização de impressoras a laser para a criação de modelos de Isopor®, visto que a indústria automobilística utiliza o processo de fundição de espuma-perdida aliado à confecção de modelos padronizados de Isopor®, para posteriormente ser aplicado o revestimento com o intuito de produzir peças padronizadas e geometrias mais complexas.

REFERÊNCIAS

Klug, Jeferson Leandro. Notas de aula. UFC, 2021.

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

Banco Nacional do Desenvolvimento. **Industria de fundição: situação atual e perspectivas**. 2023 BNDS. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1721>. Acesso em: 04 out. 2023. p. 6-43

ROSSITTI, S. M. **Processos e variáveis de fundição**. Grupo Metal, maio de 1993.

BALDAM, Roquemar de L.; VIEIRA, Estéfano A. **Fundição - Processos e Tecnologias Correlatas**. 2ª ed. São Paulo: Editora Érica, 2014.

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

OLIVEIRA, V. M. **Desenvolvimento de uma casca cerâmica à base de silicato de sódio e alumina para o processo de espuma perdida**. 2023. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal do Ceara, Fortaleza, 2023.