



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

CESANILDO SOUSA VAZ FILHO

**DESENVOLVIMENTO DE UM REVESTIMENTO À BASE DE ARGILA
REFRATÁRIA PARA O PROCESSO DE FUNDIÇÃO COM POLIESTIRENO
EXPANDIDO**

FORTALEZA

2021

CESANILDO SOUSA VAZ FILHO

DESENVOLVIMENTO DE UM REVESTIMENTO À BASE DE ARGILA REFRAATÁRIA
PARA O PROCESSO DE FUNDIÇÃO COM POLIESTIRENO EXPANDIDO

Trabalho de conclusão de curso apresentado 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: Msc. Samuel Lucas Santos Medeiros

FORTALEZA

2021

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

V495d Vaz Filho, Cesanildo Sousa.

Desenvolvimento de um revestimento à base de argila refratária para o processo de fundição com poliestireno expandido / Cesanildo Sousa Vaz Filho. – 2021.
36 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2021.

Orientação: Prof. Dr. Jeferson Leandro Klug.

Coorientação: Prof. Me. Samuel Lucas Santos Medeiros.

1. Fundição. 2. Revestimento refratário. 3. Poliestireno expandido. I. Título.

CDD 669

CESANILDO SOUSA VAZ FILHO

DESENVOLVIMENTO DE UM REVESTIMENTO À BASE DE ARGILA REFRAATÁRIA
PARA O PROCESSO DE FUNDIÇÃO COM POLIESTIRENO EXPANDIDO

Trabalho de conclusão de curso apresentado 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.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

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

Msc. Samuel Lucas Santos Medeiros
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

À Deus.

Aos meus pais, Silvania e Cesanildo.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por todo o apoio durante toda a minha vida.

Aos meus irmãos Kairo, Karla e Kauã pelo encorajamento dado durante toda a caminhada universitária.

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

Ao Técnico do Laboratório de Fundição Samuel Medeiros, por toda ajuda.

Ao Francisco Henry e ao Fernando Amaral por terem me ajudado no começo dos trabalhos no laboratório, e pela amizade e companherismo.

Aos meus amigos Bruno Ribeiro, Bruno Matos, Daniel Santos, Matheus Souza e Lucas Gomes pelo apoio, conselhos, encorajamento e por sempre estarem comigo durante esses anos de universidade.

Aos participantes da banca examinadora Msc. Samuel Lucas Santos Medeiros e Prof. Dr. 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.

À CAPES, pelo apoio.

“Facilmente serás enganado se só olhares para as aparências dos homens. Se procuras alívio e proveito nos outros, quase sempre terás prejuízo. Procura a Jesus em todas as coisas, e Jesus acharás. Se te busca a ti mesmo, também te acharás, mas para a tua ruína. Pois o homem que não busca a Jesus é mais nocivo a si mesmo que todo o mundo e seus inimigos todos.”

Tomás de Kempis

RESUMO

O processo de fundição em poliestireno expandido é um processo que faz uso de um modelo em poliestireno expansível (isopor) para obtenção de peças metálicas. Ele consiste na degradação do modelo contido em um molde de areia quando em contato com metal líquido. O metal penetra no molde através do sistema de canais de alimentação, assim, por estar cercado por material refratário, o metal se conforma ao molde em que estava o modelo. Para que o processo ocorra adequadamente é necessário um revestimento eficaz, que conceda ao molde resistência durante o vazamento do metal. A técnica utilizada nas aulas práticas no Laboratório de Fundição da Universidade Federal do Ceará não apresentava resultados satisfatórios para peças com dimensões médias e grandes. Pretendendo solucionar este problema, foram realizados testes de um revestimento, a base de argila refratária, para averiguar se ele atende os requisitos necessários para obtenção de peças fundidas com bom acabamento, permitindo a produção de peças sem limite dimensional. O revestimento apresentou bons resultados, pois foi possível a fabricação de peças com dimensões maiores. Entretanto a peça não estava livre de defeitos.

Palavras-chave: Fundição; Revestimento refratário; Poliestireno expandido.

ABSTRACT

Expanded polystyrene casting is a casting process that makes use of an expandable polystyrene model to obtain metal parts. It consists in the degradation of the model contained in a sand mold, when in contact with liquid metal. The metal penetrates the mold through a system of feeding channels, and then, because it is surrounded by refractory material, the metal conforms to the mold where the model was. For the process to occur properly, an effective refractory lining is required, which gives the mold resistance during the pouring of the metal. The technique used in practical classes at the Foundry Laboratory of the Federal University of Ceará did not present satisfactory results for parts with medium and large dimensions. In order to solve this problem, tests were conducted with a coating, based on refractory clay, to see if it meets the requirements for obtaining castings with good finishing, allowing the production of parts without dimensional limits. The coating showed good results, because it was possible to manufacture parts with larger dimensions. However, the part was not free of defects.

Keywords: Foundry; Refractory lining; Expanded polystyrene.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas do processo com poliestireno expandido	18
Figura 2 – Defeitos habituais em fundição em molde de areia	19
Figura 3 – Modelo em EPS com formato de L	22
Figura 4 – Modelos em formato de L revestido com: uma camada (a) e duas camadas (b)	23
Figura 5 – Bacia de vazamento	24
Figura 6 – Fusão da sucata de alumínio	25
Figura 7 – Modelo com geometria complexa	26
Figura 8 – Novo modelo revestido com duas camadas	26
Figura 9 – Fundido obtido do modelo sem revestimento.....	27
Figura 10 – Defeitos presentes no modelo e defeitos apresentados na peça final	28
Figura 11 – Peças após a desmoldagem	29
Figura 12 – Modelo revestido com uma camada (a) e fundido obtido (b)	30
Figura 13 – Modelo revestido com dupla camada (a) e fundido obtido (b)	30
Figura 14 – Fundido obtido do modelo sem revestimento	31
Figura 15 – Região superior do modelo sem cobertura de refratário (a) e do fundido (b) ..	32
Figura 16 – Defeitos presentes na região inferior do fundido	32
Figura 17 – Modelo (a) e fundido do processo com revestimento refratário (b)	33
Figura 18 – Excesso de metal no fundido	34
Figura 19 – Material refratário presente nos poros	35
Figura 20 – Peça obtida no segundo experimento	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a. C	Antes de Cristo
EPS	Poliestireno expandido
LaF	Laboratório de Fundição
UFC	Universidade Federal do Ceará

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
cm	Centímetros
g	Gramas
°C	Graus Celsius
k	Quilo
w	Watts

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	Objetivos	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	Processos de fundição	17
<i>3.1.1</i>	<i>Processo com poliestireno expandido</i>	17
<i>3.1.2</i>	<i>Defeitos em peças fundidas</i>	19
4	MATERIAIS E MÉTODOS	21
4.1	Materiais utilizados	21
4.2	Metodologia	21
<i>4.2.1</i>	<i>Confecção do modelo em EPS</i>	22
<i>4.2.2</i>	<i>Preparação do revestimento refratário</i>	22
<i>4.2.3</i>	<i>Aplicação do revestimento refratário e secagem</i>	22
<i>4.2.4</i>	<i>Confecção do molde</i>	23
<i>4.2.5</i>	<i>Fusão da sucata, resfriamento e limpeza do fundido</i>	24
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
5.1	Peças em formato de L	27
5.2	Peças com geometria complexa	31
6	CONCLUSÃO	37
	REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

Dentre as técnicas de fabricação, a fundição é uma das mais utilizadas para o desenvolvimento de diversos objetos. Além disso, é um dos processos de fabricação mais antigos, Silva (2017) aponta que o cobre já era modelado através do auxílio de moldes de areia na Mesopotâmia a cerca de 4000 a.C. Ao longo do tempo esta técnica vem sendo aperfeiçoada através da modificação de elementos presentes no processo tais como tipo de areia, a sequência de passos do processo, o tipo de molde e entre outros que implicam no produto final. Neste processo o metal fundido flui pela força da gravidade, ou através da atuação de outra força, num molde solidificando no formato do molde utilizado.

Com o aperfeiçoamento dessa técnica vários métodos de fundição foram desenvolvidos, classificados em duas categorias de processos, baseados no tipo de molde: moldes perecíveis e moldes permanentes. O processo de fundição, que utiliza o poliestireno expandido como modelo, é um dos processos de fundição cujo molde é perecível. Este método é conhecido pelos seguintes nomes: processo espuma-perdida, processo modelo-perdido, fundição com espuma evaporável e molde cheio (marca comercial). Neste processo o poliestireno expandido é evaporado quando o metal líquido penetra no molde através do sistema de canais de alimentação, assim, por estar cercado por material refratário, o metal se conforma ao molde em que estava o poliestireno expandido. Durante a queima, os gases gerados devem penetrar na areia solta, que deve permitir o seu escape com facilidade e o reaproveitamento da mesma sem tratamentos e grandes descartes. Este processo permite elaborar peças complexas em alto volume. Além disso, o modelo não precisa ser removido do molde, simplificando o manuseio de areia e os equipamentos de desmoldagem tornando mais rápida a confecção do molde.

Assim como em outras técnicas de fundição, o processo espuma-perdida também está sujeito a diversos defeitos. Entretanto, eles podem ser evitados ou reduzidos por meio do reconhecimento e controle das variáveis que geram os defeitos. Sabendo que a resistência do poliestireno expandido é muito baixa, a moldagem desse material deve ser em areia seca e acomodada por vibrações. Dessa forma faz-se necessário o uso de um revestimento refratário no modelo. Além disso, este revestimento deve conferir a peça final um bom acabamento superficial. Para obter sucesso neste processo é necessário um revestimento eficaz, que apresenta uma viscosidade estável e seja capaz de molhar o modelo.

Esta técnica é utilizada nas aulas práticas da disciplina de fundição no Laboratório de Fundição (LaF) do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, mas não

apresentava resultados satisfatórios para peças médias e grandes. Sabendo que o revestimento refratário é um dos principais fatores determinantes no êxito deste processo, faz-se necessário o estudo e desenvolvimento de revestimentos. No presente trabalho de conclusão foram realizados testes de um revestimento, à base de argila refratária, para averiguar se ele atende os requisitos necessários para obtenção de peças fundidas com bom acabamento, permitindo a produção de peças sem limite dimensional.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é aprimorar o método do processo de fundição em poliestireno expandido, já utilizado no Laboratório de Fundição da Universidade Federal do Ceará, desenvolvendo um revestimento, à base de argila refratária, que preencha os requisitos necessários para obtenção de peças fundidas com bom acabamento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Processos de fundição

A fundição está entre os métodos mais antigos e utilizados na fabricação de peças e objetos, devido à simplicidade e economia desse processo, principalmente na produção de peças grandes, com geometrias complexas. Groover (2014, p. 100) define esse processo da seguinte forma, “Fundição é um 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”.

Por conta da sua grande utilidade, essa técnica foi sendo aperfeiçoada, dando origem a diferentes processos de fundição, que segundo Groover (2014), se subdividem em duas grandes categorias de acordo com o tipo de molde empregado: fundição em moldes perecíveis e fundição em moldes permanentes. Nos processos que utilizam moldes perecíveis, estes são destruídos durante a remoção da peça fundida, sendo necessária a fabricação de um novo molde para cada novo fundido. Diferentemente, os moldes permanentes são utilizados várias vezes na produção de fundidos. Dentre os processos que fazem uso de molde perecível está o processo com poliestireno expandido.

3.1.1 Processo com poliestireno expandido

Este processo data da década de 1950, tendo sido utilizado pelo escultor canadense Armand Vaillancourt. A primeira patente do processo foi dada a Harold F. Shroyer em 1958. A General Motors em meados dos anos 1980 anunciou que a linha de carros, Saturn, utilizaria o processo de fundição por espuma perdida para a produção de todos os blocos de motor, cabeçotes de cilindro, virabrequins, suportes do diferencial e caixas de transmissão. Nesse mesmo período, grandes companhias mundiais iniciaram testes e implantação do processo em grande escala para produção de coletores de admissão, cabeçotes de motor e trocadores de calor fundidos em alumínio.

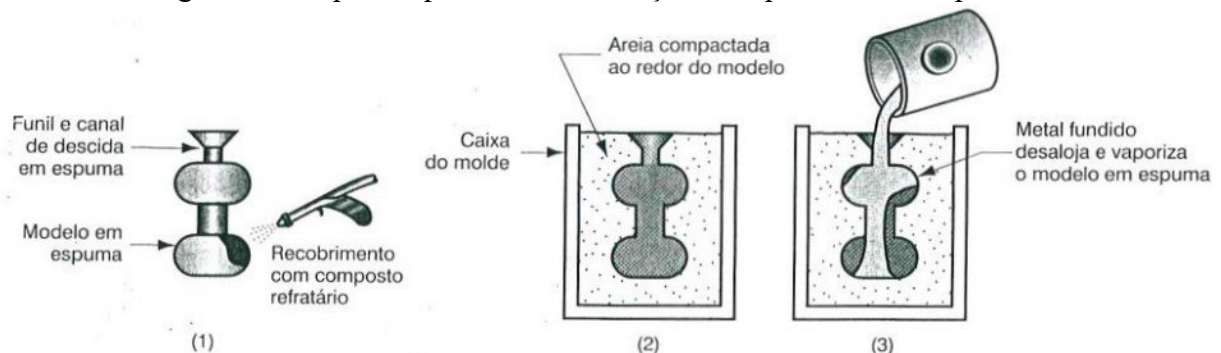
O Processo com poliestireno expandido (isopor) é conhecido por diferentes nomes, incluindo processo espuma-perdida, processo modelo-perdido, fundição com espuma evaporável e molde cheio, sendo este uma marca comercial (Groover, 2014).

De acordo com Beeley (2001), o processo é baseado no princípio do modelo dispensável conforme usado na fundição por cera perdida, mas com a diferença de que o

conjunto do modelo é deixado no molde para ser degradado pelo metal fundido no vazamento. Segundo ele, o que distingue o processo de espuma perdida é o vazamento do metal fundido no molde contendo o conjunto de poliestireno expandido, e a fusão e volatilização progressiva da espuma à medida que o molde é preenchido. Conforme Groover (2014) destaca, o modelo em espuma inclui canal de descida, massalotes e os sistemas de canais, podendo conter também machos internos, não sendo necessária a produção de um macho separadamente.

Ao referir-se à técnica, Martins (2003) menciona que a areia utilizada, não possui aditivos. Também destacou como já foi dito, que o modelo é confeccionado em poliestireno expansível, recoberto por um revestimento refratário e com o auxílio de uma vibração externa o molde é confeccionado com o modelo no seu interior. Após a confecção do molde a próxima etapa, descrita por ele, é o vazamento do metal, onde o modelo sofrerá uma degradação térmica com penetração do metal líquido através do sistema de canais de alimentação, reproduzindo a forma do modelo degradado. Ele ressalta que durante a queima, os gases gerados devem escapar através da camada do revestimento e penetrar na areia solta, o que permite a sua saída com facilidade. Com o término do processo, a areia pode ser reaproveitada não necessitando de elaborados tratamentos e grandes descartes. A sequência do processo é mostrada na figura 1.

Figura 1 – Etapas do processo de fundição com poliestireno expandido



Fonte: Fundamentals of modern manufacturing, 4ª edição por Mikell P. Groover, 2010

Em sua dissertação, Martins (2003) descreve de forma detalhada as etapas do processo molde cheio, desde confecção do modelo em poliestireno expansível, mostrando como é feito o dimensionamento e colagem do sistema de canais de enchimento do modelo, passando pela etapa de pintura dos modelos, para posterior confecção do molde e vazamento do metal, finalizando com a desmoldagem.

Dentre as etapas citadas anteriormente, a etapa de pintura ou revestimento dos

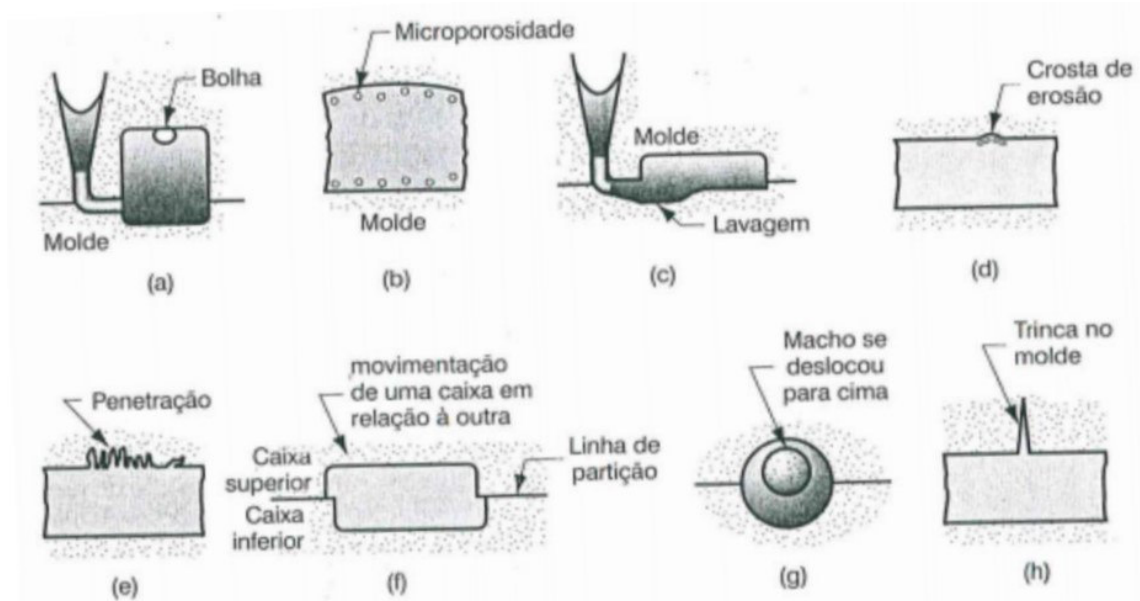
modelos recebe destaque, devido a sua importância e influência no acabamento da peça. Sobre a função desse recobrimento, Soares (2000) afirma que sua função é a criação de uma camada intermediária entre areia e metal, para conferir um bom acabamento ao molde ou macho e, por conseguinte, à peça. A aplicação do material refratário pode ser feita por pincel, pistola ou imersão, de forma que camada aplicada seja fina, para permitir a saída de gases com facilidade, não gerando defeitos na peça fundida (Soares, 2000).

Sobre a aplicação deste processo, Beeley (2001) declara que como em fundições de aço são propensas à captação de carbono, o uso do processo é restrito a composições de alto teor de carbono, mas é amplamente adotado para ligas de alumínio e ferros fundidos.

3.1.2 Defeitos em peças fundidas

Assim como em outros métodos de fabricação, a fundição não está isenta de defeitos. Falha de preenchimento, delaminação, gotas frias, cavidade de contração, microporosidade e ruptura a quente são os defeitos comuns aos processos de fundição. Além desses, Groover (2014) destaca os defeitos presentes prioritariamente em fundição em areia, definindo cada defeito, além de apontar as principais causas. Estes defeitos estão representados na figura 2.

Figura 2 – Defeitos habituais na fundição em molde de areia



Fonte: Fundamentals of modern manufacturing, 4ª edição, Mikell P. Groover, 2010

Os defeitos típicos do processo de fundição por espuma perdida são: defeito de superfície, delaminação, porosidade, rugosidades, carbono lustroso e deformações no modelo devido ao excesso de compactação da areia.

Os defeitos de superfície são originados do modelo, devido ao tamanho das células e da densidade do modelo em poliestireno expandido, sendo a cópia fiel da superfície do modelo na peça. Quando duas frentes de solidificação do metal se encontram, não fundindo devido à solidificação prematura, ou não há escape do filme de poliestireno queimado, é originada uma delaminação. As rugosidades são formadas na superfície devido à camada de revestimento refratário ser muito espessa, contribuindo para uma alta concentração de gases do poliestireno degradado. A liberação de gases e líquidos durante a degradação do polímero e do material utilizado na colagem das peças, que compõem o modelo, podem originar porosidades no fundido. O carbono lustroso é um defeito típico, quando esse processo é aplicado em ferros fundidos e aços, originado do craqueamento do estireno que foi liberado na queima do modelo e não escapou através da camada de revestimento (Martins, 2003).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o conhecimento adquirido na disciplina de fundição e das pesquisas descritas na literatura, teve-se início a parte prática no trabalho no Laboratório de Fundição (LaF) da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Sabendo que o processo de fundição com poliestireno expandido já realizado no LaF, não possibilitava a obtenção de peças superiores a 20 cm. Esse trabalho visou aprimorar o processo realizado no laboratório, através do desenvolvimento de um revestimento refratário, que permita a produção de peças com maior qualidade e de peças superiores a 20 cm. Além disso, agregará conhecimento para pessoas interessadas em fundição, principalmente aos alunos da disciplina de fundição do curso de Engenharia Metalúrgica.

4.1 Materiais utilizados

Os materiais empregados nos experimentos foram fornecidos pelo LaF. Foram utilizados os seguintes materiais para a fabricação do revestimento refratário: silicato de sódio neutro, argila refratária à base de sílica e água. O silicato de sódio neutro e água atuam como ligantes para o pó refratário. Já a argila atua como refratário e suporta altas temperaturas, não permitindo o contato do metal líquido com a areia do molde. Isto, objetivando a prevenção de rugosidades sobre a superfície do fundido obtido.

Além desses materiais, foi utilizado poliestireno expandido constituído por 2% de poliestireno e 98% de ar, na fabricação dos modelos. Para a fabricação do molde foi utilizada areia de construção. Sucata de alumínio (bloco de motor) foi utilizada como fonte de metal para a obtenção das peças finais.

4.2 Metodologia

Para avaliar a eficácia do revestimento refratário sobre o acabamento da peça obtida, foram realizados alguns experimentos, para análise do efeito de alguns parâmetros relevantes para o processo. Os parâmetros avaliados foram: número de camadas de revestimento e geometria da peça.

Inicialmente, o modelo é fabricado, adotando-se uma geometria específica. Logo após, é feita a preparação do revestimento refratário, para posterior aplicação e secagem, deste revestimento. Com o término dessas etapas, dá-se início a etapa de confecção do molde.

Finalizada a etapa anterior, a sucata é fundida e despejada sobre o molde. O estudo é finalizado com a retirada e inspeção visual da peça, para análise e discussão dos possíveis defeitos.

4.2.1 Confeção do modelo em EPS

A etapa de fabricação consiste na elaboração e confecção do modelo em poliestireno expandido, para realização dos primeiros testes. Para isso, foi desenvolvido um modelo possuindo 6 cm de altura em formato de L, contendo um canal de vazamento. Inicialmente, foram feitos três modelos com dimensões semelhantes. A figura 3 mostra um exemplo dos modelos confeccionados.

Figura 3 – Modelo em EPS com formato de L



Fonte: Próprio autor (2021)

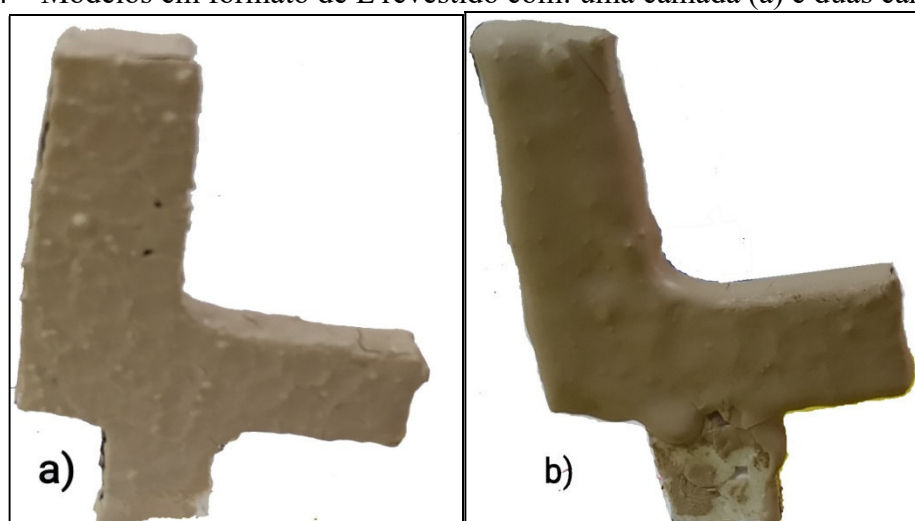
4.2.2 Preparação do revestimento refratário

Para a preparação do revestimento refratário é realizada a medição da quantidade de cada material, que irá compor o revestimento. Primeiro, prepara-se uma mistura composta com a seguinte proporção: 97% de argila refratária e 3% de silicato de sódio neutro. Após isso, é feita a adição de água, numa proporção de 20 g de água para cada 100 g de mistura.

4.2.3 Aplicação do revestimento refratário e secagem

Na etapa de aplicação do material refratário, o revestimento foi aplicado no modelo com o auxílio de um pincel. Nessa etapa, dois dos três modelos foram revestidos, um com uma camada e outro com duas camadas. Eles estão representados na figura 4. O material foi aplicado sobre grande parte do modelo, deixando livre de revestimento, apenas, a região inferior do canal de vazamento, onde será depejado o metal líquido. O terceiro modelo não foi revestido. Através disso, deseja-se avaliar a eficácia do recobrimento e o efeito do número de camadas sobre o acabamento da peça.

Figura 4 – Modelos em formato de L revestido com: uma camada (a) e duas camadas (b)



Fonte: Próprio autor (2021)

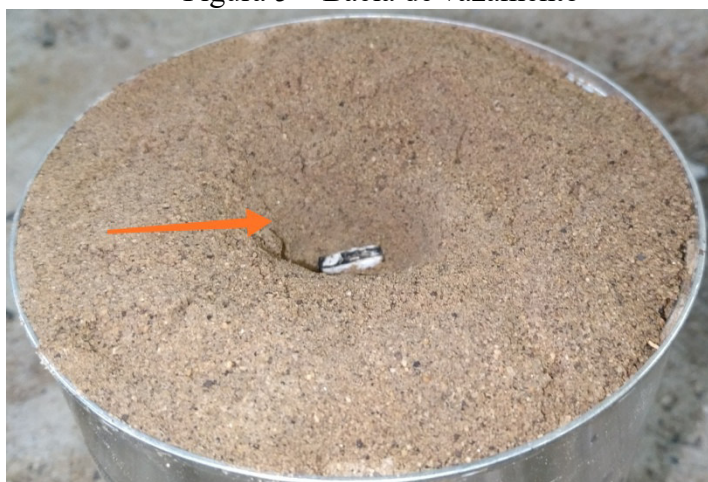
Durante 20 minutos, o modelo recoberto seca à temperatura ambiente, não sendo necessária a utilização de estufa ou secagem ao sol, para acelerar o processo. A secagem ao sol não é recomendada, pois a secagem rápida torna o recobrimento refratário quebradiço, despredendo-o do modelo.

4.2.4 Confeção do molde

Com o fim das etapas anteriores, é realizada a confecção do molde em areia. Essa fase consiste em cobrir o modelo com areia solta, deixando apenas uma parte do canal de vazamento exposto. Para isso, a areia de construção foi penerada com uma peneira comum de cozinha, tornando a granulometria desse material mais uniforme. Os modelos foram postos, separadamente, em recipientes preenchidos com certa quantidade de areia. Após isso, foi feito o término do preenchimento do recipiente, tendo o cuidado de não aplicar uma força excessiva sobre o modelo para sua sustentação, assim preservando a peça final de possíveis

deformações. Utilizando areia, também foi feita uma bacia de vazamento na parte superior do molde, representada na figura 5, onde parte da areia é levemente umidecida. Sua função é servir de reservatório para acúmulo e fornecimento de metal líquido à peça, e como massalote, prevenindo o rechupe na peça final. Quando o metal é despejado sobre a bacia de vazamento, o seu acúmulo exerce a pressão necessária para haver o escoamento do metal para dentro do molde, consumindo o modelo.

Figura 5 – Bacia de vazamento



Fonte: Próprio autor (2021)

4.2.5 Fusão da sucata, resfriamento e limpeza do fundido

A fusão da sucata de alumínio foi realizada no forno de indução (SERVIFOR Ltda) disposto no LaF, figura 6, onde o banho metálico atingiu uma temperatura superior a 750 °C. Este forno possui sistema de refrigeração, exaustor de poluentes e uma caixa refratária fixa para receber o cadinho com o metal. Além disso, opera até uma potência máxima de 50 kW. Após a obtenção do banho metálico, foi realizado o vazamento no molde.

Figura 6– Fusão da sucata de alumínio



Fonte: Próprio autor (2021)

Com o resfriamento do fundido, promoveu-se a desmoldagem das peças, retirando-as com o auxílio de uma tenaz, não sendo necessário realizar nenhum impacto para o desmolde, como ocorre em outros processos de fundição. Utilizando uma escova de aço rotativa, limpavam-se as peças para a retirada de alguns resquícios de revestimento, e posterior inspeção visual.

Essas etapas foram repetidas mais duas vezes, ainda utilizando os modelos em forma de L, para comparação dos resultados. Ao todo, foram utilizados nove modelos de poliestireno expandido com este formato, nos quais um terço deles não recebeu revestimento refratário, outro terço recebeu apenas uma camada de recobrimento e o último terço foi recoberto por duas camadas.

Com o fim dos testes nos modelos em forma de L, foram adotados outros com geometria mais complexa, possuindo 30 cm de altura. Isso feito para avaliar a aderência e conformação do material refratário em modelos com dimensões maiores, assim como o acabamento superficial produzido no fundido. Com base nos resultados obtidos nas peças em L, foi decidido que um dos modelos não receberia revestimento refratário, e outro seria revestido por duas camadas. Além disso, a areia utilizada para a confecção do molde do modelo revestido não foi peneirada, em quanto o outro modelo teve a areia de seu molde peneirada. Isso foi realizado, para averiguar se a areia influenciaria o processo, mesmo o modelo estando revestido. Para confirmação dos resultados foi realizado um segundo teste com os mesmos parâmetros utilizados no modelo revestido. O novo modelo utilizado, assim como o modelo revestido estão representados na figura 7 e 8, respectivamente.

Figura 7 – Modelo com geometria complexa



Fonte: Próprio autor (2021)

Figura 8 – Novo modelo revestido com duas camadas



Fonte: Próprio autor (2021)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a remoção da peça do molde e limpeza de sua superfície pode-se, finalmente, analisar a qualidade obtida na produção.

5.1 Peças em formato de L

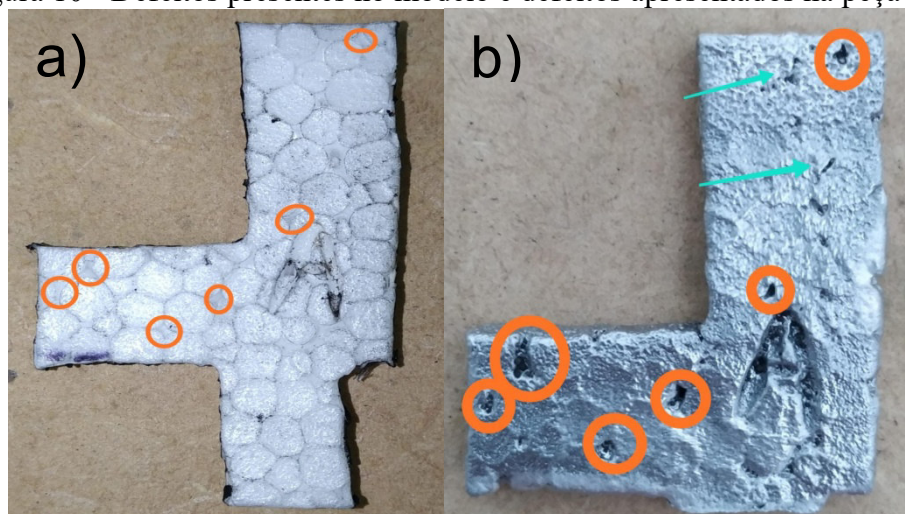
Na análise das peças sem recobrimento, foi possível notar alguns defeitos presentes na superfície (figura 9), de modo que toda a extensão da peça não estava tão lisa quanto possível como pode ser visto de forma mais nítida na figura 10. A superfície do fundido apresentou rugosidades, originadas do contato entre o modelo e a areia do molde, e algumas cavidades (indicados pelas setas), que não estavam presentes no modelo utilizado, mas sempre pequenas e rasas.

Figura 9 – Fundido obtido do modelo sem revestimento



Fonte: Próprio autor (2021)

Figura 10 - Defeitos presentes no modelo e defeitos apresentados na peça final



Fonte: Próprio autor (2021)

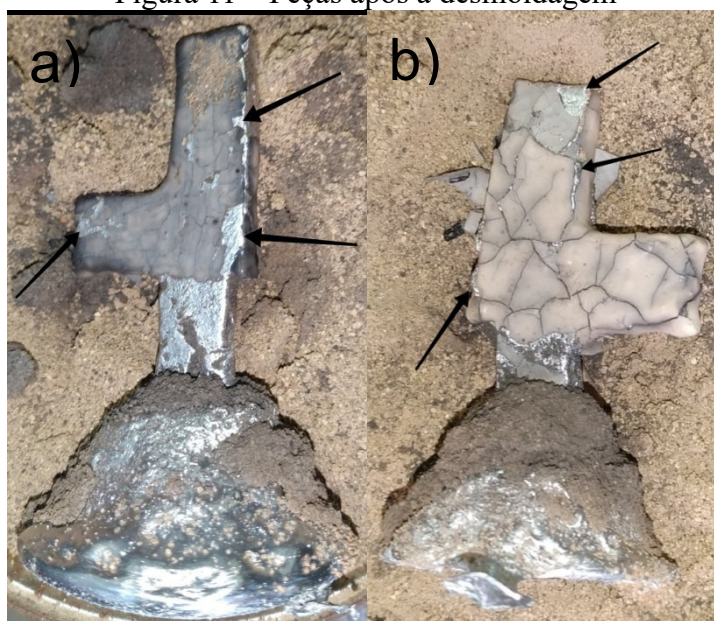
Embora haja quantidade considerável de defeitos, dos quais muitos já estavam presentes no modelo (defeitos circulados), a peça também apresentou regiões com bom acabamento, como na parte inferior. Analisando essa região da imagem é possível ver um pouco da geometria típica do poliestireno, ou seja, é possível ver o formato das células de poliestireno que compõem a peça. Além disso, foi preservado no fundido o formato desejado.

Nos primeiros testes realizados nos modelos recobertos, a adesão do revestimento refratário se mostrou bastante eficaz durante a aplicação, ou seja, ele teve boa fixação no modelo, não ocorrendo o desprendimento da camada refratária, revestindo toda a superfície do modelo. Isso é bastante positivo, pois se espera que o revestimento utilizado possua boa fixação. Não ocorrendo isto, algumas partes do modelo ficarão expostas entrando em contato com a areia do molde, gerando defeitos na peça, como rugosidades. A boa aderência pôde ser vista tanto no modelo revestido com uma camada, como no revestido por duas camadas. Este fato pode ser visto na seção anterior, figura 4.

Além de boa fixação, o revestimento apresentou boa resistência após a secagem. A camada de recobrimento não se apresentou quebradiça, sendo resistente ao toque e a pequenas pressões. Essas características são indispensáveis para a etapa de confecção do molde em areia, pois neste momento do processo o modelo revestido entra em contato com areia, que é despejada ao seu redor, exercendo pressão sobre ele. Nessa etapa, a areia ao ser despejada atinge o modelo recoberto. Caso o material refratário não tenha boa resistência ele será arrancado. Essa característica preserva a peça final do defeito citado no parágrafo anterior. Além disso, o revestimento confere ao modelo maior resistência, o que evita o empenamento das peças.

Outra característica apresentada é a facilidade de desprendimento do revestimento sobre a superfície do fundido, após as etapas de vazamento e resfriamento, minimizando o tempo gasto na etapa de limpeza. Na figura 11, percebe-se que o revestimento ainda recobre grande parte da superfície dos fundidos, mas é possível notar que outras regiões já se encontram expostas, indicadas pelas setas na figura. Nesta figura tem-se o fundido originado pelo modelo com uma camada de revestimento (a), e à direita tem-se o fundido originado pelo que recebeu duas aplicações do material refratário (b).

Figura 11 – Peças após a desmoldagem

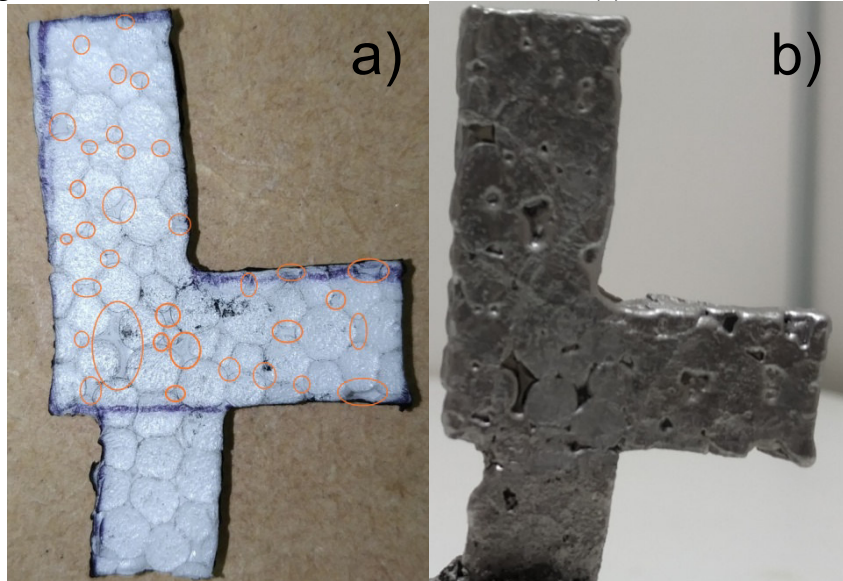


Fonte: Próprio autor (2021)

Apesar de desprender-se com facilidade durante a desmoldagem, parte do revestimento refratário fica na areia. Logo, para a reutilização deste material será necessário realizar um novo peneiramento. Na figura 11, alguns resquícios do revestimento na areia próximo à peça podem ser vistos.

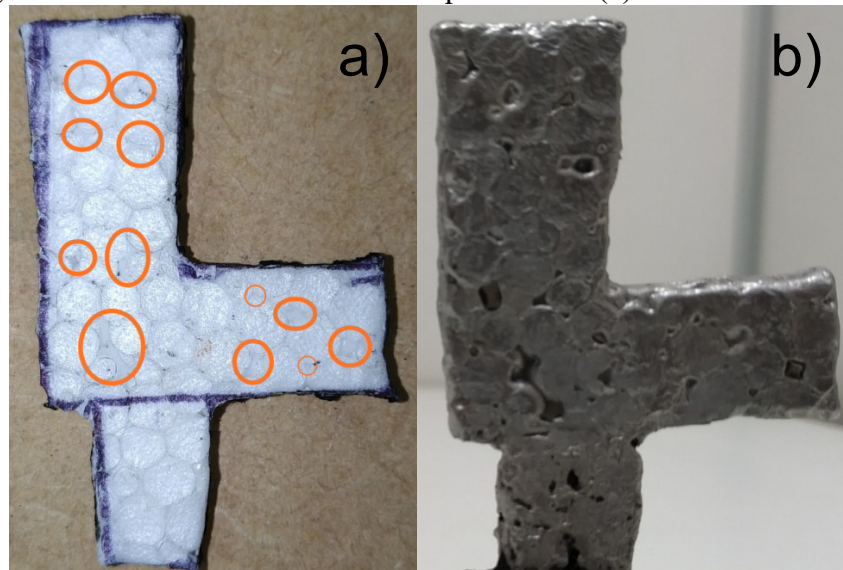
Em ambas as peças, a casca refratária saiu com muita facilidade durante a escovação, não sendo necessária uma pressão excessiva sobre a peça final para retirada deste material. Além disso, apenas com essa etapa de limpeza, é possível analisar a superfície dos fundidos, não sendo necessário uso de reagentes químicos para remoção do recobrimento. Como os modelos utilizados possuíam poros, eles foram reproduzidos na peça, ocorrendo um acúmulo de material refratário nesses espaços. As figuras 12 e 13 apresentam os modelos utilizados e seus respectivos fundidos, nelas estão destacados os defeitos presentes no modelo.

Figura 12 – Modelo revestido com uma camada (a) e fundido obtido (b)



Fonte: Próprio autor (2021)

Figura 13 – Modelo revestido com dupla camada (a) e fundido obtido (b)



Fonte: Próprio autor (2021)

Em relação ao acabamento superficial da peça, o revestimento apresentou um bom desempenho, sendo vistos sobre a superfície do fundido, apenas os defeitos já existentes no padrão adotado, não apresentando rugosidades como ocorreu com o fundido do processo em que não foi aplicado revestimento. Além disso, ele permitiu a passagem dos gases gerados durante a queima do poliestireno expandido, isentando a peça de possíveis defeitos gerados por eles. Não houve grande diferença entre o acabamento superficial da peça representada na figura 12 e a representada na figura 13. Entretanto, percebe-se que o modelo com dupla camada teve suas características mais preservadas, sendo possível perceber de forma mais

nitida o formato das células que compõem o modelo em EPS no fundido.

Por apresentar as qualidades relatadas anteriormente, o revestimento aplicado nos dois modelos não sofreram os defeitos relacionados à etapa de moldagem. Assim sendo, foram preservadas de forma satisfatória as características do modelo adotado. Dessa forma, para os modelos adotados inicialmente, os requisitos do processo para revestimentos refratários foram atendidos.

5.2 Peças com geometria complexa

Como a peça originada do modelo com duplo revestimento apresentou melhores resultados, foi decidido que para os testes nos modelos com geometria complexa, seria adotado o mesmo número de camadas.

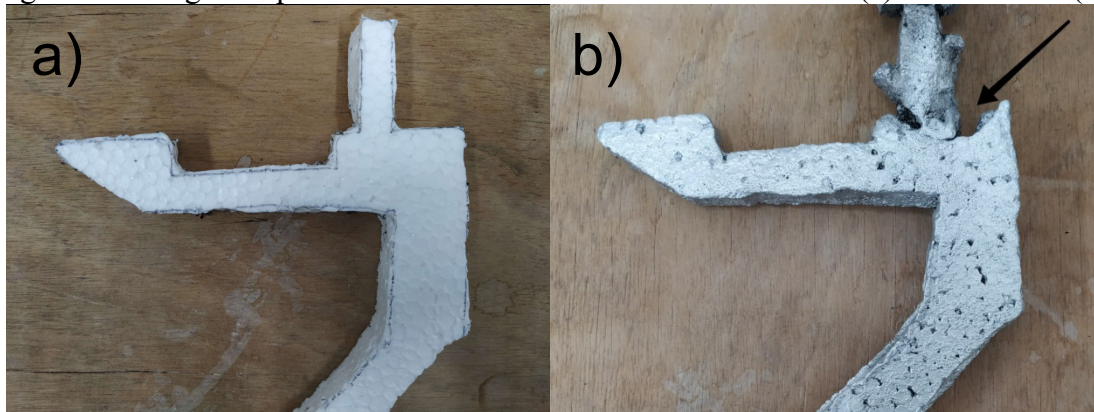
De acordo com a descrição do método deste trabalho, a primeira peça com geometria complexa não foi recoberta. O fundido obtido não mostrou bons resultados, pois não copiou fielmente o formato da peça, como pode ser visto nas figuras 14 e 15.

Figura 14 – Fundido obtido do modelo sem revestimento



Fonte: Próprio autor (2021)

Figura 15 – Região superior do modelo sem cobertura de refratário (a) e do fundido (b)

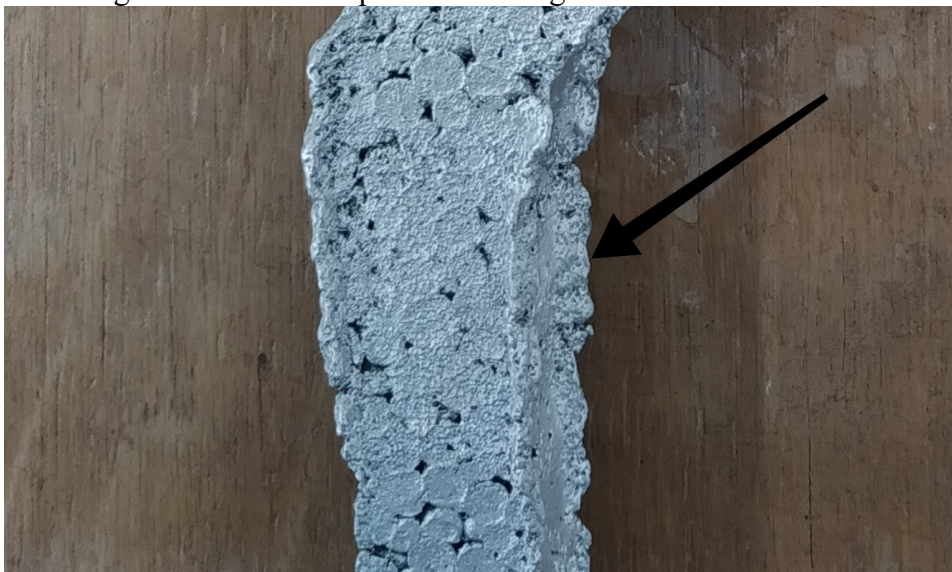


Fonte: Próprio autor (2021)

Nessa imagem é fácil perceber o defeito na região superior da peça. Provavelmente, o molde formado para esse modelo cedeu durante o vazamento, por não apresentar a resistência necessária para que o processo ocorresse com sucesso.

Em outras ocasiões, foram realizados testes semelhantes a esse no LaF, e o defeito citado também esteve presente. Além desse defeito, a peça obtida também apresentou um excesso de metal em suas laterais, nas regiões inferiores, indicado pela seta na figura 16. Possivelmente, isto se trata de um defeito chamado de penetração, que está relacionado à alta fluidez do metal, e à baixa resistência do molde, quando o metal penetra em seu interior, segundo Groover (2014).

Figura 16 – Defeitos presentes na região inferior do fundido



Fonte: Próprio autor (2021)

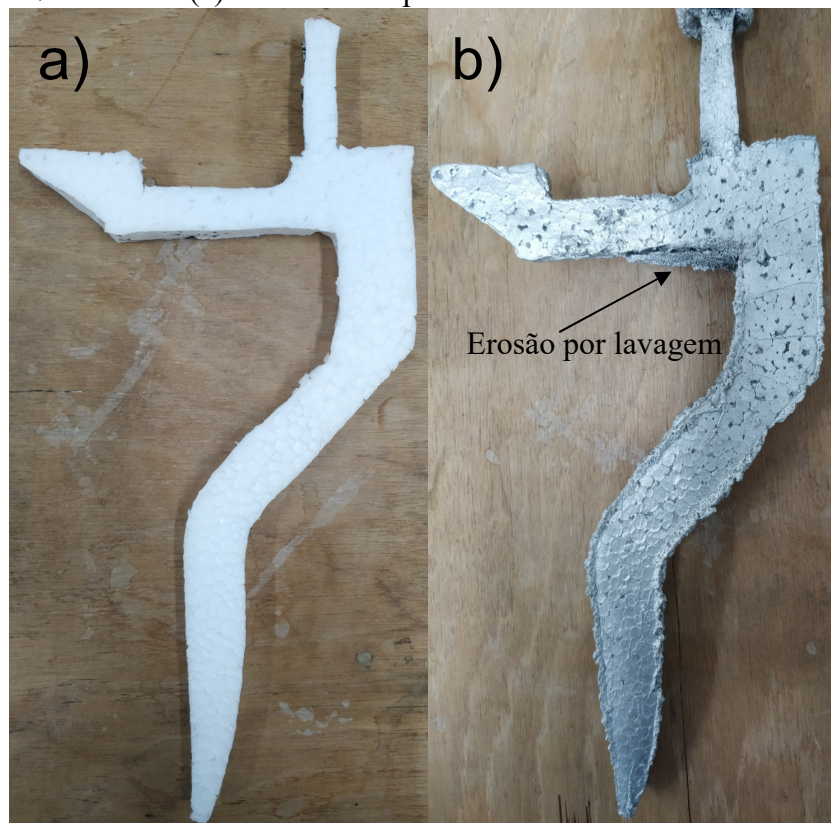
Na imagem anterior é possível notar a presença de rugosidades na peça. Elas estavam presentes em toda a superfície. Assim como no caso do modelo em L, que não foi

recoberto, este defeito é causado pelo contato do metal com a areia do molde. Grandes partes dos poros no fundido já estavam presentes no modelo.

Assim como ocorreu nas peças revestidas em forma de L, houve boa aderência do revestimento sobre o padrão adotado, não sofrendo nenhum efeito decorrente da geometria do modelo. De igual modo, o material refratário apresentou bom desempenho, continuando fixo na superfície aplicada. Esses resultados podem ser visualizados na seção anterior, figura 8. Realizado o vazamento e a desmoldagem, percebeu-se que parte do revestimento durante esta etapa já estava desprendendo-se, assim como nas peças em L.

Nota-se na figura 17, que a peça final apresentou de forma fiel o formato do modelo, não apresentando falta de preenchimento no molde, como ocorreu no processo do modelo não revestido.

Figura 17 – Modelo (a) e fundido do processo com revestimento refratário (b)



Fonte: Próprio autor (2021)

Analisando a figura 17, é possível visualizar na parte superior da peça um defeito conhecido como erosão por lavagem. Ele ocorreu quando o banho metálico ao descer pelo canal de vazamento destruiu o revestimento refratário, e escavou o molde. Este defeito fica evidente com a ampliação da imagem, como mostra a figura 18, indicado pela seta.

Figura 18 – Excesso de metal no fundido



Fonte: Próprio autor (2021)

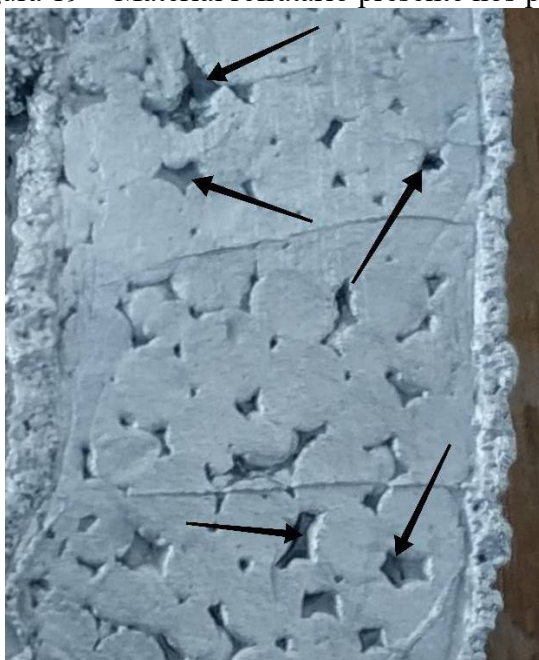
Provavelmente, o defeito apresentado na imagem ocorreu devido ao tipo de escoamento que o banho apresenta durante o vazamento, neste caso, escoamento turbulento. Como essa região fica abaixo do canal de descida, é bastante afetada pela força que o metal líquido exerce sobre ela. Logo, este problema pode ser resolvido confeccionando o canal mais a direita do molde, ou através do desenvolvimento de um canal com formato diferente, visando tornar o escoamento menos turbulento possível.

Assim como no processo do molde não revestido, o fundido apresentado na figura 18 mostra a ocorrência de penetração na areia do molde. Dessa forma, embora o revestimento confira ao molde resistência necessária para que o formato da peça seja copiado fielmente, não foi suficientemente resistente a ponto de impedir a penetração do metal. O não peneiramento da areia é algo a ser considerado, pois grãos não uniformes impedem a boa aglomeração, que por sua vez inibem uma melhor compactação gerando um molde com menos resistência. Diferentemente da peça não recoberta, essa não apresentou rugosidades.

É possível notar através das imagens anteriores que a peça apresentava bastante porosidade. Nesse caso, os poros são originados do próprio modelo e não do processo, já que os modelos apresentavam esse defeito. Com a ampliação da imagem anterior, notam-se resquícios de material refratário nos poros. Este fato corrobora com a afirmação anterior, de

que estes defeitos não são oriundos do processo, como mostra a figura 19. Dessa forma, constatou-se que até as irregularidades do modelo em poliestireno expandido foram preservadas, e que o revestimento confere ao fundido características muito próximas do modelo.

Figura 19 – Material refratário presente nos poros



Fonte: Próprio autor (2021)

Como foi dito na metodologia deste trabalho, foi realizado um segundo experimento, onde foram empregados os mesmos parâmetros, a fim de confirmar os resultados obtidos no primeiro teste. Em relação ao segundo modelo revestido, os resultados obtidos foram idênticos aos adquiridos no primeiro teste. O fundido apresentou o mesmo formato do modelo, e os defeitos apresentados no segundo (penetração, porosidade e erosão por lavagem) foram os mesmos do teste anterior. A erosão por lavagem e a penetração se repetiu, porque não foi feita a correção no canal de descida. A porosidade presente foi originada dos defeitos presentes no modelo. Já em relação à penetração, provavelmente deve-se ao fato do não peneiramento da areia, como no caso do primeiro teste. A peça obtida no segundo teste pode ser visualizada na figura 20.

Figura 20 - Peça obtida no segundo experimento



Fonte: Próprio autor (2021)

6 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um revestimento refratário para aprimorar o processo de fundição em poliestireno expandido já realizado no LaF, que permitisse a fabricação de peças maiores e com melhor acabamento superficial. O revestimento desenvolvido apresentou bons resultados nos modelos em formato de L, pois os fundidos obtidos estavam livres dos defeitos apresentados no modelo não recoberto, tais como rugosidades e algumas cavidades. Embora houvesse a presença de poros, eles já estavam presentes no modelo, sendo apenas copiados na peça. Isso mostra que o revestimento foi eficaz nesses modelos, porque conferiu à peça final pequenos detalhes e um bom acabamento superficial. O fundido originado do modelo com duplo revestimento apresentou um melhor acabamento, pois o formato das células de poliestireno expandido ficou mais nítido, em relação ao apresentado pelo fundido originado do modelo revestido por uma camada. Por esse motivo o duplo revestimento foi utilizado nos padrões com geometria diferente.

Através dos experimentos realizados nos modelos com geometria complexa, percebeu-se a importância do recobrimento refratário para o processo, pois ele permitiu que a peça final possuísse o mesmo formato do modelo adotado, resultado não obtido pelo processo já realizado no LaF e que não ocorreu com as peças não recobertas. Entretanto, o fundido do modelo revestido apresentou alguns defeitos, ausentes nos modelos em forma de L, que são originados da insuficiente resistência do molde. Segundo a literatura, estes defeitos estão relacionados com a falta de compactação da areia, ou com o revestimento utilizado. Em trabalhos futuros, pode ser avaliada a influência do peneiramento da areia na resistência do molde ou a utilização de outro tipo de areia, para os modelos revestidos. Além disso, podem ser feitos estudos para a análise dos resultados obtidos com a aplicação de uma terceira camada, ou o acréscimo de um novo componente na mistura do material refratário.

REFERÊNCIAS

AMERICAN FOUNDRY SOCIETY TECHNICAL DEPARTMENT. **Timeline of Casting Technology**. Disponível em:

<http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/NotasFundicao/LinhaTempoFundicao.pdf>. Acesso em: 30 jan. 21.

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

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

MARTINS, F. G, 2003, **Estudo da Viabilidade Técnica do Processo Molde Cheio para Fundições em Areia**. Disponível < <https://repositorio.ufsc.br/> >. Acesso em: 17 fev. 21.

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

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

LIMA, Ronaldo de Souza. **Desenvolvimento de procedimentos operacionais padrão para a criação de pequenas fundições**. 2017. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

SPADA, Alfred T. **GM Unveils Latest Lost Foam Success: Setting the bar for lost foam casters**, GM's newest venture at Saginaw Metal Casting Operations has ramped up in record time to produce cylinder heads and blocks for the firm's award-winning SUVs. (Cover Story). 2001. Disponível em: <<https://www.thefreelibrary.com/-+a081478157>>. Acesso em: 26 fev. 21.