



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

**LEONI LAERTH VASCONCELOS LIMA**

**FUNDIÇÃO DE PRECISÃO: PRODUÇÃO DE CASCA CERÂMICA A PARTIR DE  
ÓXIDO DE ALUMÍNIO E SILICATO DE SÓDIO COM APLICAÇÃO DE CO<sub>2</sub>**

**FORTALEZA**

**2022**

LEONI LAERTH VASCONCELOS LIMA

FUNDIÇÃO DE PRECISÃO: PRODUÇÃO DE CASCA CERÂMICA A PARTIR DE  
ÓXIDO DE ALUMÍNIO E SILICATO DE SÓDIO COM APLICAÇÃO DE CO<sub>2</sub>

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

Orientador: Prof. Dr. –Ing. Jeferson Leandro Klug.  
Coorientador: Msc. Samuel Lucas Santos Medeiros.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

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

---

L698f Lima, Leoni Laerth Vasconcelos.

Fundição de precisão : produção de casca cerâmica a partir de óxido de alumínio e silicato de sódio com aplicação de CO<sub>2</sub> / Leoni Laerth Vasconcelos Lima. – 2022.  
48 f. : il. color.

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

Orientação: Prof. Dr. Jeferson Leandro Klug.

Coorientação: Prof. Me. Samuel Lucas Santos Medeiros.

1. Cera perdida. 2. Casca cerâmica. 3. Corpo de prova. 4. Fundição. I. Título.

CDD 669

---

LEONI LAERTH VASCONCELOS LIMA

FUNDIÇÃO DE PRECISÃO: PRODUÇÃO DE CASCA CERÂMICA A PARTIR DE  
ÓXIDO DE ALUMÍNIO E SILICATO DE SÓDIO COM APLICAÇÃO DE CO<sub>2</sub>

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

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

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

---

Prof. Roberto Jorge Bezerra Lauriston  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico aos meus pais, Vera e Leandro, e minha vó Terezinha, que mesmo não estando mais entre nós, me ajudou e me auxiliou em toda formação do meu ser. Obrigado.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por minha vida e proteção.

Aos meus pais, Vera Lúcia e Leandro Laerth, por todo apoio, ensinamentos, todo cuidado e conforto que puderam me proporcionar ao longo da vida, foram definitivamente minha base e meu porto seguro.

Ao meu irmão, Leonardo Laerth, pelo encorajamento e força durante minha jornada de vida.

A minha namorada, Emili Borges, pelo suporte e apoio nos momentos mais difíceis, por acreditar no meu potencial e capacidade, esse amparo fez toda a diferença para que eu pudesse prosseguir, principalmente na finalização do curso.

Ao Prof. Dr. –Ing. Jeferson Leandro Klug, pela maestria e excelência orientação, amparo durante a pesquisa e ter me mostrado a beleza da fundição. Ao Técnico de Laboratório Samuel Medeiros, por toda disponibilidade e suporte deste trabalho.

Aos meus amigos Gabriel Andrade e Felipe Fonseca, por todo apoio e motivação durante o curso, pelos momentos felizes e tristes vividos que estiveram do meu lado, meu eterno obrigado.

A todos os amigos feitos durante o curso que de algum modo me ajudaram a continuar e prosseguir nos momentos difíceis, em especial Mariana Cavalcante, Emilly Oliveira, Édrio Gouveia e Gustavo Mendes, que estiveram ao meu lado em vários momentos importantes e cruciais para meu empenho.

A todos os professores que de alguma forma contribuíram na minha formação acadêmica.

A todos os servidores e professores do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará.

Ao Laboratório de Fundição (LaF) e ao Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem (LPTS) por todo apoio e suporte para elaboração do trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

## RESUMO

O processo de Fundição de Precisão, também chamado de Cera Perdida, é um processo que tem o intuito de recriar peças com alta precisão e acurácia com excelente acabamento superficial e que possibilita a aplicação de uma ampla gama de ligas metálicas. O objetivo deste trabalho é a aplicação de um novo método de casca cerâmica que utiliza Óxido de Alumínio (Alumina,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) com Silicato de Sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), em uma aplicação direta de gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) na casca cerâmica. A aplicação do gás carbônico traz inúmeros benefícios, um deles é o aumento da velocidade do processo de tempo de cura. Foram realizados testes explorando o uso do  $\text{CO}_2$  e resistência da casca cerâmica ao metal líquido, com a criação de corpos de prova. Portanto, neste trabalho, é possível concluir que a criação do novo método funciona, tanto na aplicação do  $\text{CO}_2$  por reduzir substancialmente o tempo do processo, de 5(cinco) dias para 1(um) dia, quanto por proporcionar a fundição de diferentes ligas metálicas por meio da Cera Perdida.

**Palavras-Chave:** Cera Perdida; Casca Cerâmica; Corpo de Prova; Fundição.

## ABSTRACT

The Investment Casting process, also called as Lost Wax, is a method that aims to recreate pieces with high precision and accuracy with excellent surface finish and allows the application of a wide range of metallic alloys. The objective of this work is the application of a new ceramic shell method that uses Aluminum Oxide (Alumina,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) with Sodium Silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), in a direct application of carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) on the ceramic shell. The application of carbon dioxide brings numerous benefits, one of them is the increase in the speed of the cure time. Tests were conducted exploring the use of  $\text{CO}_2$  and the resistance of the ceramic shell to liquid metal, with the creation of test specimens. Therefore, in this study, it is possible to conclude that the creation of the new method is effective, as in the application of  $\text{CO}_2$  by substantially reducing the process time, from 5 (five) days to 1 (one) day, and by providing the casting of different alloys metals through Lost Wax.

**Keywords:** Lost Wax; Ceramic shell; Test Specimen; Foundry.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Objeto de forma antropomórfica, Índia (1300-1500 a.C.).....	16
Figura 02 - Vaso para vinho em bronze, China (800 a.C.).....	17
Figura 03 - Etapas do processo de Fundição de Precisão.....	19
Figura 04 - Corpo de Prova padrão de acordo com ABNT NBR 7549.....	24
Figura 05 - Modelo em impressora 3D de um corpo de prova.....	25
Figura 06 - Dimensões do corpo de prova usado.....	26
Figura 07 - Molde de silicone.....	26
Figura 08 - Corpo de prova em cera de abelha.....	27
Figura 09 - Recipiente fechado e injeção de CO <sub>2</sub> .....	29
Figura 10 - Corpo de prova recoberto com casca cerâmica.....	30
Figura 11 - Forno Mufla.....	31
Figura 12 - Casca cerâmica fixada em areia.....	32
Figura 13 - Máquina MTS para ensaio de tração.....	34
Figura 14 - Corpo de prova após uso do spray <i>prime</i> .....	35
Figura 15 - Vista da casca cerâmica exterior (à esquerda) interior (à direita).....	36
Figura 16 - Metal líquido dentro da casca cerâmica.....	36
Figura 17 - Corpo de prova com Gota Fria.....	37
Figura 18 - Corpo de prova em cera com massalote.....	38
Figura 19 - Massalote com rechupe.....	38
Figura 20 - Porosidade do material.....	39
Figura 21 - Corpo de prova em cera com defeitos.....	39
Figura 22 - Defeito minimizado.....	40
Figura 23 - Defeito replicado no corpo de prova metálico.....	40
Figura 24 - Corpo de prova finalizado.....	41
Figura 25 - Corpos de prova após usinagem.....	43
Figura 26 - Dimensões do corpo de prova após usinagem.....	44
Figura 27 - Fratura corpo de prova Sucata de Alumínio.....	46
Figura 28 - Fratura corpo de prova Zinco-Alumínio.....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Vantagens e Desvantagens Processo CO <sub>2</sub> /Silicato de Sódio.....	20
Tabela 02 - Propriedades mecânicas das ligas de Zinco e Zinco-Alumínio de acordo com a norma ASTM B791.....	23
Tabela 03 - Quantidades e misturas de cada camada da casca cerâmica.....	28
Tabela 04 - Composição Química de Zinco-Alumínio de acordo com a literatura.....	33
Tabela 05 - Tempo estimado para criação da casca sem a utilização do (CO <sub>2</sub> ).....	42
Tabela 06 - Tempo estimado para criação da casca com a utilização do (CO <sub>2</sub> ).....	42

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 - Tensão x Deformação: Sucata de Alumínio.....	44
Gráfico 02 - Tensão x Deformação: Zinco-Alumínio (Za8).....	45

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVOS.....	15
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
3.1 Fundição.....	16
3.2 Fundição de Precisão.....	17
3.3 Processo CO <sub>2</sub> /Silicato de Sódio.....	19
3.4 Obtenção do Alumínio.....	20
3.5 Alumina fundida.....	21
3.6 Refratários.....	21
3.7 Sucata de Alumínio.....	22
3.8 Fundições de Ligas de Zinco.....	22
3.8.1 Zinco-Alumínio (ZA-8).....	22
3.9 Corpo de Prova.....	23
3.10 Ensaio de Tração.....	24
4 METODOLOGIA.....	25
4.1 Corpo de prova em 3D.....	25
4.2 Molde de Silicone.....	26
4.3 Corpo de prova em cera de abelha.....	27
4.4 Spray prime.....	27
4.5 Construção da casca cerâmica.....	28
4.6 Aplicação do gás carbônico (CO <sub>2</sub> ).....	29
4.7 Remoção da cera de abelha.....	30
4.8 Calcinação.....	31
4.9 Vazamento.....	32
4.10 Usinagem.....	32
4.11 Composição das ligas e Ensaio de tração.....	33
5 DISCUSSÃO E RESULTADOS.....	35
5.1 Estuque.....	35
5.2 Casca Cerâmica.....	36
5.3 Defeitos.....	37
5.3.1 Gota fria.....	37
5.3.2 Rechupe.....	38
5.3.3 Porosidade.....	39
5.3.4 Defeitos copiados da peça em cera.....	39
5.4 Corpo de prova.....	41
5.5 Tempo Estimado para criação da casca cerâmica.....	41
5.6 Usinagem.....	43
5.7 Ensaio de Tração.....	44

<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>47</b>
<b>7 TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>48</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>49</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A Fundição de Precisão, ou Cera Perdida, é um processo amplamente utilizado na indústria metalúrgica. A sua capacidade de replicar com precisão, em uma técnica relativamente simples, torna este processo ideal para aqueles que buscam produzir peças com acabamentos refinados.

Seu procedimento, aperfeiçoado ao longo de milênios, durante a era antiga, medieval e atual (BEELEY, 2001), desenvolveu o uso de um importante recipiente, construído através de camadas, capaz de resistir a altas temperaturas e reproduzir o modelo com grande quantidade de detalhes. Este é denominado casca cerâmica, podendo ser composta comumente de mulita, gesso, argila, etc.

Levando sua composição em consideração, as cascas cerâmicas possuem propriedades mecânicas específicas e permeabilidade a gases diferentes. Esta divergência está diretamente ligada ao material a ser aplicado em sua construção, baseada em dois fatores principais: a granulometria e o aglomerante que fará parte da solução (ABIFA, 2015; DE LUCA et al., 2000). A escolha do refratário dependerá da finalidade e intenção do processo, e deve ser selecionada com bastante atenção.

Dito isto, neste trabalho será abordada uma composição experimental de Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e Silicato de Sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) para a construção dessa casca, em uma realização do método indireto do processo de Cera Perdida. Esta escolha se baseia nas características mecânicas adequadas e uma elevada temperatura de trabalho da Alumina. Além disso, tendo sua granulometria fina em mente, este estudo visa comprovar sua capacidade de reproduzir o modelo com elevada acurácia.

Posteriormente à construção da casca, existe a etapa de secagem. Nesta etapa, a lama refratária é secada e o molde é enrijecido. Neste trabalho foi escolhido como agente de secagem a injeção de gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), que reage com o Silicato de Sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) secando o molde em poucos minutos.

Diante do que foi exposto, surge o questionamento: Como produzir cascas cerâmicas capazes de reproduzir com precisão o acabamento de um corpo de prova e de resistir ao metal fundido? O desenvolvimento deste processo se motiva pela exclusão parcial da etapa posterior de usinagem,

comumente aplicada na indústria, para tornar o processo mais econômico e rápido.

Para responder essa pergunta, foi embasado técnicas de fundição de precisão, materiais e ferramentas obtidos por meio do Laboratório de Fundição da Universidade Federal do Ceará (UFC), que já possuía métodos similares de Cera Perdida.

Então, a relevância deste trabalho se afirma principalmente na falta de registros acadêmicos relacionados aos métodos de produção de cascas cerâmicas utilizando Alumina. Este estudo busca complementar as referências sobre o assunto, além de contribuir com novas composições de refratários, sendo mais resistentes e acurados, com a finalidade de melhorar as qualidades das peças metálicas do Laboratório de Fundição (UFC).

Em adição a essa melhoria, espera-se que essa nova proposta de casca sirva para projetos futuros e estimule a comunidade acadêmica a experimentar outras alternativas no âmbito da Fundição de Precisão.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é construir uma casca cerâmica a partir da mistura de Óxido de Alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e Silicato de Sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), utilizando gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) como fator acelerante, capaz de resistir ao metal vazado e replicar com precisão o corpo de prova.

Visando complementar e aprofundar o objetivo acima, propõem-se os seguintes objetivos específicos:

- Aplicar o método de Cera Perdida na construção da casca cerâmica;
- Experimentar a combinação de Óxido de Alumínio e Silicato de Sódio na construção da casca cerâmica;
- Explorar o uso de  $\text{CO}_2$  para acelerar o processo de construção da casca.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Fundição

A fundição é um processo de transformação do metal para sua fase líquida, que, através de várias técnicas, busca modificar a sua forma. Isto é, segundo GROOVER (2014), “Fundição é um processo no qual o metal fundido flui pela força da gravidade, ou por ação de outra força, num molde em que ele solidifica com a forma da cavidade do molde”.

A origem das técnicas de fundição datam por volta de 4000-3000 a.C., que é marcada pelo começo do uso de metais como cobre, estanho e chumbo na fabricação de peças (KLIAUGA; FERRANTE, 2009).

Na Índia, as primeiras peças fundidas pertenceram à civilização Harappan [...], da qual se conhecem peças de cobre, ouro, prata e chumbo já em 3000 a.C., e onde foram desenvolvidos os cadinhos para fundição. É deste país que vêm os primeiros textos mencionando técnicas sobre a arte de extração, fusão e fundição de metais [...]. Na mesma época, as técnicas de fundição de metais e ligas eram conhecidas no Irã e na China, onde alcançaram altos níveis de perfeição e de onde se conhecem peças de bronze (2100 a.C.), sinos de alta precisão (1000 a.C.) e as primeiras peças de ferro fundido, que datam de 500 a.C. (KLIAUGA; FERRANTE, 2009, p. 22)

Para ilustrar, é possível observar nas figuras 01 e 02 exemplos de peças fundidas feitas por essas civilizações antigas.

Figura 01 - Objeto de forma antropomórfica, Índia (1300-1500 a.C.)



Fonte: Metalurgia Básica para Ourives e Designers (2009).



Figura 02 - Vaso para vinho em bronze, China (800 a.C.)



Fonte: Metalurgia Básica para Ourives e Designers (2009).

Segundo BEELEY (2001), o processo de Fundição, sendo considerado um dos mais simples na indústria metalúrgica, foi capaz de ser o pontapé inicial para o desenvolvimento de diversos produtos que utilizam suas técnicas como base. Para entender sua totalidade, é necessário conhecer não apenas suas características únicas, mas também os procedimentos que a permeiam, como a Fundição em Areia; o processo com Poliestireno Expandido; a Fundição em Molde de Gesso e a Fundição de Precisão, sendo esta última o foco deste trabalho e que iremos aprofundar.

### **3.2 Fundição de Precisão**

A Fundição de Precisão, também chamada de processo de Cera Perdida, é um método que aplica uma técnica bastante antiga para a criação de um modelo em cera que é recoberto com um material refratário (altamente resistente ao calor) para produzir o molde. Este material refratário, também chamado de casca, pode ser composto por argila mole, gesso, mulita, entre outros. O processo de Fundição de Precisão se torna relevante em virtude do seu potencial de recriar a peça em cera com perfeição para a peça em metal (FEINBERG, 1983; GROOVER, 2014).

A origem do termo “cera perdida” está diretamente ligada a parte do processo em que o modelo de cera e a casca refratária são aquecidas, resultando no derretimento da cera e “perda” do modelo. Além disso, o molde será endurecido com a alta temperatura, preparando-o para receber o metal

fundido que irá gerar um objeto igual ao modelo após sua solidificação e quebra do molde (FEINBERG, 1983).

Apesar de simples, logo no início do desenvolvimento da técnica, não apenas era perdido o modelo de cera gerado, mas também o molde utilizado para o conceber. Isso tornava o processo custoso e desprovido de praticidade, sendo essa a sua maior desvantagem. Apenas depois de muito tempo, foi introduzido por Jungersen o molde de borracha flexível, chamado de árvore-modelo na atualidade. Este solucionava sua grande dificuldade por ser reutilizável e capaz de produzir vários modelos em apenas uma aplicação (HUNT, 1980).

Este procedimento é apreciado devido sua elevada acurácia em relação aos outros processos. De acordo com BEELEY (2001), “A fundição de precisão oferece altos padrões de precisão dimensional, acabamento superficial e flexibilidade de design e, ao contrário da fundição sob pressão, é aplicável a ligas de praticamente qualquer composição”.<sup>1</sup>

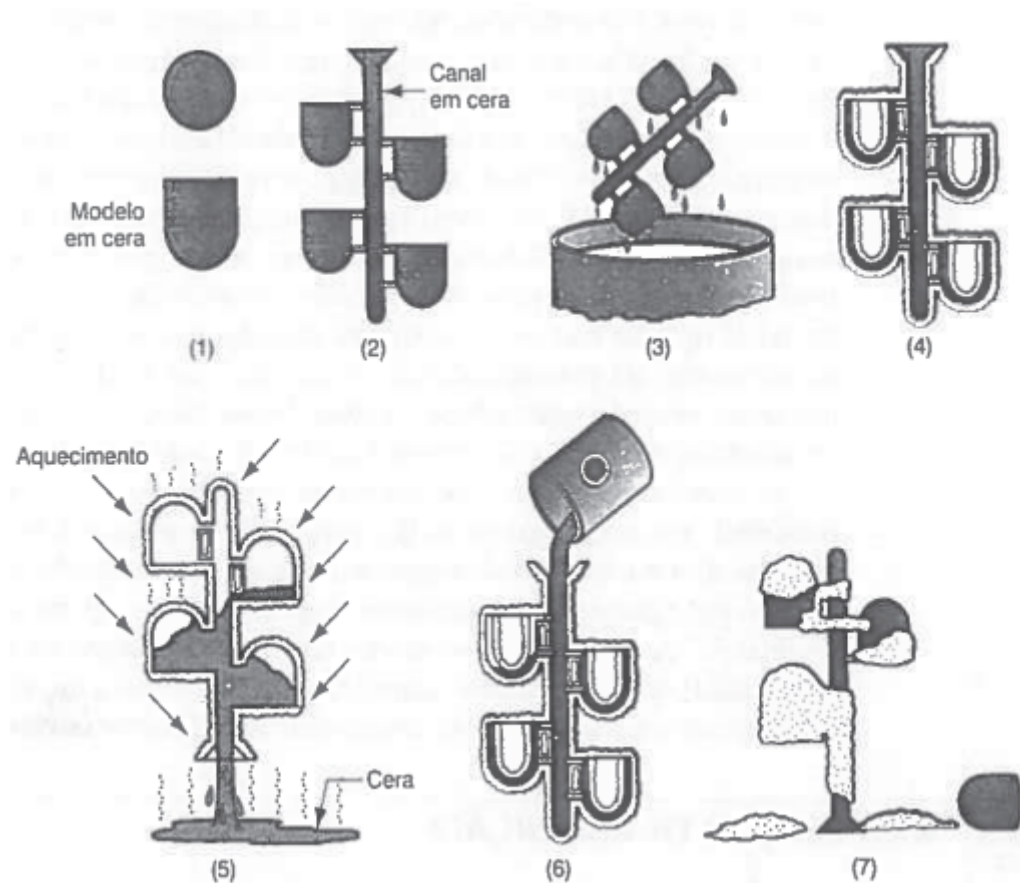
A figura 03 abaixo ilustra as etapas do processo de Fundição de Precisão. Estes passos são caracterizados por GROOVER (2014) em uma legenda:

(1) modelos de cera são produzidos; (2) vários modelos são fixados num canal para formar uma árvore-modelo; (3) a árvore-modelo é recoberta com uma fina camada de material refratário; (4) o molde é formado pelo recobrimento da árvore com novas camadas de material refratário suficientes para torná-lo rígido; (5) o molde é mantido em posição invertida e aquecido para fundir a cera e permitir que ela esorra da cavidade; (6) o molde é preaquecido a uma temperatura elevada que garanta que todos os contaminantes tenham sido eliminados do molde; também permite que o metal líquido flua mais facilmente dentro do molde; o metal fundido é vazado; ele solidifica; e (7) o molde é separado da peça fundida. (GROOVER, 2014, p. 123)

---

<sup>1</sup> Tradução livre do seguinte texto original: “Investment casting gives high standards of dimensional accuracy, surface finish and design flexibility and, unlike pressure die casting, is applicable to alloys of virtually any composition” (BEELEY, 2001).

Figura 03 - Etapas do processo de Fundição de Precisão



Fonte: Introdução aos Processos de Fabricação (2014).

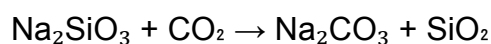
Na etapa (3) que consiste no recobrimento com refratário, o modelo em cera é mergulhado em uma lama de refratário, na forma de pó. As partículas pequenas do refratário fazem com que a camada possua pouca rugosidade copiando os detalhes. A finalização do molde (4) se dá através de alguns banhos da peça em cera no refratário (GROOVER, 2014).

### 3.3 Processo CO<sub>2</sub>/Silicato de Sódio

Nesse processo de fundição, a utilização do CO<sub>2</sub> não necessita da etapa de secagem na estufa, devido a injeção de CO<sub>2</sub> no molde, que ao reagir com o Silicato de Sódio endurece e enrijece o molde, e logo após esse processo pode ser instantaneamente usado na fundição (TÂMEGA, 2017).

Este teve sua origem na aplicação do endurecimento a frio da areia. A relação e o conjunto de reações entre o CO<sub>2</sub> e o Silicato de Sódio pode ser descrita como

A passagem do gás CO<sub>2</sub> gera ácido carbônico na solução aquosa, o próprio teor de água é reduzido, e a viscosidade é aumentada pelo fluxo do gás seco. A redução do pH causa um aumento na relação SiO<sub>2</sub> : Na<sub>2</sub>O e a formação de uma sílica gel coloidal, que endurece e forma a ligação. As reações complexas são totalmente descritas na literatura, mas o efeito geral pode ser resumido na equação (BEELEY, 2001, p. 211).



De acordo com TÂMEGA (2017), as vantagens e desvantagens desse processo estão na tabela 01 abaixo.

Tabela 01 - Vantagens e Desvantagens Processo CO<sub>2</sub>/Silicato de Sódio

Vantagens	Desvantagens
Melhor precisão dimensional	Maior dificuldade na desmoldagem devido à elevada resistência dos moldes
Maior produtividade	
Baixo custo da matéria-prima	Necessidade de cuidados na estocagem dos moldes e machos
Utilidade para alta e baixa produção	

Fonte: Fundação de Processos Siderúrgicos (2017).

### 3.4 Obtenção do Alumínio

O alumínio é obtido por meio da bauxita, que precisa ter pelo menos 30% de teor de óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), para que possa ser produzido de forma econômica. A bauxita se parece com a obtenção de outros minérios, que leva à remoção do solo orgânico, retirada das camadas superficiais do solo, extração, britagem, lavagem e secagem (Associação Brasileira do Alumínio – ABAL).

Em seguida, o minério passa pela moagem e dissolução da alumina em soda cáustica, filtra a alumina para separar o material sólido, logo após o filtrado é concentrado para cristalização da alumina, os cristais são secados, precipitados e calcinados para retirar toda água dando origem a um pó branco de alumina pura. Essa alumina pura é encaminhada para a redução, onde

ocorre o processo de redução eletrolítica conhecido também como Hall-Héroult (Associação Brasileira do Alumínio – ABAL).

### 3.5 Alumina fundida

A alumina é um material refratário e abrasivo, muito utilizado pela indústria por sua ampla capacidade de aplicações, juntamente com seu custo-benefício balanceado. Ela pode ser “Constituída por alumina fundida (99,5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ou tabular. É altamente refratária, sendo utilizada para superligas e não recomendada quando se deseja uma camada primária com alta condutividade térmica” (ABIFA, 2015). Com o advento da alumina fundida, sua aplicação nos processos metalúrgicos aumentaram consideravelmente, dada a necessidade de reproduzir e melhorar as características do corundum natural, como a alta dureza e ponto de fusão elevado (HART e LENSE, 1990; MADONO, 1999).

“É interessante apontar que a alumina foi fundida pela primeira vez em 1837 por Gaudin, para fazer rubis sintéticos em um forno a arco de laboratório alimentado por baterias” (HART e LENSE, 1990).<sup>2</sup>

Ademais, existe uma ampla variedade de aluminas fundidas disponíveis no mercado. Estas se diferenciam principalmente por sua composição e tamanho do cristal, além de se dividirem em seis tipos: marrom; branca; rosa e rubi; monocristalina; alumina de zircônia; e preta (HART e LENSE, 1990).

### 3.6 Refratários

Materiais refratários, tem como principal objetivo resistir a altas temperaturas e que possam suportar em geral, ataques químicos, fortes variações de temperaturas e outros (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA).

De acordo com CALLISTER (2016), a porosidade é um dos fatores principais de um refratário, com a diminuição da porosidade, fatores como resistência à corrosão e resistência mecânica aumentam e as características de isolamento térmico e a resistência a choques térmicos são diminuídas.

---

<sup>2</sup> Tradução livre do seguinte texto original: “It is interesting to note that alumina was first fused in 1837 by Gaudin,<sup>7</sup> to make synthetic rubies in a laboratory arc furnace powered by batteries” (HART e LENSE, 1990, p. 393).

### **3.7 Sucata de Alumínio**

Qualquer tipo de material de alumínio pode ser reciclado utilizando o processo de fundição, porém, cerca de 10% do alumínio é perdido devido a oxidação ser mais intensa que no metal primário, certa de 1% no lingote. A reciclagem do alumínio resulta em vantagens econômicas e ecológicas, possui um valor de unidade de massa elevado comparado a outros materiais ferrosos (BARBOSA, 2014).

### **3.8 Fundições de Ligas de Zinco**

As ligas de zinco fundidas, são obtidas em diversos processos de fundição, como por exemplo em Fundição por Pressão, Fundição por Areia, Cera perdida dentre outros. Na maioria dos casos de peças fundidas de ligas de zinco a resistência à corrosão não é uma propriedade relevante. (BARBOSA, 2014)

É necessário um cuidado elevado ao manusear estas ligas, para evitar a contaminação por absorção de alguns elementos como chumbo, cádmio, estanho e ferro, dentre outros. Em relação ao forno utilizado, deve-se atentar com seu uso, pois fornos dedicados a ligas de alumínio e cobre apresentam características desfavoráveis as ligas de zinco. Complementar a isto, o uso de sucata como matéria-prima na fundição que seja no máximo 50% da carga utilizada para evitar defeitos na peça fundida (ASM, 1992).

#### **3.8.1 Zinco-Alumínio (ZA-8)**

A liga de Zinco-Alumínio (ZA-8), que possui de 8,2% a 8,8% de Alumínio, é a única entre as ligas hipereutéticas que pode ser fundida em matriz aquecida, juntamente com as ligas hipoeutéticas. A liga de ZA-8 se equipara a liga de n.2 em diversas características, porém ela apresenta uma melhor resistência a tração e a fadiga, e também possui uma estabilidade dimensional. Peças de ZA-8 fundidas podem ser prontamente acabadas combinando assim sua alta resistência estrutural com excelente aparência (ASM, 1992).

Abaixo na tabela 02, mostra as propriedades mecânicas das ligas de Zinco e Zinco-Alumínio, com base na ASTM B791.

Tabela 02 - Propriedades mecânicas das ligas de Zinco e Zinco-Alumínio de acordo com a norma ASTM B791

Commercial: ASTM: Mechanical Properties	Zamak Die Casting Alloys				ZA Die Casting Alloys		
	No. 2	No. 3 AG-40A	No. 5 AC-41A	No.7 AG-40B	ZA-8	ZA-12	ZA-27
<b>Ultimate Tensile Strength</b> ksi (MPa)	52 (359)	41 (283)	48 (328)	41 (283)	54 (372)	59 (400)	62 (426)
<b>Yield Strength<sup>Ⓢ</sup></b> ksi (MPa)	41 (283)	32 (221)	39 (269)	32 (221)	41-43 (283-296)	45-48 (310-331)	52-55 (359-379)
<b>Compressive Yield Strength<sup>Ⓢ</sup></b> ksi (MPa)	93 (641)	60 <sup>Ⓢ</sup> (414)	87 <sup>Ⓢ</sup> (600)	60 <sup>Ⓢ</sup> (414)	37 (252)	39 (269)	52 (358)
<b>Elongation</b> % in 2 in. (51 mm)	7	10	7	13	6-10	4-7	2.0-3.5
<b>Hardness<sup>Ⓢ</sup></b> BHN	100	82	91	80	100-106	95-105	116-122
<b>Shear Strength</b> ksi (MPa)	46 (317)	31 (214)	38 (262)	31 (214)	40 (275)	43 (296)	47 (325)
<b>Impact Strength</b> ft-lb (J)	35 (47.5)	43 <sup>Ⓢ</sup> (58)	48 <sup>Ⓢ</sup> (65)	43 <sup>Ⓢ</sup> (58)	24-35 <sup>Ⓢ</sup> (32-48)	15-27 <sup>Ⓢ</sup> (20-37)	7-12 <sup>Ⓢ</sup> (9-16)
<b>Fatigue Strength<sup>Ⓢ</sup></b> ksi (MPa)	8.5 (58.6)	6.9 (47.6)	8.2 (56.5)	6.9 (47.6)	15 (103)	—	21 (145)
<b>Young's Modulus</b> psi x 10 <sup>6</sup> (GPa)	Ⓢ	Ⓢ	Ⓢ	Ⓢ	12.4 (85.5)	12 (83)	11.3 (77.9)

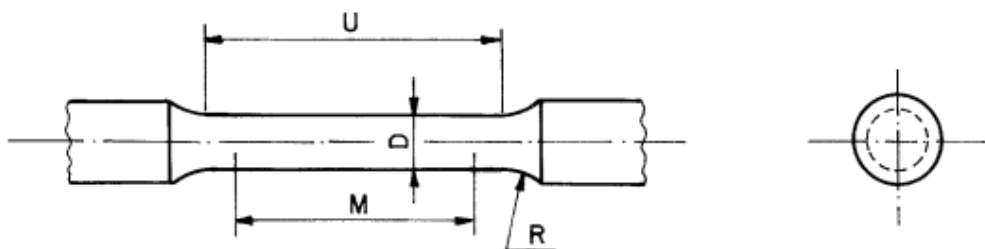
Fonte: ASTM B791 (1997).

### 3.9 Corpo de Prova

De acordo com a ABNT NBR 7549 (Alumínio e suas ligas - Ensaio de tração dos produtos dúcteis e fundidos, 2001), corpo de prova é definido como material ou produto, que possui dimensões e formas padronizadas e é sujeito a ensaios. A figura 04 ilustra as especificações do corpo de prova.

O comprimento entre marcas deve ser igual a cinco vezes o diâmetro nominal. Nas normas de especificações dos produtos, podem ser especificados outros tipos de corpo-de-prova; entretanto, se não for mantida a relação nominal de 5:1, os valores de alongamento após ruptura podem não ser comparáveis com aqueles obtidos usando o corpo-de-prova padrão. (ABNT NBR 7549, 2001, p. 09)

Figura 04 - Corpo de Prova padrão de acordo com ABNT NBR 7549



Medida	Dimensões mm			
	Corpo-de-prova padrão	Corpos-de-prova reduzidos, proporcionais		
Diâmetro nominal	12,50	9	6	4
M - Comprimento entre marcas <sup>1), 2)</sup>	62,50 ± 0,10	45,00 ± 0,09	30,00 ± 0,06	20,00 ± 0,04
D - Diâmetro <sup>3)</sup>	12,50 ± 0,25	9,00 ± 0,10	6,00 ± 0,10	4,00 ± 0,05
R - Raio de concordância mínimo <sup>1)</sup>	9	8	6	4
U - Comprimento útil mínimo <sup>4)</sup>	75	54	36	24

Fonte: ABNT NBR 7549 (2001)

### 3.10 Ensaio de Tração

O ensaio de tração é um ensaio destrutivo para definir as curvas de tensão vs deformação do material. Um corpo de prova é deformado até sua fratura por uma carga de tração que aumenta aos poucos e é aplicada ao longo de um eixo do corpo de prova (CALLISTER, 2016).



## 4 METODOLOGIA

Levando em consideração os objetivos deste trabalho, esta seção dedica-se a utilizar o método de Estudo de Caso para analisar o fenômeno do CO<sub>2</sub> na construção da casca cerâmica, com o propósito de aprofundar as pesquisas sobre o assunto.

Em uma abordagem exploratória, será conduzido um processo baseado no método de Cera Perdida descrito por BEELEY (2001) em *Foundry Technology*.

### 4.1 Corpo de prova em 3D

Primeiramente, para cumprir o objetivo geral, será utilizado um modelo de corpo de prova em 3D, ilustrado na figura 05, já existente no laboratório de Fundição, que servirá como base para criação das peças pelo método de Cera Perdida.

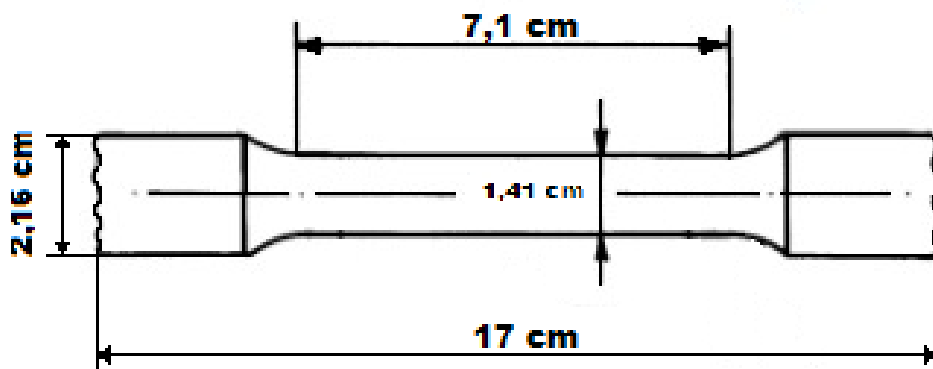
Figura 05 - Modelo em impressora 3D de um corpo de prova



Fonte: Autoria própria (2022).

As dimensões do corpo de prova estão ilustradas na figura 06 abaixo:

Figura 06 - Dimensões do corpo de prova usado



Fonte: A autoria própria (2022).

## 4.2 Molde de Silicone

O modelo 3D, como dito anteriormente, terá como propósito a formação de um molde reutilizável de silicone. Em um recipiente de tamanho maior que a peça original, esta será banhada por uma mistura de silicone, da marca Polisil Industria e Comercio de Silicone Ltda., com um catalisador, em uma proporção de a cada 1 quilograma de silicone utilizar 30 gotas do catalisador. Este molde irá descansar por um tempo de cura (secagem) de 02 a 04 horas, e somente utilizar o molde após 24 horas de desenformado, o molde (como mostra na figura 07) servirá para a criação de peças em cera posteriormente.

Figura 07 - Molde de silicone

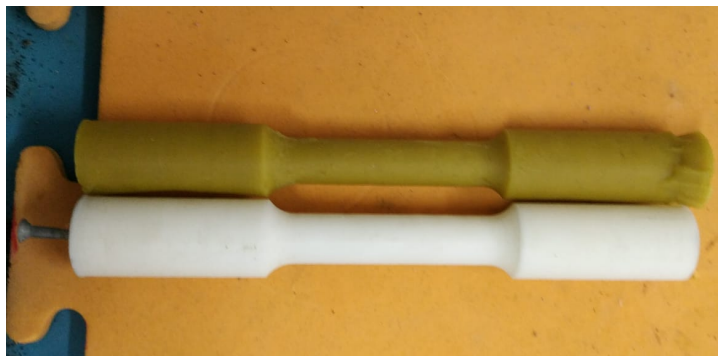


Fonte: A autoria própria (2022).

### 4.3 Corpo de prova em cera de abelha

Após o molde de silicone finalizado, a cera de abelha é derretida e vazada dentro do molde, com um tempo de secagem de 10 minutos, depois da secagem o corpo de prova em cera é retirado do molde, na figura 08 é mostrado o corpo de prova em cera ao lado do corpo de prova em 3D.

Figura 08 - Corpo de prova em cera de abelha



Fonte: Autoria própria (2022).

### 4.4 Spray *prime*

Antes do processo de deposição das camadas iniciar, foi utilizado um spray *prime* no corpo de prova, de acordo com o modo de uso, foram feitas duas demão de spray na peça, o intervalo entre a primeira e segunda demão foram de 15 minutos, o tempo de secagem após a segunda demão ocorreu após 24 horas.

A utilização desse spray se deve por conta da polaridade da cera de abelha, sendo a cera de abelha apolar e o silicato de sódio é polar, com o uso do spray foi possível obter interações eletrostáticas devido o *prime* ter composto de material orgânico com alguns grupamentos polares, a parte polar do *prime* interage com a superfície da cera por interações fracas. A parte polar contida em grupamentos do *prime*, interagem do mesmo modo com silicato de sódio para conseguir unir o silicato de sódio no corpo de prova em cera, permitindo uma ancoragem entre os dois materiais.

A composição química do *prime* se dá por: Resinas alquídicas, cargas minerais, nitrocelulose, aditivos, pigmentos inorgânicos e orgânicos, solventes oxigenados e hidrocarbonetos.

#### 4.5 Construção da casca cerâmica

A seguir, deu início ao processo de construção da casca cerâmica, o total de camadas utilizadas foram de 04 camadas, sendo as duas iniciais feitas com Alumina 100 mesh (unidade de granulometria) 100 gramas e 33 gramas de silicato de sódio cada camada e as duas últimas com alumina 60 mesh 100 gramas e 33 gramas de silicato de sódio cada camada, como mostra na tabela 03 a seguir.

Tabela 03 - Quantidades e misturas de cada camada da casca cerâmica

	Alumina (100 mesh)	Alumina (60 mesh)	Silicato de Sódio (gramas)
1º Camada	100 gramas	x	33
2º Camada	100 gramas	x	33
3º Camada	x	100 gramas	33
4º Camada	x	100 gramas	33

Fonte: Aatoria própria (2022).

O processo de deposição da mistura no corpo de prova foi por meio de pincelamento. As duas primeiras camadas aplicadas de óxido de alumínio 100 mesh, serviu para melhorar o acabamento superficial do corpo de prova, porém como é uma granulometria muito fina, tem pouca resistência mecânica para aguentar o vazamento do metal líquido.

Com isso, foi necessário utilizar nas duas últimas camadas óxido de alumínio de 60 mesh, com uma granulometria maior é possível obter a resistência mecânica que faltava usando a alumina 100 mesh, dessa forma a casca cerâmica é capaz de resistir às tensões geradas no vazamento do metal líquido sem que haja trincas.

Entre o término da primeira e segunda camada, utilizou-se um estuque feito da mistura das duas granulometrias disponíveis (100 e 60 mesh), polvilhando na ao redor da casca, para ajudar nas saídas de gases no momento de calcinação e vazamento, evitando possíveis trincas e tensões geradas nessas respectivas etapas.

#### 4.6 Aplicação do gás carbônico (CO<sub>2</sub>)

No processo de construção da casca, após a finalização de cada camada da peça em cera, foi aplicado gás carbônico (CO<sub>2</sub>) no corpo de prova em um recipiente fechado, por 20 segundos em uma vazão extremamente baixa, ao final da aplicação do CO<sub>2</sub>, é esperado um intervalo de 10 minutos para o tempo de cura, conforme mostra na figura 09.

Figura 09 - Recipiente fechado e injeção de CO<sub>2</sub>



Fonte: Autoria própria (2022).

Este tempo de 10 minutos é suficiente para o CO<sub>2</sub> reagir com o silicato de sódio e provocar o endurecimento do molde, deixando-o pronto para as próximas etapas da casca cerâmica.

O tempo estimado para finalizar uma casca, é de 1 dia para utilização do spray e em torno de 10 minutos para o tempo de cura de cada camada, totalizando aproximadamente 1 dia e 40 minutos para obter a casca cerâmica.

A utilização do CO<sub>2</sub> no processo se deve ao fato que no ar atmosférico consta somente 0,035% de concentração do CO<sub>2</sub>, com base nos testes realizados sem a injeção de dióxido de carbono diretamente na peça, foi necessário 24 horas de tempo de cura a cada camada da casca cerâmica, devido a baixa concentração de CO<sub>2</sub> no ar atmosférico. Cada casca precisaria de 4 dias para ser finalizada, tornando inviável o processo.

Uma das grandes vantagens da utilização de silicato de sódio na fundição é que não gera risco de gases tóxicos na atmosfera e de contaminação ambiental, além de ser barato e de fácil manuseio.

Na figura 10 temos a finalização do processo de deposição da casca cerâmica, nessa etapa é importante avaliar visualmente a casca e analisar se está uniforme e sem possíveis pontos de tensão que possam gerar trincas nas próximas etapas do procedimento.

Figura 10 - Corpo de prova recoberto com casca cerâmica



Fonte: Autoria própria (2022).

#### **4.7 Remoção da cera de abelha**

Após essa etapa de deposição por pincelamento, é necessário tirar a cera de abelha que está dentro da casca. O meio utilizado para retirar a cera foi com o auxílio de um forno mufla (figura 11) adaptado com pequenas aberturas dentro do forno para que os gases emitidos possam sair para atmosfera e não prejudicar o funcionamento do forno.

Figura 11 - Forno Mufla



Fonte: Autoria própria (2022).

Para retirar a cera de abelha da casca, é preciso deixá-la dentro do forno mufla por 30 minutos a uma temperatura de 130 °C. Nesta etapa é crucial que a casca tenha um bom acabamento e uma boa resistência mecânica, pois a cera de abelha quando começa a fundir ela se expande, caso a casca não tenha uma uniformidade adequada poderá gerar trincas no momento que a cera expandir, inviabilizando a casca.

#### **4.8 Calcinação**

Em seguida, a próxima etapa é a calcinação, que tem como objetivo retirar algum resquício de cera remanescente, remover compostos voláteis e impurezas indesejadas da casca cerâmica. Para isso, novamente o forno mufla adaptado foi utilizado, pois nesta etapa com a evaporação de resíduos de cera e impurezas, gerando gases.

Neste procedimento, coloca-se a casca cerâmica dentro do forno, não é necessário um pré-aquecimento, e se programa um aquecimento até temperatura de 750 °C, ao chegar na temperatura indicada o forno é desligado e a peça é resfriada lentamente dentro do forno aquecido, este processo varia de forno para forno, utilizando o forno mufla levou aproximadamente 3 horas.

#### 4.9 Vazamento

Com a finalização da etapa de calcinação, a casca está finalizada para o vazamento do metal líquido. Para o procedimento de vazamento é necessário assentar a casca em areia, como mostra na figura 12, é importante inclinar um pouco a casca para que diminua a colisão e a turbulência do metal fluido no fundo da casca.

Figura 12 - Casca cerâmica fixada em areia



Fonte: Autoria própria (2022).

Depois de fixar a peça em um recipiente de areia, o metal escolhido é fundido dentro do forno mufla e vazado lentamente dentro da casca cerâmica. A seguir, espera-se 20 minutos resfriando ao ar, e logo após é retirado a casca cerâmica com auxílio de uma ferramenta com ponta para despedaçar a casca que sai facilmente após alguns impactos, e então o corpo de prova é finalizado.

#### 4.10 Usinagem

Os corpos de prova foram usinados para diminuir suas dimensões com intuito de se adequar a máquina de tração existente no Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem (LPTS).



#### 4.11 Composição das ligas e Ensaio de tração

Por fim, a composição do corpo de prova da liga de Sucata de Alumínio é desconhecida e a do corpo de prova da liga de Zinco-Alumínio (Za8) é a mesma da literatura ilustrada na tabela 04 abaixo.

Tabela 04 - Composição Química de Zinco-Alumínio de acordo com a literatura

Liga Comum	Liga UNS	Al	Cu	Mg	Fe máx.	Pb máx.	Cd máx.	Sn máx.	Zn
Peças Fundidas (ASTM B791)									
ZA-8	Z35.636	8,0-8,8	0,8-1,3	0,015-0,030	0,075	0,006	0,006	0,003	Bal.

Fonte: Metais não Ferrosos e suas Ligas: Microestrutura, Propriedades e Aplicações (2014).

Então, os corpos de provas são levados para os testes de tração, que têm como objetivo verificar se os corpos de prova estão próximos do que indica a literatura, além de observar as mudanças em seu comportamento, por ser um material fundido.

O ensaio de tração foi feito em uma máquina MTS realizada pelo Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem (LPTS), como ilustra a figura 13.

Figura 13 - Máquina MTS para ensaio de tração



Fonte: Autoria própria (2022).

## 5 DISCUSSÃO E RESULTADOS

Com a quebra da casca cerâmica e retirada da peça metálica, é possível analisar mais detalhadamente sua geometria e o seu acabamento superficial ao fim do processo.

Inicialmente, foi feito a deposição da mistura de Alumina com Silicato de Sódio sem a utilização de detergente neutro, porém pela polaridade da cera de abelha e do Silicato de Sódio serem opostas, a mistura não adere a peça em cera que torna inviável a sua tentativa de deposição. Ao aplicar o detergente é possível unir a mistura com a peça em cera.

Contudo, mesmo utilizando o detergente, ainda assim uma pequena parte do material escorria, o que dificultava o processo. Foi então que surgiu a necessidade de utilizar um novo componente para conseguir melhorar a aderência, para isso foi utilizado o spray *prime* que é normalmente usado em pré tinturas de automóveis, conforme mostrado na figura 14 abaixo.

Figura 14 - Corpo de prova após uso do spray *prime*



Fonte: Autoria própria (2022).

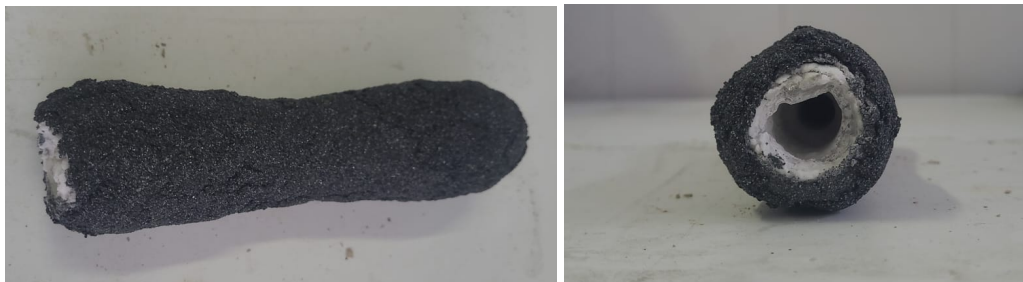
### 5.1 Estuque

Em todos os corpos de prova, foram aplicados estuques de uma mistura de Alumina 100 mesh e 60 mesh, polvilhando por toda sua superfície nas duas primeiras camadas, com intuito de ajudar as saídas de gases decorrente do processo de fundição, o estuque também aumenta a resistência da casca cerâmica quando o material é sujeitado a altas temperaturas. Quando não utilizado o estuque, a camada ficava com baixa resistência e o material estava sujeito a trincas.

## 5.2 Casca Cerâmica

É possível notar por inspeção visual, que a casca cerâmica conseguiu suportar as tensões geradas com a expansão da cera líquida no derretimento da cera, como também na etapa de calcinação, como mostra a Figura 15 abaixo.

Figura 15 - Vista da casca cerâmica exterior (à esquerda) interior (à direita)



Fonte: Autoria própria (2022).

Atingindo o seu propósito final resistindo ao metal líquido fundido, sem que haja qualquer sinal de fragilidade da casca cerâmica, conforme é ilustrado na figura 16:

Figura 16 - Metal líquido dentro da casca cerâmica



Fonte: Autoria própria (2022).

### 5.3 Defeitos

Após a remoção do corpo de prova metálico, é possível observar alguns defeitos em relação a gota fria, rechupe, porosidade e defeitos advindos da peça em cera.

#### 5.3.1 Gota fria

Com a etapa de vazamento em condições pouco favoráveis, como por exemplo longo tempo percorrido de saída do forno até o vazamento do metal no corpo de prova, diminuindo consideravelmente a temperatura do metal líquido, diminuindo sua fluidez, dentre outras.

A gota fria se deve ao fato do vazamento ser rápido demais, isso faz com que o metal líquido ao chegar na parte inferior da casca, ele se esparrama e se espalha nas paredes da casca, com isso resulta em uma solidificação precoce de pequenas gotas de metal no material, ilustrado na figura 17 abaixo.

Figura 17 - Corpo de prova com Gota Fria



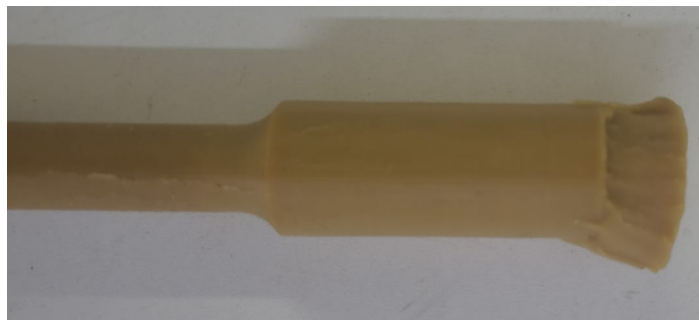
Fonte: Autoria própria (2022).

Este defeito pode ser resolvido utilizando um cadinho menor com uma maior facilidade de manuseio, para controlar e diminuir a velocidade de vazamento, evitando o impacto do metal líquido com a extremidade interna da casca, como também pré-aquecendo a casca cerâmica antes do vazamento, que evita que o gradiente de temperatura seja muito elevado.

### 5.3.2 Rechupe

O rechupe ocorre devido a contração volumétrica do material após sua solidificação. Para isso foi necessário utilizar um massalote no corpo de prova em cera na região crítica (no topo) onde fica a última região a ser solidificada, como mostra as figuras 18 e 19 abaixo.

Figura 18 - Corpo de prova em cera com massalote



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 19 - Massalote com rechupe



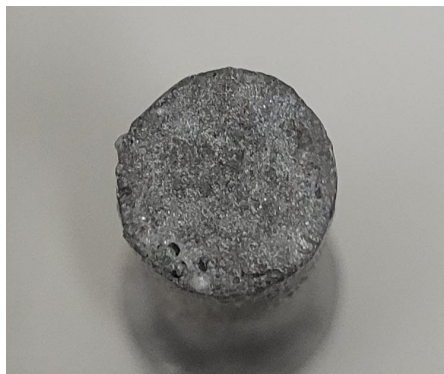
Fonte: Autoria própria (2022).

O massalote resolve o problema do rechupe após o vazamento do metal líquido, com o defeito permanecendo apenas no massalote, é possível retirá-lo com um simples corte.

### 5.3.3 Porosidade

Após feito o ensaio de tração, tópico que será discutido com mais detalhes posteriormente, é possível observar por inspeção visual a luz branca, que o corpo de prova possui porosidade elevada, a figura 20 apresenta a porosidade do material.

Figura 20 - Porosidade do material



Fonte: Autoria própria (2022).

Essa porosidade advém das condições de fundição não favoráveis, que permite que o oxigênio e outros gases não saiam do metal líquido e se tornem poros após a solidificação.

### 5.3.4 Defeitos copiados da peça em cera

O molde de silicone possui irregularidades que ao vazar a cera líquida dentro, o corpo de prova formado em cera também fica com imperfeições, ilustrado na figura 21, que são reproduzidas no corpo de prova metálico, copiando seus defeitos.

Figura 21 - Corpo de prova em cera com defeitos



Fonte: Autoria própria (2022).

Este defeito pode ser solucionado recriando um molde de silicone em perfeito estado ou esculpindo o modelo em cera manualmente, retirando os defeitos antes de começar o processo. Neste caso, foi gotejado cera líquida em cima do defeito e feito o lixamento para minimizar o defeito, conforme a figura 22 a seguir:

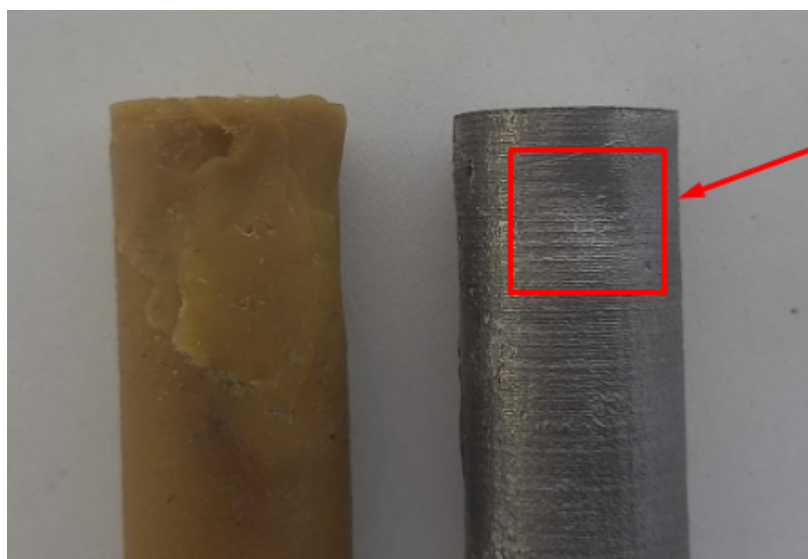
Figura 22 - Defeito minimizado



Fonte: Autoria própria (2022).

Mesmo com a tentativa de amenizar o defeito recriado do molde de silicone, ainda é replicado parte da irregularidade no corpo de prova metálico, ilustrado na figura 23.

Figura 23 - Defeito replicado no corpo de prova metálico



Fonte: Autoria própria (2022).



#### 5.4 Corpo de prova

Após a retirada do corpo de prova da casca cerâmica e feito as inspeções visuais no material, e feito a inspeção visual, o corpo de prova é lixado para melhorar o aspecto visual e refeito a inspeção visual. Com isso o corpo de prova é finalizado, visto na figura 24 abaixo.

Figura 24 - Corpo de prova finalizado



Fonte: Autoria própria (2022).

Os defeitos visuais na superfície do corpo de prova em metal, se dá devido à pré-existência do defeito no corpo de prova em cera, que foi então copiado para o corpo de prova metálico, devido ao método de cera perdida ser preciso, por isso a necessidade das perfeitas condições da cera de abelha e de todas as etapas do processo para que o material fique longe de defeitos.

#### 5.5 Tempo Estimado para criação da casca cerâmica

Para criação da casca cerâmica finalizada, são necessárias algumas etapas que demandam um certo período de trabalho. Foram realizados testes com e sem a utilização do gás carbônico para averiguar o tempo necessário para finalização do processo em cada situação. Abaixo, nas tabelas 05 e 06, segue uma comparação do tempo estimado para a criação do corpo de prova com e sem a utilização do (CO<sub>2</sub>).

Tabela 05 - Tempo estimado para criação da casca sem a utilização do (CO<sub>2</sub>)

<b>Sem a utilização do (CO<sub>2</sub>)</b>	
<b>Etapas</b>	<b>Tempo de Cura</b>
1ª e 2ª Demão do spray <i>prime</i>	Início (24 horas)
1º Camada mistura refratária	24 horas
2º Camada mistura refratária	24 horas
3º Camada mistura refratária	24 horas
4º Camada mistura refratária	24 horas
Retirar a cera da casca	30 minutos
Calcinação	03 horas
Vazamento do Metal	Imediato
<b>Total</b>	<b>≅ 5 dias</b>

Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 06 - Tempo estimado para criação da casca com a utilização do (CO<sub>2</sub>)

<b>Com a utilização do (CO<sub>2</sub>)</b>	
<b>Etapas</b>	<b>Tempo de Cura</b>
1ª e 2ª Demão do spray <i>prime</i>	Início (24 horas)
1º Camada mistura refratária	10 minutos
2º Camada mistura refratária	10 minutos
3º Camada mistura refratária	10 minutos
4º Camada mistura refratária	10 minutos
Retirar a cera da casca	30 minutos
Calcinação	03 horas
Vazamento do metal	Imediato
<b>Total</b>	<b>≅ 1 dia</b>

Fonte: Autoria própria (2022).

Entende-se como 1ª e 2ª Demão do spray, um prazo de tempo de cura de 24 horas iniciais após a realização da camada de tinta no corpo de prova em cera. Vale ressaltar que a 1ª demão possui um tempo de cura de 15 minutos para iniciar a 2ª demão. O intuito das tabelas é apenas para comparar o prazo estimado em dias, por isso as frações de horas foram desconsideradas.

Cabe destacar que a etapa anterior de construção do molde de silicone também possui um tempo de cura de 24 horas, porém como o molde é reutilizável só é necessário a construção do molde uma vez, por esse motivo esta etapa não entrou na contagem das tabelas.

## 5.6 Usinagem

Devido ao fato das dimensões do modelo do corpo de prova em 3D serem diferentes do que se diz a norma da ABNT NBR 7549, foi necessário uma etapa de Usinagem para reduzir as dimensões do corpo de prova obtido e pela razão do corpo de prova em cera possuir defeitos prévios que foram copiados pelo corpo de prova metálico. Abaixo na figura 25 apresenta os corpos de prova após usinagem.

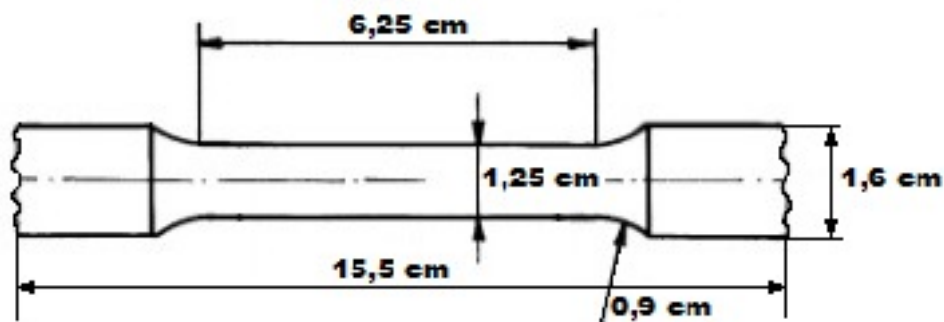
Figura 25 - Corpos de prova após usinagem



Fonte: Autoria própria (2022).

Os corpos de prova foram usinados com as devidas dimensões apropriadas para ensaios de tração de ligas de alumínio fundidos. A usinagem foi feita em um torno mecânico. A figura 26 ilustra o desenho técnico do corpo de prova fundido após a usinagem.

Figura 26 - Dimensões do corpo de prova após usinagem



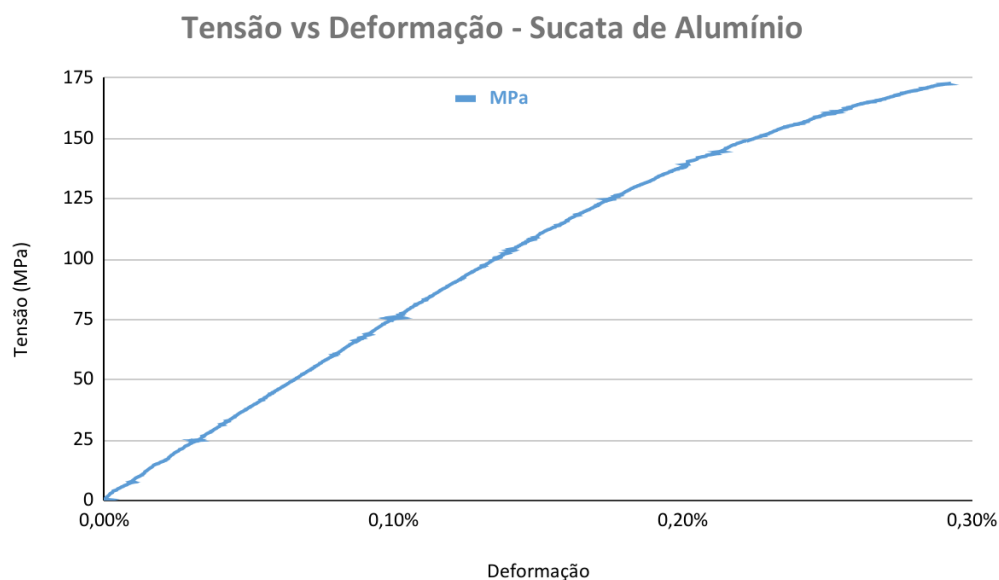
Fonte: Autoria própria (2022).

## 5.7 Ensaio de Tração

Ao ser finalizado, o corpo de prova está apto para realizar o ensaio de tração, com intuito de levantar as curvas de tensão vs deformação e comparar o seu resultado com a literatura.

O primeiro a ser ensaiado foi o corpo de prova de Sucata de Alumínio, que apresentou o seguinte gráfico 01 tensão x deformação.

Gráfico 01 - Tensão x Deformação: Sucata de Alumínio



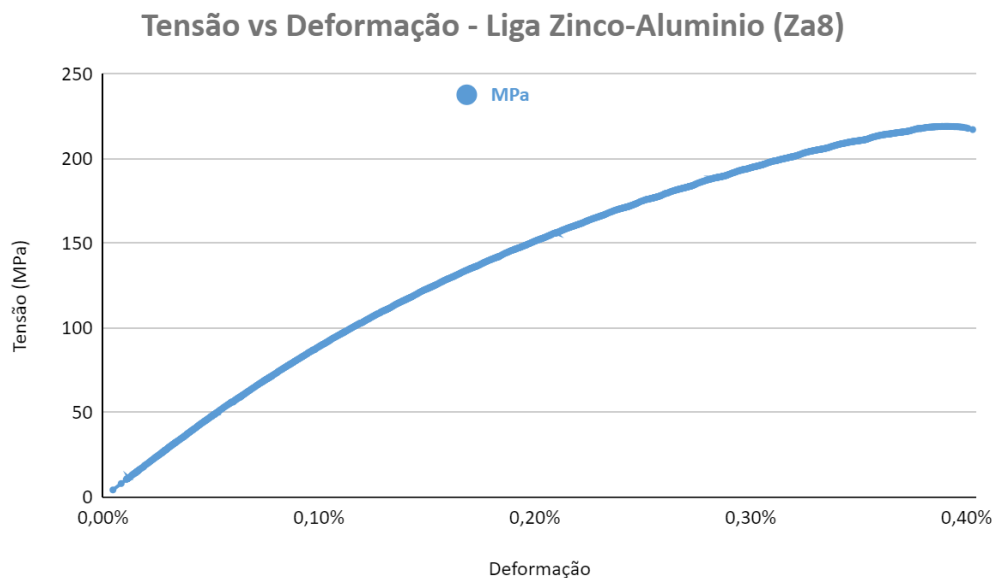
Fonte: Autoria própria (2022).

De acordo com o gráfico 01, podemos afirmar que o material se comportou como frágil, em virtude da sua baixa deformação que chegou a 0,29% e a tensão máxima de 172,80 MPa. Com um alto teor de cobre presente esperava-se um maior limite de resistência à tração, por conta dos defeitos

existentes no corpo de prova, não foi possível obter uma análise mais profunda.

Posteriormente, foi ensaiado o outro corpo de prova. O gráfico 02 a seguir mostra a curva tensão x deformação para a liga de Zinco-Alumínio.

Gráfico 02 - Tensão x Deformação: Zinco-Alumínio (Za8)



Fonte: Autoria própria (2022).

Ao analisar o gráfico 02, é encontrado o mesmo problema ao se comportar como material frágil, o máximo de limite de resistência à tração foi de 217,30 MPa e uma deformação de 0,40%. De acordo com a literatura, era esperado um limite de resistência à tração de 372 MPa e deformação de 6% a 10%.

Também vale ressaltar, que as condições de fundição para criação dos corpos de prova não foram ideais, como turbulência, oxigênio preso no metal líquido que gerou poros internos, demora para vazamento que resulta em perda de temperatura precoce, todas essas indicações converte-se em falhas no material, que fez com que distanciar-se os dados obtidos com o da literatura.

As figuras 27 e 28 abaixo representam o momento da fratura dos corpos de prova no ensaio de tração.

Figura 27 - Fratura corpo de prova Sucata de Alumínio



Fonte: Aatoria própria (2022).

Figura 28 - Fratura corpo de prova Zinco-Alumínio



Fonte: Aatoria própria (2022).

O corpo de prova de Sucata de Alumínio, na figura 27, rompeu no comprimento entre as marcas e com o comportamento frágil. Já na figura 28, o corpo de prova da liga de Zinco-Alumínio (Za8), não rompeu no comprimento entre as marcas, indicando um defeito nesta região, como os limites de impurezas foram excedidos, a liga estava sujeita a falha prematuramente por empenamento e trincamento.

## 6 CONCLUSÃO

O método de Cera Perdida é uma técnica bastante consolidada ao longo dos anos, que possui um valor de destaque inegável no ramo da Fundição. Nesta aplicação do método, averiguou-se novas possibilidades para o uso da Cera Perdida, sendo apuradas facilidades e dificuldades à medida em que a análise foi conduzida.

Após a finalização da pesquisa, é possível constatar que, a partir da criação do método utilizado para criar a mistura refratária de Óxido de Alumínio (60 mesh e 100 mesh) e Silicato de Sódio, pode-se alcançar o objetivo geral deste trabalho de “construir uma casca cerâmica a partir do uso de gás carbônico (CO<sub>2</sub>), capaz de resistir ao metal vazado e replicar com precisão o corpo de prova.” e o objetivo específico “Experimentar a combinação de Óxido de Alumínio e Silicato de Sódio na construção da casca cerâmica.”

Como também, com os testes realizados pode-se comprovar que a aplicação do gás carbônico (CO<sub>2</sub>) na mistura refratária, influencia diretamente no Silicato de Sódio, que com isso reduz consideravelmente o tempo de produção do corpo de prova que era estimado em aproximadamente 5 dias, para pouco mais de 1 dia, identificado nas tabelas 05 e 06 expostas na seção 5.5. Portanto, o objetivo específico pôde ser atingido: "Explorar o uso de CO<sub>2</sub> para acelerar o processo de construção da casca."

É possível notar alguns defeitos no corpo de prova em virtude das condições de fundição e de pré-defeitos existentes no molde de silicone que é reproduzido no corpo de prova em cera, que com isso também é copiado no corpo de prova metálico.

Com o ensaio de tração, foi possível aferir que os corpos de prova possuíam impurezas, que afetaram negativamente o ensaio, que divergiu dos dados do ensaio com os representados na literatura.

O processo utilizado, Fundição de Precisão, forneceu uma acurácia dos corpos de prova em cera replicados em metal, alcançando o objetivo específico “Aplicar o método de Cera Perdida na construção da casca cerâmica.”

Por fim, a presente pesquisa cumpriu com êxito os seus objetivos sobre a utilização de uma nova mistura refratária de Alumina e Silicato de Sódio, aplicando o dióxido de carbono como catalisador, por meio do processo de Fundição de Precisão.

## 7 TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de dar continuidade aos estudos conduzidos neste trabalho e aprofundá-los, sugere-se as seguintes possibilidades para pesquisas futuras:

- Ao invés do método de pincelamento das camadas, utilizar a técnica de mergulho;
- Utilização do Ensaio Não Destrutivo de Radiografia Industrial para verificar possíveis defeitos internos e descontinuidades;
- Realização de uma metalografia após o ensaio de tração, para identificar os defeitos e descontinuidades.
- Usar diferentes tempos de cura do gás carbônico com intuito de analisar prováveis mudanças na casca cerâmica;
- Manipular outros refratários mais baratos nas 3<sup>a</sup> e 4<sup>a</sup> camadas com objetivo de baratear os custos do processo sem perder a qualidade.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM. **ASM Handbook, vol. 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials.** [s.l.]: ASM International, 1992a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM B791:** Standard Specification for Zinc-Aluminum (ZA) Alloy Foundry and Die Castings. Pensilvânia: ASTM, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7549:** Alumínio e suas ligas: ensaios de tração dos produtos dúcteis e fundidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

BARBOSA, Cássio. **Metais não ferrosos e suas ligas: microestrutura, propriedades e aplicações.** Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais Ltda, 2014.

BEELEY, Peter. **Foundry technology.** Elsevier, 2001.

CADEIA Primária. **Associação Brasileira do Alumínio,** São Paulo. Alumínio. Disponível em: <<https://abal.org.br/aluminio/cadeia-primaria/>>. Acesso em: 14 nov. 2022.

CALLISTER, William. **Ciência E Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** 9. ed. Barueri: Grupo Gen-LTC, 2016.

DEFINIÇÃO e Classificação. **Associação Brasileira de Cerâmica,** São Paulo. Informações Técnicas. Disponível em: <<https://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/>>. Acesso em: 14 nov. 2022.

DE LUCA, Maria Augusta et al. CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE CASCAS CERÂMICAS UTILIZADAS EM MICROFUSÃO. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 14., 2000, São Pedro. **Anais [...]** São Pedro.

FEINBERG, Wilburt et al. **Lost-wax casting: a practitioner's manual.** Intermediate Technology Publications, 1983.

GROOVER, Mikell P. **Introdução aos processos de fabricação.** Grupo Gen-LTC, 2014.

HART, LeRoy D.; LENSE, Esther (Ed.). **Alumina chemicals: science and technology handbook.** John Wiley & Sons, 1990.

HUNT, L. B. The long history of lost wax casting. **Gold bulletin,** v. 13, n. 2, p. 63-79, 1980.

KLIAUGA, Andréa Madeira; FERRANTE, Maurizio. **Metalurgia básica para ourives e designers: do metal à joia.** Editora Blucher, 2009.

MADONO, M. Alumina raw materials for the refractory industry. **CN-Refractories,** v. 6, n. 3, p. 54-63, 1999.

PRINCIPAIS tipos de refratários e aglomerantes utilizados para a produção de casca cerâmica. **Associação Brasileira de Fundição**, São Paulo, 5 out. 2015. Disponível em: <<https://www.abifa.org.br/principais-tipos-de-refratarios-e-aglomerantes-utilizados-para-a-producao-de-cascas-ceramicas/>>. Acesso em: 15 nov. 2022.

TÂMEGA, Fábio. **Fundição de processos siderúrgicos**. Londrina: Editora e Distribuidora SA, 2017.