

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS  
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

RODOLFO PERATELLO

**CONSTRUÇÃO DE UM FORNO DO TIPO CADINHO PARA FUSÃO  
DE LIGAS DE ALUMÍNIO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2018

RODOLFO PERATELLO

## **CONSTRUÇÃO DE UM FORNO DO TIPO CADINHO PARA FUSÃO DE LIGAS DE ALUMÍNIO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Silvia Midori Higa

LONDRINA

2018



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

**RODOLFO PERATELLO**

### **CONSTRUÇÃO DE UM FORNO DO TIPO CADINHO PARA FUSÃO DE LIGAS DE ALUMÍNIO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado no dia 07 de dezembro de 2018 como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Me. Diego Ruben Martin  
(Editora e Distribuidora Educacional S/A)

---

Prof. Dr. Marcio Andreato Batista Mendes  
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Silvia Midori Higa  
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Silvia Midori Higa  
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)  
Coordenadora do Curso de Engenharia de Materiais

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.”

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus que me deu forças para seguir até o momento, independente das dificuldades.

Aos meus pais Mauro Peratello e Alda de Fátima Peratello e meus irmãos Rafael Peratello e Roger Peratello, que sempre acreditaram no meu sonho, me apoiaram e estiveram presentes em todos os momentos, independente da distância.

À minha namorada Jacqueline Resende Martins, por me apoiar e estar ao meu lado em todos os momentos e pela paciência e compreensão nos momentos em que me fiz ausente e à toda família Martins, em especial à Valéria Marques Resende Martins e Marcos Henrique Martins por terem sido minha segunda família e por compartilharem bons momentos durante essa jornada.

À minha orientadora Silvia Midori Higa, por aceitar o convite como orientadora, por acreditar em mim, pela paciência e dedicação nesse projeto, e por ser um exemplo de profissional.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Londrina e à todos os professores do curso de Engenharia de Materiais que de alguma maneira contribuíram com a minha formação.

À Pró-Reitoria de Graduação e Educação Profissional e à Pró-Reitoria de Relações Empresariais e Comunitárias pelo apoio financeiro para a realização do projeto.

Aos meus amigos Gustavo Henrique Pelissari, Giorgio Scolari e Otávio Vilaça, por terem sido tão companheiros e por compartilharem momentos de tanta alegria durante essa jornada.

Aos membros da banca de TCC1 e TCC 2, Diego Ruben Martin, Angelo José de Oliveira Zimmermann e Marcio Andreato Batista Mendes, por terem aceito o convite, por contribuírem com a melhoria do projeto e por fazerem parte da avaliação final.

Ao técnico de laboratório Filippe de Carvalho Bernardino e ao estagiário Alexandre Henrique Fazan, pelo apoio e dicas para realização desse trabalho.

Aos senhores Aristides Mariano Alves, João Marcelo Correia da Silvia e Genaro Marcial Mamani Gilapa, que independente de suas obrigações diárias, se prontificaram em colaborar com a construção do forno.

## RESUMO

PERATELLO, R. **Construção de um forno do tipo cadinho para fundição de ligas de alumínio**. 2018. 69 f. Exame de qualificação – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2018.

Os fornos de fundição são equipamentos utilizados para fusão da matéria-prima metálica, podendo ser de materiais ferrosos e não ferrosos. Além disso, mantêm o metal líquido a uma temperatura adequada para o processo de fundição. Diversas ligas metálicas podem ser conformadas pelo processo de fundição, como as ligas de alumínio que possuem ampla aplicação no processo devido as suas características de baixo ponto de fusão, elevada fluidez, pequena contração durante a solidificação, resistência a corrosão, soldabilidade e boa resistência/peso. No presente trabalho, construiu-se um forno de pequeno porte do tipo cadinho para ser utilizado no laboratório de ensino da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Londrina, com o intuito de realizar a fusão de ligas de alumínio com o uso de combustível GLP. A estrutura do forno foi obtida a partir de um cilindro de gás refrigerante. O concreto refratário de alta alumina utilizado no forno foi moldado manualmente e com 45 mm de espessura. Os materiais utilizados para construção do cadinho e seu suporte foram selecionados com base nas restrições do projeto. A temperatura máxima de trabalho do forno foi determinada com o uso de um termômetro de infravermelho, onde o valor obtido foi de 920 °C. O desempenho do forno foi avaliado por meio da temperatura máxima de trabalho, que foi superior a temperatura necessária para a fusão das ligas de alumínio. Além disso, também foi possível determinar que o rendimento metálico de 30 latas de alumínio, cuja massa é de 378,5 g, foi de 58,81%. Por fim, determinou-se que para esse experimento, a taxa de transferência de calor do forno e o calor necessário para aumentar a temperatura do metal até o vazamento foi de 972 W e 728 W, respectivamente.

**Palavras-chaves:** Fornos de fundição. Ligas de alumínio. Pequeno porte.

## ABSTRACT

PERATELLO, R. **Construction of a crucible-type furnace for the casting of aluminum alloys**. 2018. 69 p. Undergraduate Thesis – Academic Department of Materials Engineering, Federal Technological University of Paraná, Londrina, 2018.

The melting furnaces are equipment used to melt the metallic raw material, being able to be of ferrous and non-ferrous materials. In addition, they keep the liquid metal at a temperature suitable for the casting process. Various metal alloys can be formed by the casting process, such as aluminum alloys that have wide application in the process due to their low melting characteristics, high fluidity, small contraction during solidification, corrosion resistance, weldability and good strength / Weight. In the present work, a small furnace of the crucible type was built to be used in the teaching laboratory of the Federal Technological University of Paraná - Câmpus Londrina, in order to perform the fusion of aluminum alloys with the use of LPG fuel. The furnace structure was obtained from a cylinder of refrigerant gas. The high alumina refractory concrete used in the furnace was molded manually and 45 mm thick. The materials used to construct the crucible and its support were selected based on the project constraints. The maximum working temperature of the oven was obtained with the use of an infrared thermometer, where the value obtained was 920 °C. The furnace performance was evaluated by means of the maximum working temperature, which was higher than the temperature required for the melting of the aluminum alloys. In addition, it was also possible to determine that the metal yield of 30 aluminum cans, whose mass is 378.5 g, was 58.81%. Finally, it was determined that for this experiment, the heat transfer rate of the furnace and the heat needed to raise the temperature of the metal to the pouring was 972 W and 728 W, respectively.

**Keywords:** Melting furnaces. Aluminum alloys. Small size.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Solubilidade máxima de hidrogênio em alumínio em função da temperatura. .....	26
Figura 2 - Processo de corrosão à camada de óxido. (a) Contato entre a camada de sal derretido e a camada de óxido; (b) Corrosão da camada de óxido nos contornos; (c) Difusão do cloro para a interface óxido/alumínio; (d) Descolamento da camada de óxido; (e) Saída da camada de óxido e formação de gotas de alumínio .....	28
Figura 3 - Forno do tipo cadinho aquecido pela queima de óleo combustível.....	30
Figura 4 - Fornos do tipo cadinho. (a) móvel; (b) fixo; (c) basculante. ....	31
Figura 5 - Diagrama de temperatura máxima de serviço para as classes de materiais. .....	34
Figura 6 - Mapa de propriedade de condutividade térmica em relação à difusividade térmica. ....	35
Figura 7 - Diagrama de barra de custo para as classes de materiais. ....	35
Figura 8 - Transferência de calor em sistema cilíndrico para parede composta com três camadas.....	38
Figura 9 - Fluxograma para o desenvolvimento do projeto. ....	39
Figura 10 – Vista explodida do forno.....	41
Figura 11 - Componente estrutural do forno. (a) Cilindro utilizado; (b) Cilindro após o processo de corte.....	42
Figura 12 - Base do forno finalizada.....	43
Figura 13 - Posicionamento do revestimento refratário inferior e superior na estrutura do forno. ....	44
Figura 14 - Revestimento refratário da base do forno. ....	44
Figura 15 - Gabaritos do revestimento lateral do forno. ....	45
Figura 16 - Preparação para a moldagem do revestimento lateral. (a) Posicionamento dos gabaritos; (b) Aplicação da espuma de poliuretana para vedação. ....	46
Figura 17 - Revestimento térmico da lateral após etapa de secagem.....	47
Figura 18 - Base e cadinho do forno. (a) Extintor comercial utilizado (b) Base e cadinho após a operação de soldagem; (c) Revestimento térmico da região inferior do cadinho. .....	48

Figura 19 - Componentes do sistema de aquecimento do forno. (a) Kit de gás para alta pressão; (b) Detalhe da furação na estrutura do queimador. ....	49
Figura 20 - Mecanismo de arraste de ar na estrutura do queimador.....	49
Figura 21 - Detalhes do tambor de união e montagem do sistema de aquecimento do forno. (a) Redução do diâmetro externo; (b) Furação e rosca; (c) Montagem dos componentes.....	50
Figura 22 - Sistema de transporte do forno.....	51
Figura 23 - Forno durante a etapa de fusão da matéria-prima.....	52
Figura 24 - Abertura para entrada de ar do queimador.....	54
Figura 25 – Teste de fundição das latas de alumínio em molde de gesso. (a) Molde preenchido com alumínio; (b) Lingote após a retirada do molde.....	56
Figura 27 - Faixa do limiar de queimadura para contato da pele com superfícies lisas de metal aquecido e sem revestimento (pintura).....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físicas do alumínio, aço e cobre.....	19
Tabela 2 - Ligas de alumínio para fundição e suas classificações. ....	21
Tabela 3 - Composição química de algumas ligas de alumínio para fundição. ....	24
Tabela 4 - Desempenho e classificação dos fluoretos e cloretos utilizados em fluxos salinos. ....	28
Tabela 5 - Composição química para materiais refratários comuns.....	32
Tabela 6 - Composição química de ligas utilizadas na fabricação de latas de alumínio. ....	36
Tabela 7 - Requisitos e restrições para o projeto do forno.....	40
Tabela 8 - Rendimento metálico obtido do teste de fusão das latas de alumínio.....	55

## LISTA DE SIGLAS

ABIFA	Associação Brasileira de Fundição
ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas

## LISTA DE SÍMBOLOS

%peso	Porcentagem em peso
Q	Calor total
m	Massa
c	Calor específico
$\Delta T$	Varição de temperatura
$Al_2O_3$	Óxido de Alumínio (Alumina)
Sn	Solubilidade de gás no metal
X	Constante de proporcionalidade
$P_g$	Pressão parcial do gás
$Na_3AlF_6$	Hexafluoraluminato de sódio
LiF	Fluoreto de lítio
NaF	Fluoreto de sódio
KF	Fluoreto de potássio
$CaF_2$	Fluoreto de cálcio
$MgF_2$	Fluoreto de magnésio
$AlF_3$	Fluoreto de alumínio
LiCl	Cloreto de lítio
$CaCl_2$	Cloreto de Cálcio
$MgCl_2$	Cloreto de Magnésio
$SiO_2$	Dióxido de silício (Sílica)
MgO	Óxido de magnésio
$Cr_2O_3$	Óxido de cromo

$F_2O_3$	Óxido de ferro (Hematita)
CaO	Óxido de cálcio
$TiO_2$	Dióxido de titânio
K	Difusividade térmica
k	Condutividade térmica
$MgAl_2O_4$	Espinélio
GLP	Gás liquefeito de petróleo
Qt	Potência térmica
qr	Taxa de transferência de calor
$L_c$	Comprimento do cilindro
h	Coefficiente convectivo
$T_s$	Temperatura na superfície
r	raio
$T_\infty$	Temperatura do fluido
PVC	Policloreto de vinila

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
2.1	Objetivo geral .....	16
2.2	Objetivos específicos .....	16
<b>3</b>	<b>JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>17</b>
<b>4</b>	<b>REFERÊNCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
4.1	Alumínio e suas Ligas para fundição.....	18
4.2	Fundição do Alumínio e suas Ligas .....	21
4.2.1	Processos de fundição .....	21
4.2.2	Fusão do alumínio e suas ligas.....	23
4.2.3	Temperatura de vazamento .....	24
4.2.4	Formação de escória.....	27
4.3	Fornos de fusão .....	29
4.3.1	Fornos do tipo cadinho.....	29
4.3.2	Fornos comerciais do tipo cadinho.....	31
4.4	Materiais refratários para fornos de fundição .....	31
4.4.1	Características que determinam a escolha de materiais refratários.....	33
4.4.2	Características para escolha de cadinhos.....	33
5.1.1.1	Revestimento refratário do forno .....	36
5.1.1.2	Cadinho e suporte do cadinho.....	36
5.1.1.3	Sistema de aquecimento .....	37
5.1.2	Transferência de calor no forno .....	37
<b>5</b>	<b>PROCEDIMENTO METODOLÓGICO DE PESQUISA .....</b>	<b>39</b>
5.1	Fluxograma de atividades .....	39
5.2	Projeto do forno de fusão de ligas de alumínio .....	39
5.3	Construção do forno.....	40
5.3.1	Estrutura do forno .....	42
5.3.2	Base do forno.....	42
5.3.3	Determinação e moldagem do revestimento refratário do forno .....	43
5.3.4	Base e cadinho do forno .....	47
5.3.5	Sistema de aquecimento do forno.....	48
5.1.2.1	Construção do queimador .....	48

5.3.6	Sistema de transporte do forno .....	50
5.4	Testes do forno para a fusão da matéria-prima .....	51
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>53</b>
6.1	Dificuldades no processo de construção do forno.....	53
6.2	Sistema de aquecimento.....	53
6.3	Rendimento metálico.....	55
6.4	Determinação da taxa de transferência de calor do forno e calor necessário para fusão da matéria-prima.....	56
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>59</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>60</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>61</b>
	<b>ANEXO A – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO CONCRETO REFRACTÁRIO .....</b>	<b>65</b>
	<b>APÊNDICE A – DESENHO DA ESTRUTURA DO QUEIMADOR.....</b>	<b>70</b>
	<b>APÊNDICE B – DESENHO DO TAMBOR DE UNIÃO .....</b>	<b>71</b>
	<b>APÊNDICE C – DESENHO DO PÉ DE FIXAÇÃO DO FORNO .....</b>	<b>72</b>
	<b>APÊNDICE D – DESENHO DA MONTAGEM DO FORNO .....</b>	<b>73</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A obtenção de produtos metálicos se dá por meio de diversas rotas de processamento, que, juntamente com as características dos metais e ligas metálicas utilizadas, resultam em produtos com propriedades adequadas para uma determinada aplicação. Desse modo, para a escolha do processo ideal, devem ser levados em consideração fatores como a quantidade, geometria, peso e tamanho das peças, além das propriedades da liga, como por exemplo, a temperatura de fusão.

Uma das rotas de processamento mais utilizada para a fabricação de materiais ferrosos e não ferrosos é a fundição, que consiste basicamente na fusão da matéria-prima, seguido do vazamento do metal líquido na cavidade de um molde, por gravidade ou por ação de forças externas. O metal é resfriado e assume o formato da cavidade do molde. Após a solidificação total da peça, as características do produto final são alcançadas ou, quando necessário, são realizadas etapas de usinagem e tratamento térmico.

O processo de fundição se destaca entre os demais processamentos pela possibilidade de se fabricar produtos com dimensões muito próximas as do produto final, de geometria complexa e com economia de matéria-prima, além da capacidade de produzir peças com poucas gramas até toneladas e com diferentes tamanhos e, em alguns casos, a um baixo custo.

Este projeto tem como objetivo a construção de um forno de fusão de ligas de alumínio tipo cadinho, visando sua utilização em laboratório de ensino para a realização de estudos e pesquisas. Para isso, uma revisão sobre os aspectos que envolvem a fundição, especificamente para as ligas de alumínio fundidas, será realizada para contribuir com a execução da construção do equipamento.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

Construir um forno de fundição do tipo cadinho para fusão de ligas de alumínio, com a finalidade de disponibilizar o uso em laboratório de ensino do curso de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Londrina.

### 2.2 Objetivos específicos

- Realizar o projeto, a construção e a fusão de ligas de alumínio utilizando o forno projetado.

### **3 JUSTIFICATIVA**

A construção de fornos de fundição de pequeno porte para utilização em laboratórios de ensino da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Londrina são de extrema importância para que seja possível aplicar na prática o conhecimento teórico que envolve a fundição. Além do mais, nesse trabalho, a construção de um forno tipo cadinho para fusão de alumínio e suas ligas corrobora com o desenvolvimento dos alunos dos cursos de graduação, por disponibilizar o seu uso para realização de pesquisas nessa área.

## 4 REFERÊNCIAL TEÓRICO

Esta seção é composta de uma revisão dos principais conceitos e informações acerca das ligas de alumínio para fundição, do processo e dos fornos utilizados na fusão da matéria-prima.

### 4.1 Alumínio e suas Ligas para fundição

Considerado como o terceiro elemento químico mais abundante da crosta terrestre, o alumínio é apontado como um elemento bastante popular devido a sua utilização em quase todas as esferas da atividade humana. Entretanto, o alumínio não é encontrado na natureza na forma elementar, sendo encontrado como íon  $Al^{3+}$  na forma combinada em rochas e minerais, resultado de sua alta afinidade com o oxigênio (CONSTANTINO; et al., 2002).

O minério que apresenta maior importância industrial em relação a obtenção do alumínio primário e de muitos compostos de alumínio é a bauxita, além disso, rochas ígneas como os feldspatos (aluminossilicatos tridimensionais) e as micas (silicatos lamelares), assim como os minerais criolita ( $Na_3[AlF_6]$ ), espinélico ( $MgAl_2O_4$ ), granada ( $[Ca_3Al_2(SiO_4)_3]$ ), berílio ( $Be_3Al_2[Si_6O_{18}]$ ) e córidon ( $Al_2O_3$ ), podem ser utilizados (CONSTANTINO, et al., 2002; TORRE, 2004).

O processo Bayer é a rota comercial mais importante para purificação da bauxita. Por meio das etapas de digestão, clarificação, precipitação, lavagem e calcinação, obtêm-se a alumina. Sendo assim, em uma etapa seguinte, faz-se necessário a utilização da rota eletrolítica, na qual a alumina obtida pelo processo Bayer é decomposta eletroliticamente em células Hall-Heroult (com ânodos consumíveis de carbono) até a obtenção do alumínio primário (SILVA FILHO, ALVES, MOTTA, 2007; CONSTANTINO, et al., 2002; MOURÃO, FERREIRA NETO, TAKANO, 2011).

O alumínio é um elemento metálico pertencente à família dos metais não ferrosos, materiais esses que não possuem o ferro como elemento principal. Embora

os metais não ferrosos não possam se igualar a resistência dos aços, certas ligas não ferrosas possuem resistência à corrosão e/ou razões resistência/peso que as tornam competitivas com os aços em determinadas aplicações, como é caso do alumínio e suas ligas, que são caracterizados por uma massa específica relativamente baixa, aproximadamente um terço da do aço e resistência a corrosão em alguns ambientes comuns (incluindo a atmosfera ambiente e água), em virtude da formação de um filme de óxido, duro e fino em sua superfície.

Além disso, o alumínio possui elevada ductilidade, condutividade elétrica e térmica, sendo amplamente aplicados em trocadores de calor e painéis, além de outras aplicações como componentes para os diversos setores da indústria como transporte (automóveis, aeronaves, trens, navios), construção civil (portas, janelas, fachadas), metalúrgica, entre outros (GROOVER, 2016; ASTM INTERNATIONAL, 1990; CONSTANTINO, et al., 2004). Na Tabela 1 são apresentadas as propriedades físicas do alumínio, aço e cobre.

**Tabela 1 – Propriedades físicas do alumínio, aço e cobre.**

Propriedade física	Alumínio	Aço	Cobre
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2,70	7,86	8,96
Temperatura de fusão (°C)	660	1500	1083
Módulo de Elasticidade (MPa)	70000	205000	110000
Coefficiente de dilatação térmica (L/°C)	23,10E-6	11,7E-6	16,5E-6
Condutividade elétrica a temperatura ambiente (Ω.m) <sup>-1</sup>	3,8E+7	0,6E+7	6,0E+7
Condutividade térmica (W/m.K)	247	51,9	398

Fonte: Adaptado de ABAL (2007); Callister Jr. (2012).

Uma vez que o alumínio puro possui alta ductilidade e é relativamente pouco resistente, sua resistência mecânica pode ser aumentada por meio de processos de

trabalho a frio ou pela formação de ligas. Entretanto, em algumas situações, pode ocorrer uma redução na resistência a corrosão desses materiais (GROOVER, 2016; CALLISTER Jr., 2012).

Os principais elementos presentes nas ligas de alumínio são: cobre, magnésio, silício, manganês e zinco. Diversas ligas podem ser obtidas variando-se o tipo e os teores dos elementos presentes. As ligas de alumínio podem ser do tipo tratáveis termicamente, a qual são capazes de serem endurecidas por precipitação (como resultado da adição de elementos de ligas, onde, em sua maioria, leva à formação de um composto intermetálico), ou então, as não tratáveis termicamente, que consistem em uma única fase, nas quais o aumento na resistência é obtido por endurecimento por solução sólida (CALLISTER Jr., 2012).

Em geral, as ligas de alumínio são classificadas em fundidas ou forjadas. O sistema de classificação consiste na utilização de um código numérico de quatro dígitos, sendo esse dividido em duas partes, uma para peças forjadas e outra para peças fundidas. Para as ligas fundidas, um ponto decimal é posicionado entre os dois últimos dígitos (ASM INTERNATIONAL, 1990; CALLISTER Jr., 2012).

Para indicação em relação à presença ou ausência de tratamentos térmicos e mecânicos, a especificação é inserida após os quatro dígitos precedentes da identificação da liga, sendo separadas por um hífen, podendo ser do tipo F, H e O, representando, respectivamente, os estados de como fabricado, encruado e recozido. Porém, em algumas ligas de alumínio observam-se identificações do tipo T e W, que podem representar tratamento térmico de solubilização, trabalho a frio e envelhecimento, sendo utilizados com o intuito de produzir estruturas estáveis diferentes das obtidas por F, H e O. Os tratamentos que especificam o trabalho a frio não se aplicam às ligas fundidas (ASM INTERNATIONAL, 1990; GROOVER, 2016). As ligas e a série de identificação para as peças fundidas e forjadas estão apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2 - Ligas de alumínio para fundição e suas classificações.**

Ligas	Peças forjadas	Peças fundidas
	Série	Série
Alumínio (99,00% ou mais de pureza)	1XXX	1XX.X
Ligas de Alumínio (em função dos principais elementos de liga):		
Cobre	2XXX	2XX.X
Manganês	3XXX	-
Silício com adição de cobre e/ou magnésio	-	3XX.X
Silício	4XXX	4XX.X
Magnésio	5XXX	5XX.X
Magnésio e Silício	6XXX	-
Zinco	7XXX	7XX.X
Estanho	-	8XX.X
Outros elementos	8XXX	9XX.X

**Fonte: Adaptado de ASM INTERNATIONAL (1990), Groover (2016), Baldam; Vieira (2014).**

## 4.2 Fundição do Alumínio e suas Ligas

Nesse tópico serão abordadas questões a respeito das etapas utilizadas no processo de fundição e características que envolvem o processo de fusão da matéria-prima; Além dos principais fornos utilizados para fundir alumínio e suas ligas e por fim, uma descrição sobre os principais materiais utilizados para construção de um forno de fundição do tipo cadinho.

### 4.2.1 Processos de fundição

O processo de fundição se inicia basicamente com a realização de aquecimento até a fusão da matéria-prima (obtenção do metal líquido), seguido do vazamento do metal líquido na cavidade de um molde, por meio da força da gravidade ou por ação de força externa, como no caso da fundição sob pressão (GROOVER, 2016).

O molde contém uma cavidade interna cuja geometria determina a forma da peça, que pode ser do tipo aberto ou fechado. Quando fechado, possui geometria complexa, necessitando de um sistema de alimentação, por meio de canais que são utilizados para que o metal seja capaz de preencher totalmente a cavidade do molde em um determinado intervalo de tempo (GROOVER, 2016; BALDAM, VIEIRA, 2014).

Uma característica importante que envolve as dimensões da cavidade do molde está relacionada com o fato dessa possuir geometria e forma ligeiramente superior as dimensões do produto final, devido a contração do metal durante a etapa solidificação e resfriamento, demonstrando, portanto, a importância em relação a determinação da matéria-prima que se deseja fundir, visto que materiais metálicos apresentam diferentes coeficientes de contração (GROOVER, 2016).

Logo após o início da etapa de preenchimento do molde o metal fundido começa a resfriar. Quando a temperatura diminui o suficiente (até a temperatura de solidificação para um metal puro), a solidificação tem início, sendo necessário tempo e remoção de uma quantidade considerável de calor para completar essa etapa. É durante essa etapa do processo que o metal assume uma forma sólida na cavidade do molde e que muitas das propriedades e características do fundido são estabelecidas (GROOVER, 2016).

Após a solidificação e resfriamento, a peça é retirada do molde apresentando uma forma próxima à final. Caso seja necessário, etapas posteriores podem ser realizadas, como a rebarbação, corte de canais de alimentação, limpeza da superfície, usinagem e tratamentos térmicos (GROOVER, 2016; SOARES 2000).

Os principais processos utilizados para fundição de ligas de alumínio são: fundição em molde de areia, sob pressão, em casca e coquilha. Entretanto, alguns fatores são considerados importantes durante a etapa de escolha do processo mais adequado, estando esses relacionados à geometria da peça que se deseja produzir, o tipo da liga a ser fundida, o número de peças a ser fabricadas, a qualidade superficial desejada, assim como a viabilidade econômica em relação à utilização do processo (BALDAM, VIEIRA, 2014; TUTTLE, 2012).

#### 4.2.2 Fusão do alumínio e suas ligas

O processo de fusão da matéria-prima é de extrema importância para os processos de fundição, visto que a qualidade da peça fundida está diretamente relacionada às características que envolvem esta etapa. Entretanto, as alterações nas propriedades das peças fundidas não dependem apenas do processamento realizado, mas também da composição química das ligas metálicas.

Quando o processo de fundição utiliza sucata como fonte secundária de matéria-prima, torna-se necessário um controle rigoroso em relação à composição química do metal líquido, o que pode resultar em uma etapa crítica para o processo já que esses materiais apresentam contaminantes como tintas, materiais plásticos e metálicos. Assim, procedimentos rotineiros em relação à análise química das amostras antes da etapa de vazamento são realizados (CASTRO, KIMINAMI, OLIVEIRA, 2013; OLIVEIRA, VALENTIM, 2011).

Na indústria de fundição, as ligas do sistema alumínio-silício (composição eutética, hipoeutéticas e hipereutéticas) possuem maior aplicação, sendo cerca de 50% do total das ligas de alumínio utilizadas na fundição. A sua ampla utilização está relacionada a suas características físicas e mecânicas, sendo essas: baixo ponto de fusão, elevada fluidez, pequena contração na solidificação, resistência à corrosão, soldabilidade e boa resistência/peso (GARCIA, 2016). De acordo com a Tabela 3, é possível observar algumas composições químicas relacionadas a algumas ligas de alumínio utilizadas em processos de fundição.

**Tabela 3 - Composição química de algumas ligas de alumínio para fundição.**

Composição (%peso) <sup>a,b</sup>								
Ligas	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti
242.0	0,7	1,0	3,5-4,5	0,35	1,2-1,8	1,7-2,3	0,35	0,25
295.0	0,7-1,5	1,0	4,0-5,0	0,35	0,03	-	0,35	0,25
319.0	5,5-6,5	1,0	3,0-4,0	0,50	0,10	0,35	1,0	0,25
356.0	6,5-7,5	0,6	0,25	0,35	0,20-0,45	-	0,35	0,25
413.0	11,0-13,0	2,0	1,0	0,35	0,10	0,50	0,50	-
520.0	0,25	0,30	0,25	0,15	9,5-10,6	-	0,15	0,25
712.0	0,30	0,50	0,25	0,10	0,50-0,65	-	5,0-0,6	0,15-0,25

<sup>a</sup> O restante da composição é constituído por alumínio.

<sup>b</sup> Além dos elementos listados, algumas ligas de alumínio para fundição podem apresentar elementos como estanho e cromo.

**Fonte: Adaptado de ASM INTERNATIONAL (1990).**

Para início do processo de fundição, o metal é aquecido a uma temperatura elevada o suficiente para convertê-lo totalmente ao estado líquido, procedimento esse realizado com a utilização de equipamentos conhecidos como fornos de fusão (GROOVER, 2016). Por meio da Equação (1) calcula-se o calor necessário (Q) para aumentar a temperatura do metal até a temperatura de vazamento, onde m é a massa (kg), c é o calor específico (J/kg.K) e  $\Delta T$  é a diferença de temperatura entre a temperatura de vazamento e a temperatura ambiente (K).

$$Q = m.c.\Delta T \quad (1)$$

#### 4.2.3 Temperatura de vazamento

A temperatura de vazamento do metal no processo de fundição é determinada pelo superaquecimento e é definida como a temperatura do metal fundido no momento em que é introduzido no molde. A diferença entre a temperatura de vazamento e a temperatura no qual a solidificação tem início (a temperatura de fusão para um metal puro ou a temperatura *liquidus* para uma liga) é conhecida como superaquecimento (CASTRO, KIMINAMI, OLIVEIRA, 2013; GROOVER, 2016).

Um superaquecimento adequado é de extrema importância para a etapa de fusão e solidificação do material, visto que uma temperatura excessivamente baixa pode resultar na solidificação do metal antes mesmo do preenchimento total do molde.

Entretanto, embora um superaquecimento elevado resulte em um aumento na fluidez do metal fundido, colaborando assim com o processo de preenchimento do molde, pode resultar em uma série de desvantagens e problemas para o processo de fundição, tais como: aumento do consumo de energia durante o processo, aumento na intensidade da reação entre metal e molde, aumento da possibilidade de fluxo turbulento do metal fundido durante o preenchimento do molde, aumento da oxidação do metal, aumento na solubilidade de gases e, por fim, mudanças microestruturais, visto que ela determina a quantidade de calor a ser retirada do metal líquido após o preenchimento do molde, influenciando diretamente a taxa de resfriamento durante o processo de solidificação (CASTRO; KIMINAMI; OLIVEIRA, 2013).

Durante o aquecimento da matéria-prima até a temperatura de vazamento, a avaliação da solubilidade de gases dissolvidos é indispensável para o processo de fundição, visto que o superaquecimento excessivo aumenta drasticamente a solubilidade de gases dissolvidos no metal fundido (CASTRO; KIMINAMI; OLIVEIRA, 2013).

Os metais fundidos podem absorver uma quantidade considerável de gás sob condições apropriadas. Para as ligas de alumínio, o hidrogênio é a principal preocupação, já que está presente na atmosfera do forno e pode ser dissolvido no metal fundido durante a fusão da matéria-prima (TUTTLE, 2012). Na Equação (2) é apresentada a reação química de formação de hidrogênio atômico resultante da redução do vapor de água.



A quantidade de gás que pode ser dissolvido no alumínio fundido depende da pressão parcial do gás e da temperatura. Na Equação (3) é apresentada a quantidade de gás que pode ser dissolvido no metal líquido (TUTTLE, 2012; BALDAM, VIEIRA, 2014).

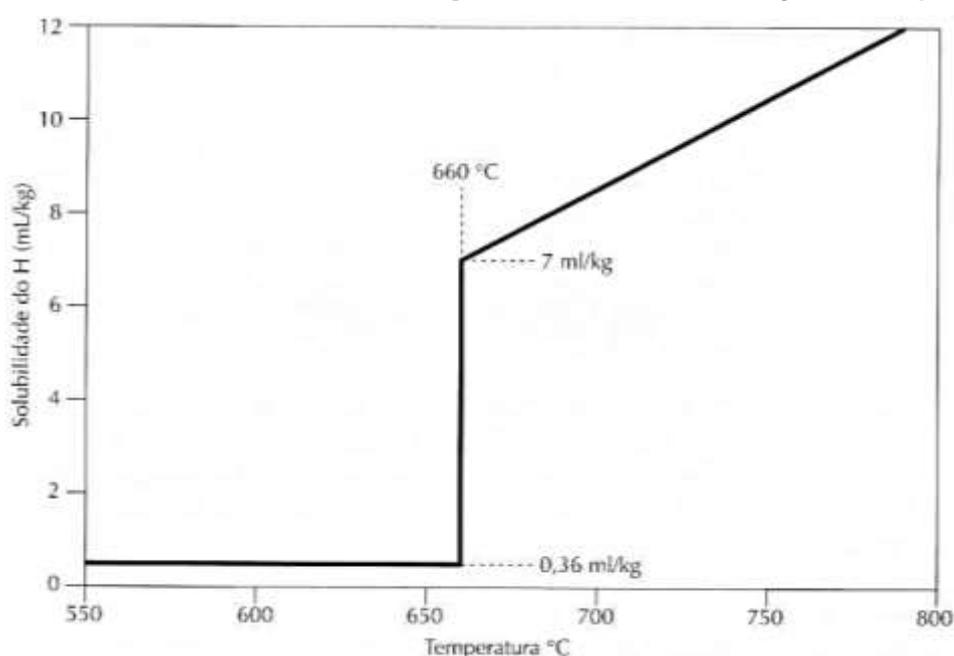
$$S_n = X\sqrt{P_g} \quad (3)$$

A lei de Sievert representada na Equação (3) é utilizada para prever a solubilidade de gases em metais fundidos, demonstrando que a quantidade de gás dissolvido é proporcional à raiz quadrada da pressão desse gás na atmosfera. Sendo, portanto, importante para definição da temperatura de vazamento e compreensão do processo que envolve a remoção de hidrogênio (TUTTLE, 2012; BALDAM, VIEIRA, 2014).

Durante o processo de solidificação da liga, a temperatura diminui drasticamente resultando em uma alta redução na solubilidade de hidrogênio pelo metal em solidificação, o que pode gerar defeitos que comprometem as propriedades mecânicas do fundido devido à presença de bolhas ou porosidade dentro da peça fundida (TUTTLE, 2012; CASTRO, KIMINAMI, OLIVEIRA, 2013).

De acordo com a Figura 1 é possível observar a relação entre a solubilidade máxima de hidrogênio em alumínio em função da temperatura. Além disso, é possível compreender a importância referente à definição do superaquecimento, já que em temperaturas superiores a 660 °C, a solubilidade de hidrogênio varia drasticamente de 0,36 ml/kg para valores superiores a 7 ml/kg.

**Figura 1 - Solubilidade máxima de hidrogênio em alumínio em função da temperatura.**



Fonte: Castro; Kiminami; Oliveira (2013).

#### 4.2.4 Formação de escória

A escória é a camada de óxido formada principalmente devido à reação de oxidação entre o metal fundido e a atmosfera contendo oxigênio e/ou vapor de água. A reação entre o oxigênio e o metal fundido frequentemente produz óxidos metálicos que tendem a sobrenadar no metal líquido, durante a etapa de vazamento, e podem ser levados pelo metal fundido para dentro da cavidade do molde; resultando assim, em defeitos no produto final, que podem comprometer as propriedades mecânicas, o acabamento superficial e a usinabilidade da peça fundida (CASTRO, KIMINAMI, OLIVEIRA, 2013; OLIVEIRA, VALENTIM, 2011). Na Equação (2) citada anteriormente, tem-se a formação da camada de óxido ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) presente nas ligas de alumínio devido à reação do alumínio com o oxigênio e/ou vapor de água presente na atmosfera do forno.

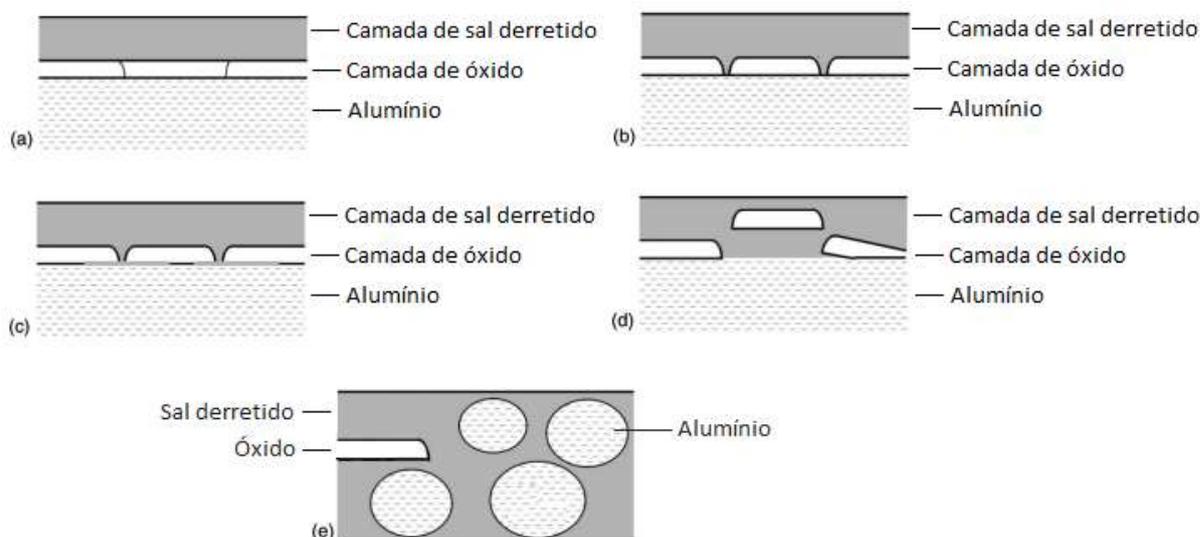
A escória pode ser controlada pela minimização da reação entre o metal fundido e o ambiente. Para isso, existem procedimentos que minimizam o problema e evita que a escória formada esteja presente na peça solidificada. Um desses procedimentos é baseado na aglomeração dos óxidos e flotação dos aglomerados para a superfície do metal fundido por meio da adição de fluoretos, formando, assim, uma camada que é retirada antes do vazamento do metal no molde (CASTRO; KIMINAMI; OLIVEIRA, 2013).

Para diminuição da ocorrência de perda efetiva de matéria-prima e com o intuito de aumentar o rendimento metálico, são adicionados, durante o processo de fusão, sais de metais alcalinos, conhecidos como fluxos, geralmente em teores de 30% a 40% em peso, sobre a carga total do forno. Um fluxo muito utilizado é o salino, composto por cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ) ou cloreto de potássio ( $\text{KCl}$ ), ou a combinação entre eles, tendo como função remover o alumínio que fica aprisionado pela camada de óxido sobrenadante ao metal líquido, resultando na coalescência das gotas de alumínio que posteriormente afundam ao banho de metal líquido (OLIVEIRA, VALENTIM, 2011; TENÓRIO, ESPINOSA, 2002).

O mecanismo de decapagem da camada de óxido ocorre devido à baixa tensão interfacial entre o sal e o óxido e também entre o alumínio e o sal, sendo similar ao processo de corrosão a quente. A viscosidade do metal fundido também pode influenciar o mecanismo de quebra da camada de óxido, uma vez que o sal necessita

percorrer a camada de óxido e promover a separação do alumínio das partículas de óxido quebrada (TENÓRIO, ESPINOSA, 2002). Na Figura 2 é apresentado o mecanismo de ação do fluxo salino quando adicionado ao metal líquido durante a etapa de fusão.

**Figura 2 - Processo de corrosão à camada de óxido. (a) Contato entre a camada de sal derretido e a camada de óxido; (b) Corrosão da camada de óxido nos contornos; (c) Difusão do cloro para a interface óxido/alumínio; (d) Descolamento da camada de óxido; (e) Saída da camada de óxido e formação de gotas de alumínio**



Fonte: Adaptado de Tenório; Espinosa (2002).

Na Tabela 4 é apresentada a classificação de desempenho entre diversos fluoretos e cloretos que podem ser utilizados no fluxo salino com o intuito de aumentar o desempenho do rendimento metálico do processo de fundição.

**Tabela 4 - Desempenho e classificação dos fluoretos e cloretos utilizados em fluxos salinos.**

Classificação de desempenho	Fluxo
Excelente	$\text{Na}_3\text{AlF}_6 < \text{LiF} < \text{NaF} < \text{KF}$
Bom	$\text{CaF}_2 < \text{MgF}_2$
Moderado	$\text{AlF}_3$
Pobre	$\text{LiCl} < \text{CaCl}_2 < \text{MgCl}_2$

Fonte: Adaptado de Oliveira; Valentim (2011).

### 4.3 Fornos de fusão

Uma das principais condições para obtenção de produtos por fundição é a necessidade de utilização de equipamentos conhecidos como fornos de fusão. Sua principal função é fornecer metal líquido, seja metais ferrosos ou não ferrosos, em uma quantidade adequada, à temperatura conveniente e a um baixo preço (FERREIRA, 2010).

Os fornos utilizados para fusão de metais e suas ligas podem ser classificados de acordo com a fonte de energia utilizada, podendo ser do tipo elétrico ou a combustível (sólido, líquido ou gasoso), ou então pelo modo operacional (cadinho, revérbero, de cuba, etc.) (BALDAM, VIEIRA, 2014; SOARES, 2000).

Uma mesma liga pode ser obtida por mais de um forno de fusão, como é o caso das ligas de alumínio, que podem ser fundidas em fornos do tipo cadinho ou indução. Entretanto, a escolha do forno adequado para fusão de ligas metálicas depende de diversos fatores como: o tipo e a quantidade da liga, a disponibilidade da fonte de energia a preço acessível, os investimentos necessários e o retorno de capital envolvido, assim como a disponibilidade de tecnologia referente ao processo de fundição. (BALDAM; VIEIRA, 2014).

#### 4.3.1 Fornos do tipo cadinho

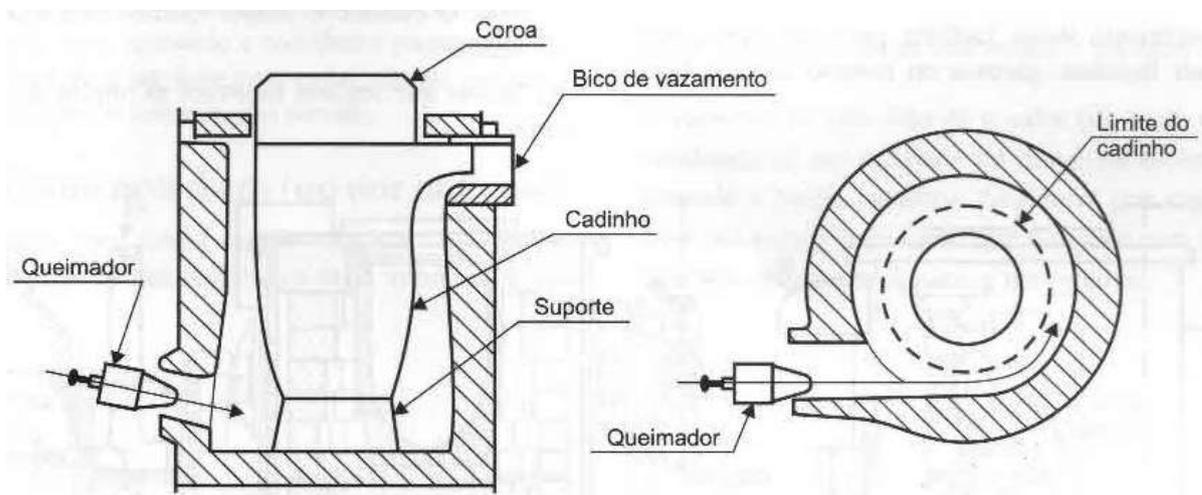
Os fornos a cadinho possuem formato cilíndrico com uma estrutura externa em geral de aço e revestimento interno de material refratário. A obtenção do metal líquido para esse tipo de forno consiste, basicamente, no carregamento de matéria-prima no cadinho, presente no interior do forno, o qual é capaz de suportar elevadas temperaturas durante a etapa de fusão da mesma (BALDAM; VIEIRA, 2014). Esse tipo de forno apresenta extensa aplicação nos processos de fundição, visto o seu baixo custo de construção e sua capacidade de realizar a fusão de materiais ferrosos e não ferrosos, sendo amplamente utilizados para fundição de ligas não ferrosas. Entretanto, apresenta baixa capacidade, variando de 30 Kg a 500 Kg para materiais

não ferrosos e, 3 kg a 50 kg para materiais ferrosos (BALDAM, VIEIRA, 2014; FERREIRA, 2010).

Para a etapa de aquecimento dos fornos do tipo cadinho, no qual a temperatura de trabalho varia entre 200 a 1400 °C, os combustíveis utilizados podem ser do tipo: gasosos (gás natural, GLP), líquidos (diesel, BFP), sólidos (carvão, coque), sendo o óleo diesel o combustível mais utilizado. Para os casos de combustível líquidos ou gasosos, a alimentação do forno é realizada com a injeção de combustível por meio de ventaneiras, em uma região localizada entre o cadinho e o material refratário do forno, destinada a funcionar como câmara de combustão (BALDAM, VIEIRA, 2014; CASTRO, KIMINAMI, OLIVEIRA, 2013).

Para os fornos de fusão, os combustíveis além de promoverem o aquecimento da matéria-prima até a temperatura adequada, também são utilizados para realização de preaquecimento e secagem (quando se utiliza pela primeira vez um novo refratário e cadinho), evitando, assim, choque térmico e trincas tanto no cadinho, quanto nos refratários da parede do forno (BALDAM; VIEIRA; 2014). Na Figuras 3 é possível observar um forno do tipo cadinho aquecido pela queima de óleo combustível.

**Figura 3 - Forno do tipo cadinho aquecido pela queima de óleo combustível.**

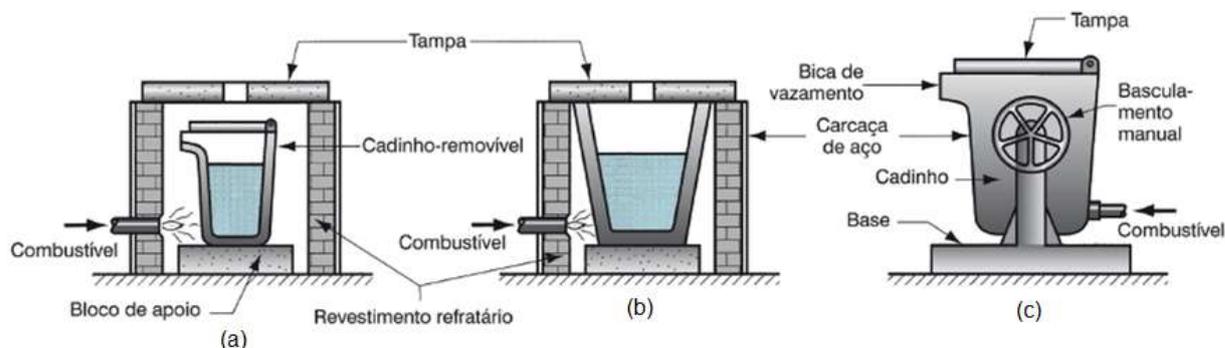


Fonte: Baldan; VIEIRA (2014).

Existem duas classificações distintas em relação aos fornos do tipo cadinho, podendo ser do tipo cadinho fixo ou cadinho móvel. No caso de cadinho fixo, tem-se a realização do basculamento do forno para retirada do metal líquido; já para os fornos de cadinho móvel, a retirada de metal líquido é realizada por meio da remoção do cadinho com a utilização de tenazes (BALDAM; VIEIRA, 2014). De acordo com a

Figura 4 é possível observar um exemplo de forno do tipo cadinho fixo, móvel e basculante.

**Figura 4 - Fornos do tipo cadinho. (a) móvel; (b) fixo; (c) basculante.**



**Fonte: Groover (2016).**

#### 4.3.2 Fornos comerciais do tipo cadinho

Os fornos comerciais do tipo cadinho, em sua maioria apresentam diferentes características em relação às dimensões do forno e do cadinho, à capacidade do forno e ao consumo de combustível e/ou energia. Já em relação aos materiais utilizados para construção do forno, em sua maioria, são construídos com chapas de aço carbono SAE 1010/1020 para estrutura/carcaça, material refratário de alta alumina, podendo ser como argamassa, em uma ou duas camadas, divididas em concreto isolante seguida de concreto refratário. Por fim, utilizam-se cadinhos de carbetto de silício devido à maior resistência à oxidação (DJ FORNOS, 2018; GRION FORNOS, 2018; SIECA, 2018; VESUVIUS, 2018).

#### 4.4 Materiais refratários para fornos de fundição

Os materiais refratários são cerâmicas técnicas, policristalinas, normalmente inorgânicas e polifásicas, podendo ser comercializados pré-moldados, como os tijolos, sendo a forma mais comum, ou então monolítico, o qual adquire o formato após sua aplicação, como os concretos, sendo, os dois casos, constituídos por agregados,

partículas finas (matriz), agentes ligantes e outros aditivos químicos. São classificados em argila refratária, sílica, básica e refratários especiais.

As propriedades características desses materiais incluem a capacidade de resistir a temperaturas elevadas sem fundir ou se decompor, além de ter resistência a reações químicas com os materiais, normalmente metais fundidos, quando expostos a ambientes severos. Além disso, possuem capacidade de proporcionar isolamento térmico, sendo, portanto, importantes em muitos processos industriais que empregam fornos e cadinho para aquecer e/ou fundir materiais (PANDOLFELLI, SAKO, 2014; GROOVER, 2016; CALLISTER Jr., 2012). Na Tabela 5 são apresentadas quatro composições típicas para materiais refratários.

**Tabela 5 - Composição química para materiais refratários comuns.**

Tipo de material refratário	Composição (%peso)							Porosidade aparente (%)
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	
Argila refratária	25-45	50-70	0-1	-	0-1	0-1	1-2	10-25
Argila refratária (com alto teor de alumina)	90-50	10-45	0-1	-	0-1	0-1	1-4	18-25
Sílica (Ácido)	0,2	96,3	0,6	-	-	2,2	-	25
Periclásio (Básico)	1,0	3,0	90,0	0,3	3,0	2,5	-	22

Fonte: Adaptado de Callister Jr. (2012).

A utilização de tijolos refratários apresenta vantagens em relação à alta resistência, porém, como desvantagem, a presença de juntas e elevada massa. Já para os concretos refratários, sua utilização tem sido impulsionada devido às vantagens que esses materiais apresentam em relação aos pré-moldados tradicionais, como a facilidade de aplicação, a ausência de juntas, processos de conformação e queima prévias, além de possuir menor massa e propriedades termomecânicas similares aos pré-moldados tradicionais (BRAULIO, et al., 2006; PANDOLFELLI, SAKO, (2014); PANDOLFELLI, RAMAL Jr., SALOMÃO, 2004).

#### 4.4.1 Características que determinam a escolha de materiais refratários

Essencialmente todo o processo de fundição que envolve a fusão de ligas metálicas é realizado em contato com um material refratário, sendo o tipo de refratário dependente essencialmente do tipo de liga a ser produzida e da região específica do forno em questão. Portanto, para a escolha do refratário mais adequado, torna-se necessário o entendimento de características que envolvem o ambiente de operação do forno, as interações entre refratário-metal, refratário-escória (BALDAM, VIEIRA, 2014; PANDOLFELLI, SAKO, 2014; CALLISTER Jr., 2012).

Os tijolos refratários porosos são aplicados em isolamento térmico, enquanto que os refratários em contato com o metal são classificados como densos para evitar ataques químicos. No caso dos revestimentos refratários utilizados para fusão de ligas de alumínio, esses são passíveis de ataque pelo metal fundido.

Sendo assim, a escolha de materiais refratários mais adequados de acordo com cada região do forno é primordial, como no caso da utilização de material denso na região do fundo do forno, pelo fato de possuírem maior resistência mecânica devido à preocupação com o impacto e abrasão (BALDAM, VIEIRA, 2014; BRAULIO, et al., 2006; PANDOLFELLI, SAKO, (2014); PANDOLFELLI, RAMAL Jr., SALOMÃO, 2004).

#### 4.4.2 Características para escolha de cadinhos

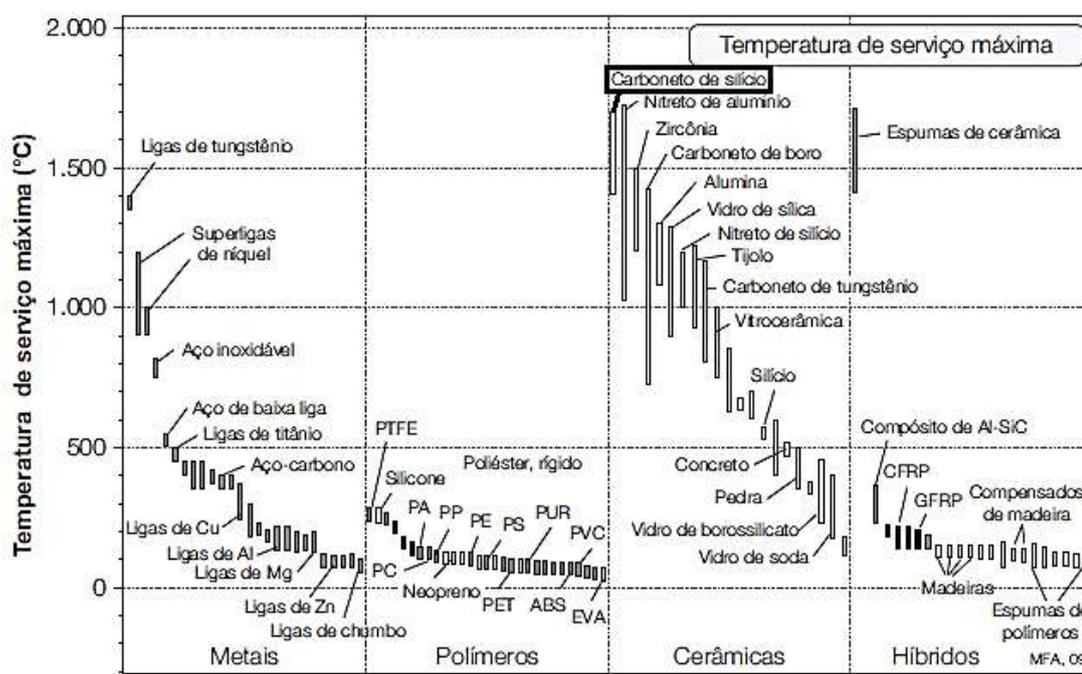
O material utilizado na fabricação do cadinho é escolhido levando-se em consideração, além do tipo de liga utilizado, a temperatura de fusão da matéria-prima e o rendimento térmico que se pretende obter. Cadinhos utilizados para fornos de fundição são, em geral, constituídos pelos seguintes materiais: argila, grafite, argila e grafite, carbetos de silício e ferro fundido. Já os aços, devem ser evitados como materiais para construção de cadinhos devido à reação aluminotérmica, fortemente exotérmica e capaz de fundir o cadinho (FERREIRA, 2010).

As características que justificam a ampla utilização de carbetos de silício como materiais para cadinhos estão relacionadas a sua resistência à oxidação e capacidade

de suportarem elevadas temperaturas durante o processo de fusão da matéria-prima, podendo suportar temperaturas tão elevadas quanto 1500 °C, como visto na Figura 5.

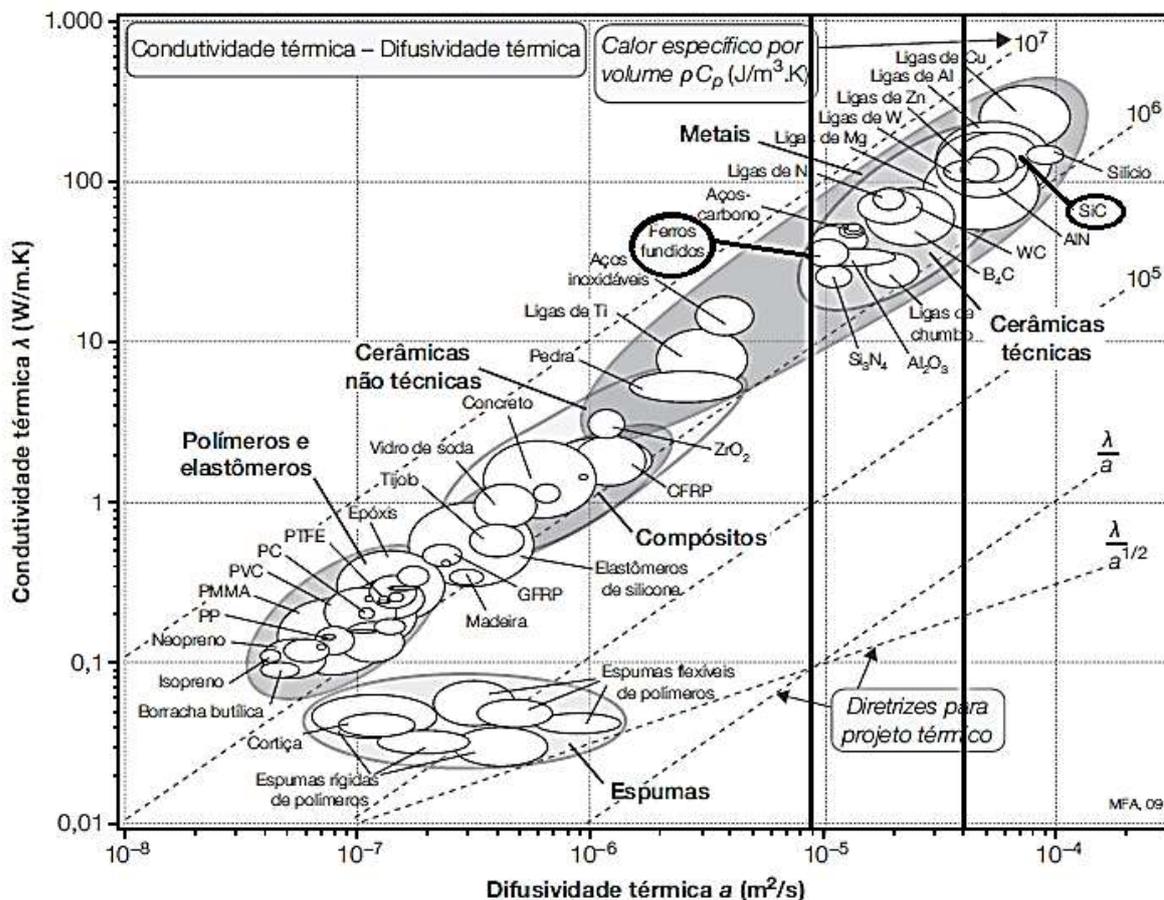
Além disso, devido sua alta difusividade térmica, diminui-se o tempo necessário para a fusão da matéria-prima, diferente do ferro fundido, que apresenta menor difusividade térmica quando comparado com o carvão de silício. Nas Figuras 6 e 7 tem-se uma comparação entre a difusividade térmica e custo entre os materiais carvão de silício e ferro fundido, respectivamente.

Figura 5 - Diagrama de temperatura máxima de serviço para as classes de materiais.



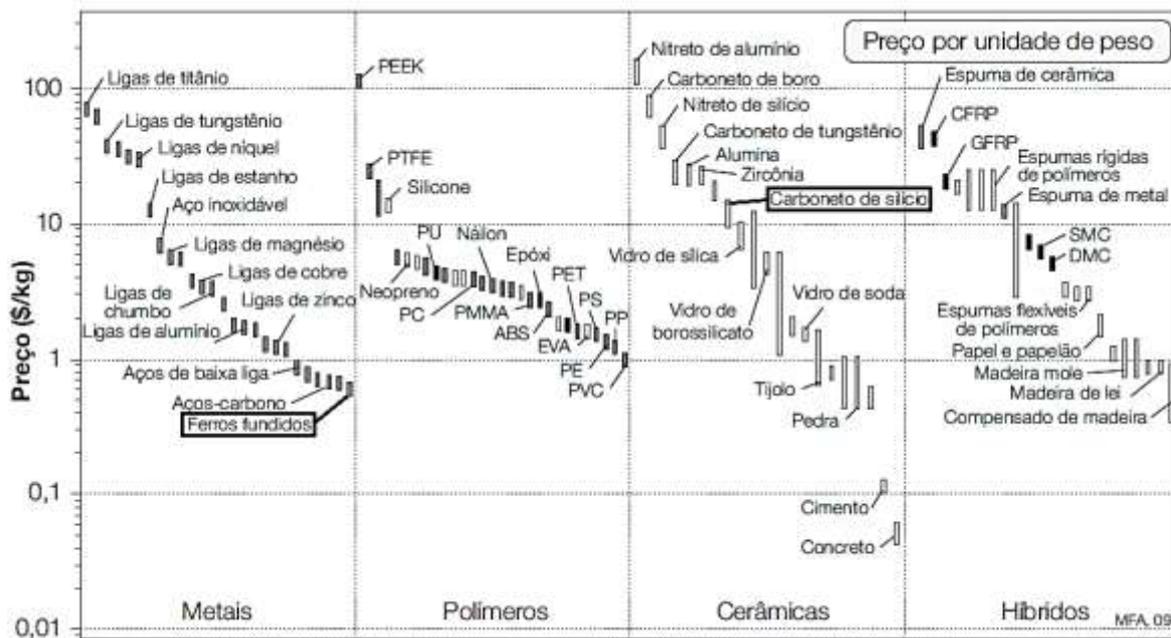
Fonte: Adaptado de Ashby (2012).

Figura 6 - Mapa de propriedade de condutividade térmica em relação à difusividade térmica.



Fonte: Adaptado de Ashby (2012).

Figura 7 - Diagrama de barra de custo para as classes de materiais.



Fonte: Adaptado de Ashby (2012).

### 5.1.1.1 Revestimento refratário do forno

Os refratários que apresentam elevado teor de  $Al_2O_3$  em sua composição, como os refratários aluminosos, não são adequados para serem utilizados na fusão de latas de alumínio, pois essas ligas possuem alto teor de magnésio (para a tampa), capaz de reagir com a  $Al_2O_3$ , resultando em uma expansão que favorece a infiltração de metal líquido, tendo como consequência um aumento no desgaste do material refratário. Na Tabela 6 é apresentada a composição química de ligas utilizadas em latas de alumínio.

**Tabela 6 - Composição química de ligas utilizadas na fabricação de latas de alumínio.**

Composição (%peso) <sup>a</sup>								
Ligas	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
ASTM 3004 (CORPO)	0,3	0,7	0,25	1,0-1,5	0,8-1,3	-	0,25	-
ASTM 5182 (TAMPA)	0,2	0,35	0,15	0,2-0,5	4,0-5,0	0,10	0,25	0,10

<sup>a</sup> O restante da composição é constituído por alumínio.

**Fonte: Adaptado de Kurzawa; Pescador; Verran (2005).**

Como material refratário, apesar da melhor resistência mecânica relacionada aos tijolos pré-moldados, propõe-se a utilização de concreto refratário, podendo esse possuir alto teor de sílica devido ao baixo custo, devido à ausência de juntas, facilidade referente à moldagem e capacidade de ajuste da espessura do material refratário de acordo com a necessidade do projeto.

### 5.1.1.2 Cadinho e suporte do cadinho

A utilização de cadinhos de carbetto de silício para fusão de ligas de alumínio é ampla devido à alta temperatura de trabalho que esse material pode resistir, além de sua elevada condutividade térmica, possuindo, assim, melhor desempenho que os cadinhos de ferro fundido, que são limitados em função da temperatura em que se

fundem (entre 1150 a 1300°C), quando não se tem o controle da temperatura do forno. Em contrapartida, não apresentam baixo custo.

Entretanto, para fornos de fundição de ligas de alumínio que possuem controle de temperatura durante a etapa de aquecimento da matéria-prima, a escolha do carbetto de silício como cadinho pode ser substituída pelo ferro fundido devido ao seu baixo custo.

O suporte e o cadinho podem ser construídos com o mesmo material, porém, o suporte deve possuir dimensões superiores que a base do cadinho já que deve ser capaz de atuar como uma base estável para garantir a segurança do forno durante a etapa de fusão da matéria-prima.

#### 5.1.1.3 Sistema de aquecimento

A utilização de combustíveis gasosos para aquecimento do forno de fusão torna-se viável, considerando o custo e a disponibilidade do gás. Entre os combustíveis gasosos, o GLP (gás liquefeito de petróleo) é o combustível mais indicado para ser utilizado no sistema de aquecimento do forno. O seu melhor desempenho baseia-se nas seguintes características: obtenção do gás por meio da compra de botijões de 13 kg no comércio varejista, alta disponibilidade, agilidade e praticidade na etapa de substituição dos botijões e baixo custo (PETROBRAS, 2018).

#### 5.1.2 Transferência de calor no forno

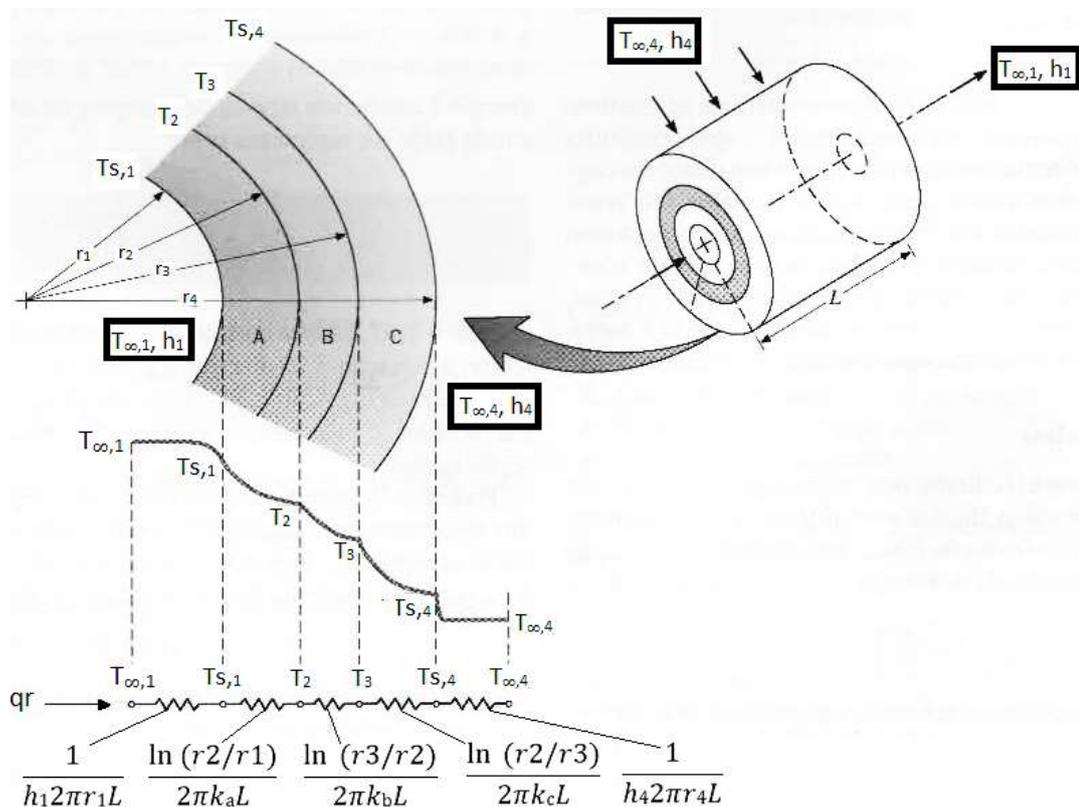
A determinação da taxa de transferência de calor do forno pode ser realizada por meio da Equação (4). Entretanto, para um sistema radial composto de três camadas, a taxa de transferência pode ser determinada com a associação a um circuito elétrico de acordo com a Equação (5), onde  $L$  é o comprimento do cilindro (m),  $k$  é a condutividade térmica (W/m.K), sendo  $k_a$  e  $k_b$  a condutividade térmica para as paredes a e b, respectivamente;  $T_s$  é a temperatura na superfície (K), onde  $T_{s1}$  e  $T_{s2}$

são as temperaturas nas superfícies um e dois, respectivamente;  $r$  é o raio do cilindro (m), sendo  $r_1$  e  $r_2$  os raios interno e externo do cilindro, respectivamente, e  $r_3$  o raio interno do revestimento refratário da estrutura do forno;  $t_\infty$  é a temperatura do fluido externo (K), sendo  $t_{\infty,1}$  e  $t_{\infty,3}$  a temperatura máxima de trabalho no interior do forno e a temperatura na superfície externa da estrutura do forno, respectivamente;  $h$  é o coeficiente convectivo ( $W/m^2.K$ ), sendo  $h_1$  e  $h_3$  as os coeficientes convectivos no ambiente interno e externo do forno, respectivamente. Na Figura 8 está esquematizada a associação de um circuito elétrico para parede composta com três camadas em um sistema radial.

$$q_r = 2\pi Lck(T_{s1} - T_{s2}) / \ln (r_2/r_1) \quad (4)$$

$$q_r = t_{\infty,1} - t_{\infty,3} / [(1/2\pi r_1 L c h_1) + (\ln(r_2/r_1)/2\pi k_a L c) + (\ln (r_3/r_2)/2\pi k_b L c) + (1/2\pi r_3 L c h_3)] \quad (5)$$

Figura 8 - Transferência de calor em sistema cilíndrico para parede composta com três camadas.



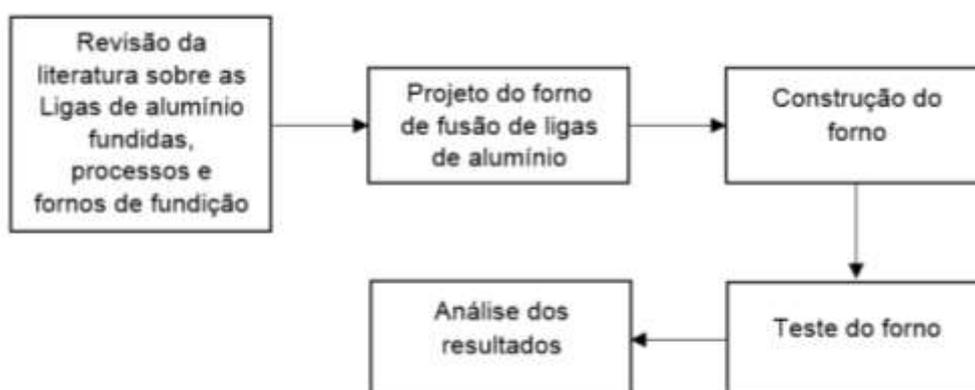
Fonte: Adaptado de Incropera (2011).

## 5 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO DE PESQUISA

### 5.1 Fluxograma de atividades

Na Figura 9 é mostrado o fluxograma referente às atividades desenvolvidas para se obter o forno de fusão de alumínio. A etapa inicial, a revisão da literatura sobre as ligas de alumínio e os processos e fornos de fundição, foi realizado por meio de livros, artigos e sites de empresas.

**Figura 9 - Fluxograma para o desenvolvimento do projeto.**



Fonte: Autoria própria.

### 5.2 Projeto do forno de fusão de ligas de alumínio

Inicialmente foram definidos os requisitos e as restrições do projeto em função da finalidade do forno de fusão (para laboratório de ensino), do custo para sua construção e da revisão da literatura. Essas informações estão apresentadas na Tabela 7.

**Tabela 7 - Requisitos e restrições para o projeto do forno.**

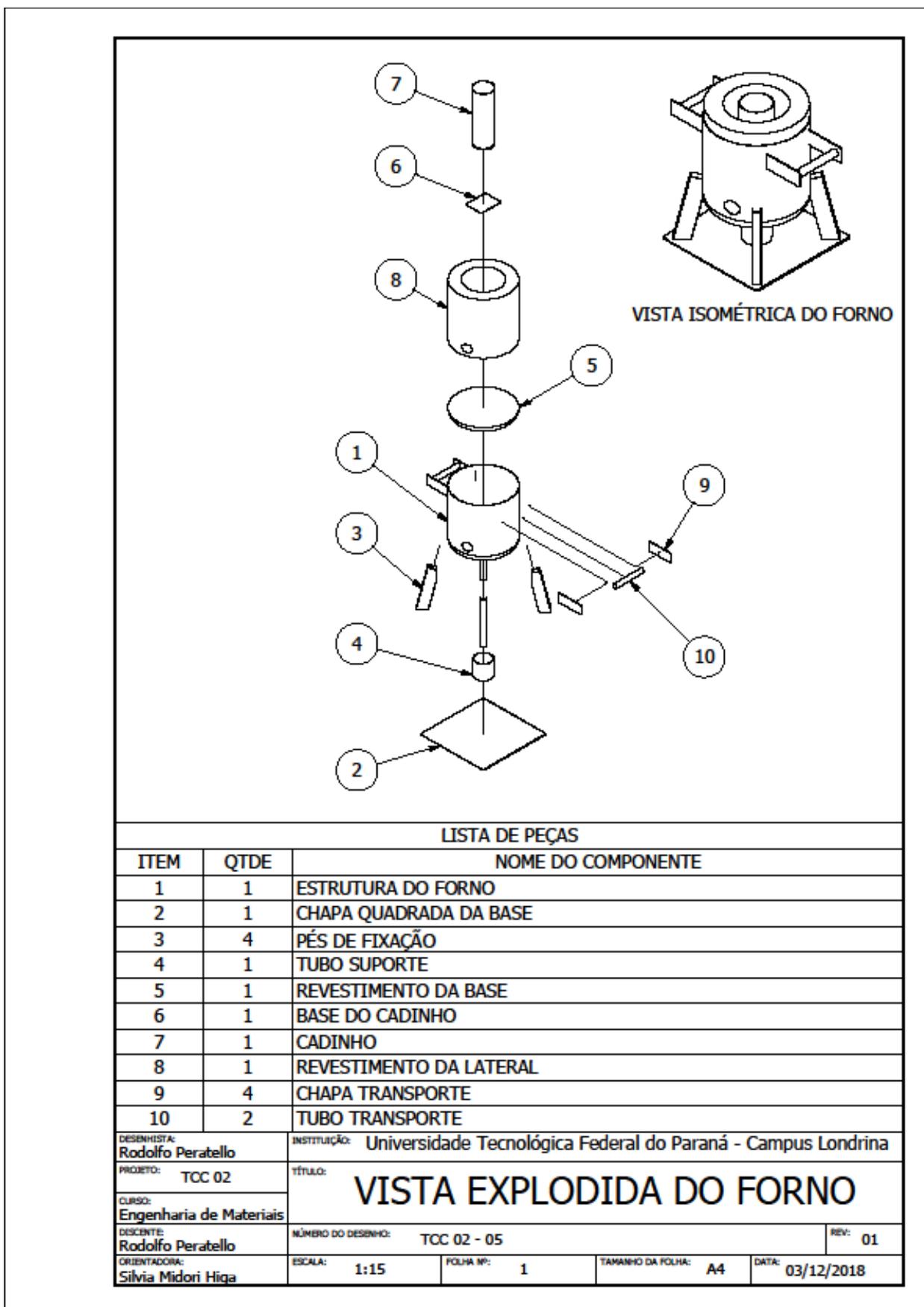
Requisitos	Restrições
Temperatura de operação superior a 700 °C	Cilindro de gás refrigerante como estrutura
Pequeno porte	Cadinho do tipo móvel
Fácil construção, transporte e operação	Baixo custo de fabricação

**Fonte: Autoria própria.**

### 5.3 Construção do forno

A Figura 10 ilustra uma visão da vista explodida do forno de fusão de ligas de alumínio. Nessa seção são abordados os materiais empregados, as etapas de obtenção de cada componente e acessório do forno.

Figura 10 – Vista explodida do forno.



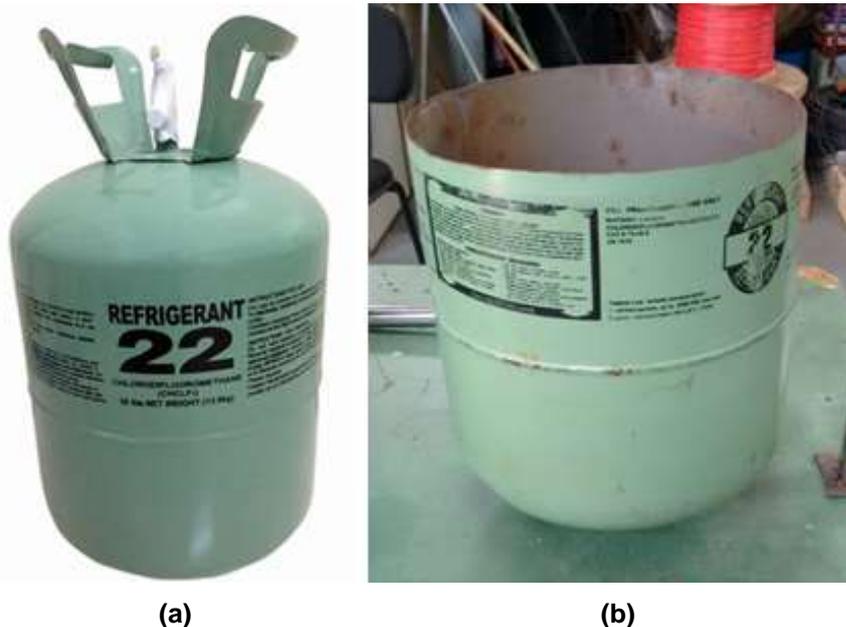
Fonte: Autoria própria.

### 5.3.1 Estrutura do forno

Para a estrutura do forno foi utilizado um cilindro de gás refrigerante com diâmetro externo de 242 mm e altura de aproximadamente 270 mm, por possuir teor de carbono similar ao aço SAE 1020.

Com a utilização de uma lixadeira, realizou-se um corte na seção transversal do cilindro de gás refrigerante, obtendo-se o corpo do forno. Esse componente além de atuar como parte estrutural do forno, onde será posicionado o sistema de aquecimento do forno e soldado os acessórios da base, também servirá como molde para a moldagem do revestimento refratário. Na Figura 11 (a) e (b) tem-se o cilindro de gás refrigerante utilizado e a estrutura obtida após o processo de corte.

**Figura 11 - Componente estrutural do forno. (a) Cilindro utilizado; (b) Cilindro após o processo de corte.**



Fonte: (a) Embrar (2018) e (b) Autoria própria.

### 5.3.2 Base do forno

Para aumentar a altura, estabilidade e segurança do forno durante a etapa de fusão das ligas de alumínio, foram soldados numa chapa de aço de base quadrada

quatro pés de fixação, de seção retangular e de aço, unidos posteriormente ao corpo do forno, como visto na Figura 12.

**Figura 12 - Base do forno finalizada.**



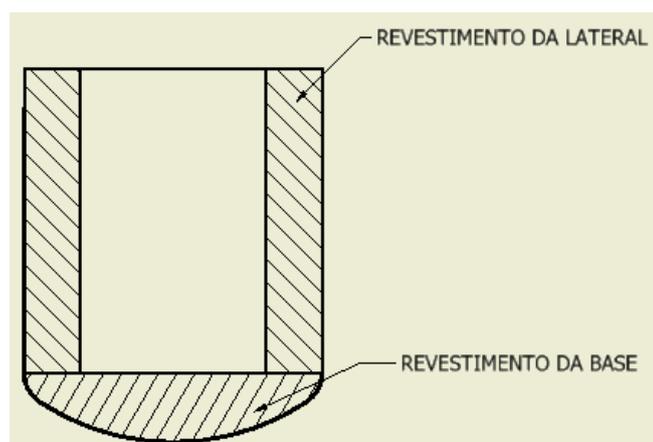
**Fonte: Autoria própria.**

### 5.3.3 Determinação e moldagem do revestimento refratário do forno

Para o isolamento térmico do forno foi utilizado um concreto refratário sílico-aluminoso, denso, da classe 50% alumina, com temperatura máxima de utilização de 1450 °C, densidade de 2,25 g/cm<sup>3</sup> e granulometria inferior a 5,0 mm. A escolha do revestimento do forno de fusão de alumínio foi feita a partir dos seguintes critérios: a temperatura máxima de trabalho, o custo e a disponibilidade. A composição química do concreto refratário pode ser visualizada no anexo A.

O revestimento refratário do forno foi dividido em dois componentes: revestimento da base e da lateral. Na Figura 13 é apresentado um esquema do posicionamento do revestimento da base e da lateral do forno.

**Figura 13 - Posicionamento do revestimento refratário inferior e superior na estrutura do forno.**



**Fonte: Autoria própria.**

Conforme informado pelo fabricante, a proporção ideal de água a ser adicionada para a aplicação do concreto deve estar entre 12 a 18%. Outra orientação técnica fornecida foi quanto à espessura de revestimento, que não deve ser inferior a 30 mm devido à possibilidade de ocorrência de trincas no material de revestimento. Portanto, optou-se por utilizar 15% de água e 45 mm de espessura para a preparação e moldagem do revestimento refratário do forno, respectivamente.

Inicialmente foi realizada a moldagem do revestimento da base do forno, de maneira manual e com o intuito de se obter uma estrutura plana. O objetivo de uma superfície plana para a base é a necessidade de facilitar o posicionamento do gabarito utilizado para a moldagem do revestimento da lateral, conforme será discutido adiante. Na Figura 14 é mostrada a etapa de moldagem do revestimento da base do forno.

**Figura 14 - Revestimento refratário da base do forno.**



**Fonte: Autoria própria.**

O tempo de secagem determinado para o revestimento da base foi de 72 horas, tendo em vista a necessidade de resistir ao peso do revestimento lateral do forno.

Conforme discutido anteriormente, para que fosse possível obter uma espessura de 45 mm para o revestimento da lateral do forno, utilizou-se um gabarito feito de cano de PVC (Policloreto de vinila) de diâmetro de 150 mm, centralizado no interior do forno.

A escolha do gabarito para modelar o revestimento refratário da lateral seguiu os seguintes critérios: superfície externa lisa, seção constante, dimensões, baixo custo e peso, além da facilidade de realizar operações de corte. Na Figura 15 são mostrados os gabaritos utilizados para auxiliar na moldagem do revestimento lateral do forno.

**Figura 15 - Gabaritos do revestimento lateral do forno.**

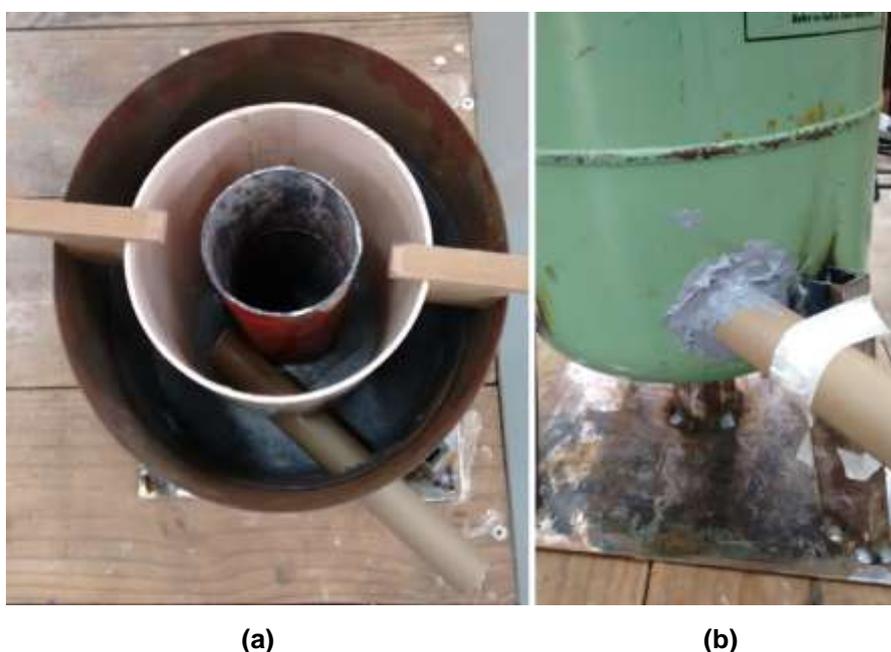


**Fonte: Autoria própria.**

Devido à necessidade de realizar o posicionamento do queimador na região interna do forno, realizou-se a uma furação com diâmetro de 35 mm tanto na estrutura quanto no gabarito de PVC utilizado para moldagem do revestimento lateral. O corte foi realizado com uma furadeira acoplada a uma serra copo, posicionada a um ângulo de aproximadamente  $45^\circ$  a normal em relação a superfície da parede do forno para gerar um fluxo do gás de forma circular.

Para evitar a penetração do revestimento refratário na região interna do gabarito de PVC, utilizou-se um segundo cano de PVC com diâmetro externo equivalente ao diâmetro dos furos do gabarito e da estrutura metálica. Entretanto, visando garantir a segurança dessa etapa, também foi realizada a aplicação de espuma de PU (Poliuretana) nas regiões de contato entre o cano de gabarito do furo com a estrutura e com o gabarito do revestimento lateral, conforme apresentado na Figura 16.

**Figura 16 - Preparação para a moldagem do revestimento lateral. (a) Posicionamento dos gabaritos; (b) Aplicação da espuma de poliuretana para vedação.**



**Fonte: Autoria própria.**

A moldagem do revestimento lateral do forno foi realizada de maneira manual. Após o tempo de 72 horas necessárias para a secagem do revestimento, realizou-se a retirada do gabarito com o auxílio de um alicate. Na Figura 17 é apresentado o revestimento lateral do forno após a etapa de secagem.

**Figura 17 - Revestimento térmico da lateral após etapa de secagem.**



**Fonte: Autoria própria.**

#### 5.3.4 Base e cadinho do forno

Para o cadinho do forno utilizou-se um extintor de incêndio comercial de pó químico de modelo ABC médio. Sua escolha teve como base características como as dimensões, custo, disponibilidade, possibilidade de realização de operações de corte e soldagem.

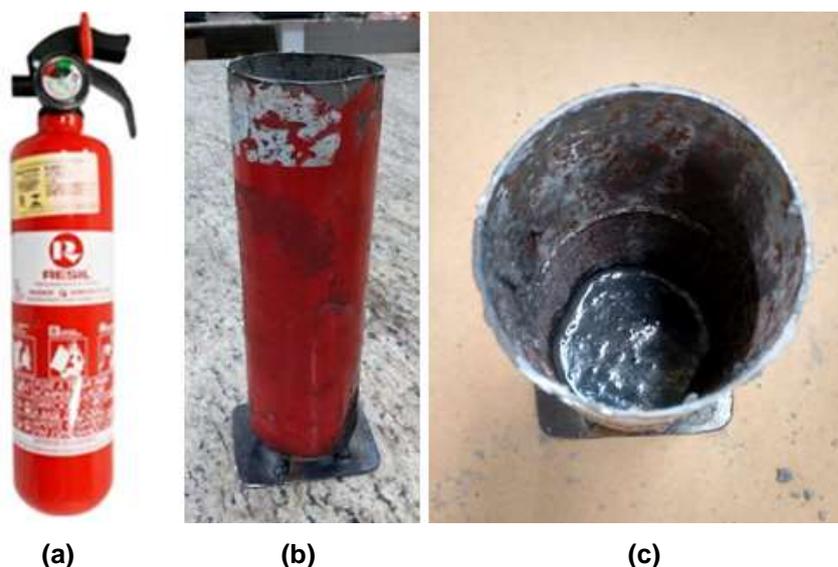
Uma das características mais importantes dessa etapa é a geometria da base e do cadinho do forno, visto a sua influência no volume útil disponível para reação de combustão do gás GLP proveniente do sistema de aquecimento do forno. Esse volume tem uma relação direta com o desempenho do forno durante a etapa de aquecimento e fusão da matéria-prima.

Portanto, visando maximizar o desempenho durante essa etapa, optou-se por utilizar um extintor cujo diâmetro externo fosse o menor possível entre os extintores comerciais, como é o caso do modelo ABC médio. Já para a base do cadinho foi necessário a utilização de uma chapa lisa de aço, de modo a propiciar maior estabilidade para o cadinho durante a etapa de fusão da matéria-prima.

Visando aumentar o peso do conjunto base e cadinho, realizou-se a aplicação do revestimento refratário descrito anteriormente, na região da base do cadinho. Por fim, realizou-se a união dos componentes descritos anteriormente por meio da

operação de soldagem. Na Figura 18 é apresentado o extintor comercial utilizado, os componentes após a operação de soldagem e o revestimento térmico na região de base do cadinho.

**Figura 18 - Base e cadinho do forno. (a) Extintor comercial utilizado (b) Base e cadinho após a operação de soldagem; (c) Revestimento térmico da região inferior do cadinho.**



Fonte: Adaptado de FASTAUTOPEÇAS (2018).

### 5.3.5 Sistema de aquecimento do forno

O principal componente do sistema de aquecimento do forno é o queimador, constituído de componentes denominados de: estrutura do queimador, tambor de união, controlador de vazão, kit gás para alta pressão e botijão de gás GLP 13 kg. Com exceção dos itens comerciais, as dimensões dos componentes utilizados no sistema de aquecimento estão apresentadas nos Apêndices A e B.

#### 5.1.2.1 Construção do queimador

Para o sistema de aquecimento adquiriu-se um kit de gás para alta pressão comercial, que possui uma mangueira para alta pressão com comprimento de 4 m,

um regulador de vazão de gás e duas abraçadeiras de metal. Na Figura 19 (a) pode ser observado o kit de gás obtido.

Para fabricação da estrutura do queimador, utilizou-se um tubo de aço com diâmetro externo de 32 mm e 250 mm de comprimento, sendo feitas furações na estrutura com auxílio de brocas de aço rápido de 6 mm, como visto na Figura 19 (b). Os furos laterais foram feitos para favorecer a entrada de ar atmosférico no interior do forno, e, da reação de combustão do gás GLP.

Como o sistema de aquecimento do forno não possui ventilação forçada, a entrada de ar ocorre pelo processo de arraste devido a chama que se forma na ponta do queimador durante a reação de combustão, conforme ilustrado na Figura 20.

**Figura 19 - Componentes do sistema de aquecimento do forno. (a) Kit de gás para alta pressão; (b) Detalhe da furação na estrutura do queimador.**



Fonte: Autoria própria.

**Figura 20 - Mecanismo de arraste de ar na estrutura do queimador.**



Fonte: Autoria própria.

Entretanto, para conectar o kit de gás à estrutura do queimador foi necessário fabricar um terceiro componente denominado de tambor de união. Para isso, utilizou-se um tarugo de alumínio com diâmetro de 1 ½" e 80 mm de comprimento, sendo necessário a realização de três operações: torneamento, furação e rosqueamento.

A operação de usinagem foi realizada para reduzir o diâmetro do tarugo de alumínio de modo que fosse possível conectá-lo a estrutura do queimador sem que houvesse folga excessiva entre os dois componentes.

Na face oposta a região onde foi realizada a redução no diâmetro do tarugo, realizou-se as operações de furação e rosqueamento. Essa etapa foi realizada para permitir a conexão entre o tarugo e o controlador de vazão presente no kit de gás para alta pressão. Na Figura 21 são apresentados os resultados das operações realizadas no tambor de união e a montagem do sistema de aquecimento do forno.

**Figura 21 - Detalhes do tambor de união e montagem do sistema de aquecimento do forno. (a) Redução do diâmetro externo; (b) Furação e rosca; (c) Montagem dos componentes.**



(a)

(b)

(c)

Fonte: Autoria própria.

### 5.3.6 Sistema de transporte do forno

Para o sistema de transporte do forno foram utilizados chapas e tubos de aço com dimensões de 105 x 40 x 2 mm e diâmetro externo de 3/4" x 132 mm de comprimento, respectivamente. As chapas foram soldadas no tubo, onde

posteriormente realizou-se a soldagem desses componentes na estrutura do forno, conforme apresentado na Figura 22.

**Figura 22 - Sistema de transporte do forno.**



**Fonte: A autoria própria.**

O tipo do processo utilizado para a soldagem dos componentes à estrutura do forno foi a soldagem MIG (*Metal Inert Gás*), realizada no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal Paraná – Câmpus Londrina.

#### 5.4 Testes do forno para a fusão da matéria-prima

Foram utilizadas latas de alumínio de 269 ml e 350 ml como matéria-prima e um molde de gesso para moldagem do metal fundido. O teste do forno foi realizado três vezes.

O primeiro teste teve como objetivo avaliar o desempenho do sistema de aquecimento do forno a partir da temperatura máxima obtida com a variação na relação gás/oxigênio durante a etapa de fusão da matéria-prima. Para isso, foram realizadas vedações na entrada de ar do queimador.

Após a avaliação do sistema de aquecimento do forno, realizou-se um segundo teste para obtenção de um lingote de alumínio após a fusão da matéria-prima. Entretanto, devido às dificuldades encontradas, conforme será discutido mais

adiante, foi realizado um terceiro teste para determinar o rendimento metálico de 30 latas de alumínio. Os testes foram realizados em um ambiente aberto, conforme apresentado na Figura 23.

**Figura 23 - Forno durante a etapa de fusão da matéria-prima.**



**Fonte: Autoria própria.**

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse tópico serão abordadas questões a respeito das dificuldades enfrentadas durante a construção do forno e do sistema de aquecimento e uma avaliação do rendimento metálico da fusão de 30 latas de alumínio e a energia necessária para isso.

### 6.1 Dificuldades no processo de construção do forno

Durante a etapa de soldagem dos pés de fixação à estrutura do forno, foi possível observar que, devido a tensões térmicas provenientes do processo de soldagem, a estrutura do forno passou de uma geometria circular para uma geometria oval, o que fez que a espessura do revestimento lateral não permanecesse uniforme em todo o perímetro do forno, o que também prejudicou o posicionamento dos gabaritos de madeira para a moldagem do revestimento lateral.

Para a etapa de moldagem do revestimento lateral, onde foi necessário a realização de uma furação no corpo do forno e no gabarito de PVC, devido à baixa rigidez do gabarito, não foi possível essa operação em apenas uma etapa. Sendo assim, foi necessário realizar a furação na estrutura e posteriormente no gabarito de PVC. Entretanto, ao realizar esse procedimento, diminuiu-se a precisão no posicionamento no queimador na região interna do forno, já que o corte deve possuir um bom alinhamento para permitir que o queimador fique posicionado na região entre o revestimento lateral e a superfície externa do cadinho.

### 6.2 Sistema de aquecimento

Durante a realização dos testes do sistema de aquecimento do forno foi possível observar que a quantidade de oxigênio foi insuficiente quando realizada a

vedação dos furos na estrutura do queimador, já que não houve a formação da chama na ponta do queimador.

Sendo assim, novamente foi realizado o teste do sistema de aquecimento, mas sem a vedação dos furos presentes na estrutura. Desse modo, com a utilização de um termômetro de infravermelho, foi possível observar no interior do forno uma temperatura máxima de 350 °C, muito inferior a temperatura necessária para a fusão da matéria-prima.

Devido ao mau funcionamento do queimador em função da quantidade do oxigênio, além da temperatura máxima obtida anteriormente, foi realizada uma nova sequência de furos na estrutura do queimador, de modo a permitir uma maior entrada de ar, conforme apresentado na Figura 24.

**Figura 24 - Abertura para entrada de ar do queimador.**



**Fonte: Autoria própria.**

Posteriormente, foi realizado um novo teste com o sistema de aquecimento do forno, onde foi possível observar que a temperatura no interior do forno variou entre 850 °C a 920 °C, sendo suficiente para a fusão da matéria-prima.

### 6.3 Rendimento metálico

Após a realização dos ajustes na estrutura do queimador, foi realizado o teste do forno. Após um período de aproximadamente 7 minutos, foi possível observar a fusão da matéria-prima. Entretanto, como não ocorreu uma separação adequada entre a escória e o metal fundido, não foi possível realizar o vazamento no molde de gesso.

Sendo assim, com o intuito de realizar a remoção da escória antes do vazamento do metal no molde, foi realizado um terceiro teste, para o qual foram utilizadas 30 latas de alumínio. Novamente, após aproximadamente 7 minutos após o aquecimento do forno, ocorreu a fusão total da matéria-prima.

Para favorecer a formação e, conseqüentemente, a separação entre a escória e o metal fundido, foi adicionada uma pastilha de cloreto de sódio de aproximadamente 10 g. Após a separação, a escória foi removida com auxílio de uma espátula de aço inox.

Posteriormente, com auxílio de tenazes, realizou-se o basculamento do cadinho para o vazamento do metal no molde de gesso. Por fim, realizou-se a medição da massa da escória removida e do lingote de alumínio obtido. Na Tabela 9, Figuras 25 e 26, é possível observar o rendimento metálico obtido com o terceiro experimento, o molde utilizado e as dimensões do lingote obtido, respectivamente.

**Tabela 8 - Rendimento metálico obtido do teste de fusão das latas de alumínio.**

Material	Massa (g)	Rendimento metálico (%massa)
Matéria-prima	378,5	
Escória	133,2	58,81
Lingote de alumínio	222,6	

**Fonte: A autoria própria.**

Figura 25 – Teste de fundição das latas de alumínio em molde de gesso. (a) Molde preenchido com alumínio; (b) Lingote após a retirada do molde.



(a)

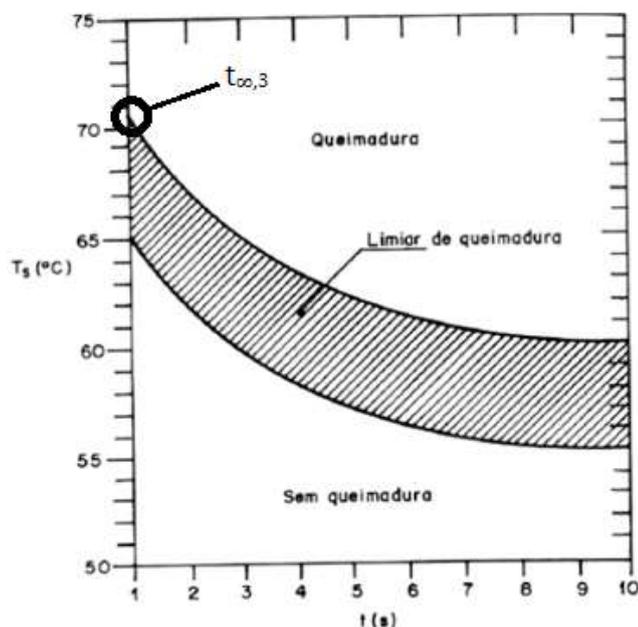
(b)

Fonte: Autoria própria.

#### 6.4 Determinação da taxa de transferência de calor do forno e calor necessário para fusão da matéria-prima

O cálculo da taxa de transferência de calor foi realizado de acordo com a Equação (5), onde as temperaturas no interior do forno ( $t_{\infty,1}$ ) e superfície externa ( $t_{\infty,3}$ ) são 920 °C e 71 °C. A temperatura superfície externa da estrutura foi definida de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 13970:19971), conforme a Figura 27, a qual estabelece os valores limites para temperatura de superfícies aquecidas e sem revestimento, levando como base o tempo mínimo para ocorrência de queimaduras em caso de contato com a superfície, como é o caso do forno durante o processo de fusão da matéria-prima (SENNÁ, 2017).

Figura 26 - Faixa do limiar de queimadura para contato da pele com superfícies lisas de metal aquecido e sem revestimento (pintura).



Fonte: Adaptado de Senna (2017).

Os coeficientes convectivos na região interna ( $h_1$ ) e externa do forno ( $h_3$ ) foram definidos por meio de valores tabelados em (KANTHAL, 1999), onde para o presente projeto os valores correspondem a  $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$  e  $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , respectivamente.

Conforme o fabricante, a condutividade térmica do revestimento refratário do forno ( $k_a$ ) é de aproximadamente  $1,22 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ . Já a condutividade térmica da estrutura do forno ( $k_b$ ) é de aproximadamente  $52,9 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ .

O raio do revestimento térmico ( $r_1$ ) é de  $0,075 \text{ m}$ , assim como o raio interno ( $r_2$ ) e externo da estrutura do forno ( $r_3$ ) são de  $0,120 \text{ m}$  e  $0,121 \text{ m}$ , respectivamente.

Por fim, o comprimento do cilindro ( $L_c$ ) foi de  $0,245 \text{ m}$ . Logo, a taxa de transferência de calor do forno é:

$$q_r = 972 \text{ W} \quad (6)$$

Para o terceiro experimento, de acordo com a Equação (1), calculou-se o calor necessário para aumentar a temperatura do metal até a temperatura de vazamento,

onde  $m$  é 0,3785 kg,  $c$  é 903 J/kg.K. Para a temperatura ambiente foi utilizado 25 °C, já para a temperatura de vazamento utilizou-se 920 °C, considerando que o forno se encontrava nessa temperatura durante a etapa de vazamento do metal líquido no molde. Logo, o calor necessário para aumentar a temperatura do metal até a temperatura de vazamento é:

$$Q = 728 \text{ W} \tag{7}$$

## 6 CONCLUSÃO

Foi possível observar que o forno construído tem capacidade de realizar a fusão de ligas de alumínio e que os requisitos e as restrições de projeto foram atendidos.

A temperatura máxima de operação do forno está estritamente relacionada com a relação gás/oxigênio fornecida pelo queimador. O controle adequado dessa relação é de extrema importância, já que, conforme visto, um baixo teor de oxigênio pode fazer com que a temperatura no interior do forno não seja suficiente para permitir a fusão da matéria-prima.

Devido a formação de escória, foi possível observar uma alta perda de massa quando comparado as massas da matéria-prima de entrada e do lingote obtido, o que resultou em um rendimento metálico de aproximadamente 58,81%.

A utilização de um projeto inicial é importante para o direcionamento das operações necessárias para a construção do forno. Entretanto, em alguns casos, faz-se necessário modificações e/ou ajustes para permitir que o objetivo final seja alcançado.

Além disso, com o presente trabalho, também foi possível compreender as características que envolvem a construção de um forno de ligas de alumínio de pequeno porte, além de possibilitar compreender na prática as variáveis que envolvem a etapa de fusão da matéria-prima.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As sugestões a seguir são baseadas na melhoria do funcionamento do forno, no seu rendimento e na qualidade do lingote:

- Realizar a construção de uma tampa para o forno, de modo que a perda de calor durante a etapa de fusão de matéria-prima seja reduzida;
- Realizar a utilização de um bico no cadinho para permitir o direcionamento do metal fundido durante a etapa de preenchimento do molde;
- Realizar a construção de um queimador de modo que seja possível quantificar a vazão de gás;
- Realizar uma avaliação da relação gás/oxigênio do queimador e a consequência na temperatura do forno quando modificada essa relação;
- Utilizar um fluxo escorificante específico para limpeza de alumínio durante a etapa de fusão da matéria-prima;
- Utilizar um material de maior rigidez para o gabarito do revestimento lateral;
- Utilizar um molde metálico para obtenção de um lingote com melhor acabamento superficial.

## REFERÊNCIAS

ASHBY, M. F. **Seleção de Materiais no Projeto Mecânico**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

ASM INTERNATIONAL. **ASM HANDBOOK**: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. 10. ed. Ohio: ASM International Handbook Committee, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **ABAL: Fundamentos e Aplicações do Alumínio**. São Paulo: ABAL, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **ABIFA: Desempenho do setor de fundição janeiro/2018**. Disponível em: <<http://www.abifa.org.br/indices-setoriais/>>. Acesso em: 20 mai. 2018.

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

BRAULIO, M. A. L. et al., Análise sistêmica para seleção de refratários para transporte de alumínio líquido. **Cerâmica**. São Paulo, v. 52, n. 323, p. 115-22, 2006. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0366-69132006000300002&lng=en&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0366-69132006000300002&lng=en&nrm=iso&tlng=pt)>. Acesso em: 20 mai. 2018.

CALLISTER Jr., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CASTRO, W. B. de; KIMINAMI, C. S.; OLIVEIRA, M. F. de. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2013.

MOURÃO, M. B.; FERREIRA NETO, J. B.; TAKANO, C. Redução carbotérmica de alumina em presença de estanho como solvente. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**. São Paulo, v. 8, n. 4, p. 237-242, 2011. Disponível em: <<http://www.tecnologiammm.com.br/doi/10.4322/tmm.2011.037>>. Acesso em: 20 mai. 2018.

CONSTANTINO, Vera R. L. et al. Preparação de Compostos de Alumínio a Partir da Bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático. **Química Nova**. São Paulo, v. 25, n. 3, p. 490-498, 2002. Disponível em: <

[http://quimicanova.sbq.org.br/imagebank/pdf/Vol25No3\\_490\\_23.pdf](http://quimicanova.sbq.org.br/imagebank/pdf/Vol25No3_490_23.pdf)>. Acesso em: 25 mai. 2018.

DJ FORNOS INDUSTRIAIS. **Forno para fundição de alumínio**. Disponível em: <<http://www.djforneos.com.br/forno-fundicao-aluminio>>. Acesso em: 25 mai. 2018.

EMBRAR – Climatização e Refrigeração. **Gás refrigerante R22**. Disponível em: <<http://embrar.com.br/produtos/2051/gas-refrigerante-r22-cilindro/>>. Acesso em: 28 mai. 2018.

ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S. Effect of salt/oxide interaction on the process of aluminum recycling. **Journal of Light Metals**. v. 2, n. 2, p. 89-93, 2002. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1471531702000275>>. Acesso em: 20 mai. 2018.

FASTAUTOPEÇAS. Disponível em: <<http://fastautopecas.com.br/produto/extintor-automotivo-resil-abc-copia/15861>>. Acesso em: 25 nov. 2018.

FERREIRA, J. G. G. de C. **Tecnologia da fundição**. 3. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2010.

GARCIA, A. **Solidificação: Fundamentos e Aplicações**. 2. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2007.

GRION FORNOS. **Fornos a gás basculante – FB**. Disponível em: <<http://grionfornos.com.br/novosite/?p=54>>. Acesso em: 04 jun. 2018.

GROOVER, M. P. **Introdução aos processos de fabricação**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

IBAR. **Curvas típicas de condutividade Térmica**. Disponível em: < <http://www.ibar.com.br/informacoes/condutividade-termica.html>>. Acesso em: 25 mai. 2018.

INCROPERA, F. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

KANTHAL SUPER. **Electric Heating Element Handbook**, Hallstahammar, 1999.

KURZAWA, U.; PESCADOR, W. A.; VERRAN, G.O. Reciclagem de Latas de Alumínio Visando Melhor Rendimento e Qualidade Metalúrgica no Alumínio Obtido. **Revista Matéria**. Rio de Janeiro: v. 10, n. 1, p. 72-79. Disponível em: <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10635/>>. Acesso em: 28 mai. 2018.

OLIVEIRA, I. L. de; VALENTIM, A. R. Reciclagem de folhas de alumínio em forno elétrico à indução. **Revista Gestão Industrial**. Ponta Grossa, v. 7, n. 2, p. 217-231, 2011. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/revistagi/article/view/905/676>>. Acesso em: 20 mai. 2018.

PANDOLFELLI, V. C.; SAKO, E. Y. Artigo revisão – A relação entre a corrosão e a microestrutura: a chave para o desenvolvimento de concretos refratários espinelizados de alto desempenho. **Cerâmica**. São Paulo, v. 60, n. 353, p. 127-143. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0366-69132014000100018&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0366-69132014000100018&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt)>. Acesso em: 25 mai. 2018.

PANDOLFELLI, V. C.; RAMAL Jr., F. T.; SALOMÃO, R. Comportamento de secagem e explosão de concretos refratários com diferentes teores de água. **Cerâmica**. São Paulo, v. 50, n. 315, p. 197-201. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0366-69132004000300005&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0366-69132004000300005&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt)>. Acesso em: 25 mai. 2018.

PETROBRAS. **Gás Liquefeito de Petróleo**. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/composicao-de-precos-de-venda-ao-consumidor/gas-liquefeito-de-petroleo-glp/>>. Acesso em: 04 jun. 2018.

SIECA. **Forno para fundição de alumínio**. Disponível em: <<http://www.sieca.com.br/forno-fundicao-aluminio>>. Acesso em: 25 mai. 2018.

SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M.; MOTTA, M. da. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. **Revista Matéria**. Rio de Janeiro, v. 12, n. 2, p. 322-338, 2007. Disponível em: <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10888/>>. Acesso em: 20 mai. 2018.

SENNA, F. S. e. **Projeto de um Forno de Fusão para o Laboratório de Tecnologia Mecânica da Escola Politécnica**. 2017. 103 f. Monografia – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

SOARES, G. A. de. **Fundição: Mercado, Processos e Metalurgia**. 1. ed. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2000.

TORRE, J. **Manual prático de fundição: e elementos de prevenção da corrosão**. 1. ed. São Paulo: Hemus, 2004.

TUTTLE, R. B. **Foundry Engineering: The Metallurgy and Design of Castings**. 1. ed. Createspace Pub, 2012.

VESUVIUS. **Cadinhos, Refratários e Cerâmicas**. Disponível em: <<https://www.vesuvius.com/en/our-solutions/pt-br/foundry/non-ferrous-foundry/crucibles-refractories-and-ceramics.html#titleLink-1>>. Acesso em: 25 mai. 2018.

## ANEXO A – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO CONCRETO REFROTÁRIO

### FICHA TÉCNICA

#### CONCRETO REFROTÁRIO "REF 50 ML"

#### DESCRIÇÃO:

Concreto refratário sílico-aluminoso, denso, da classe de 50% de alumina, sendo que os grãos de alumina são do tipo eletro-fundido.

#### PROPRIEDADES PRINCIPAIS:

GRANULOMETRIA:	100% menor que 5,0 mm
ANÁLISE QUÍMICA PADRÃO:	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 50,0 a 54,0% SiO <sub>2</sub> : 38,0 a 43,0 % CaO: 2,7 a 3,7 % Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 1,0 a 2,0 %
DENSIDADE APROXIMADA:	2,0 g/cm <sup>3</sup> após hidratação e secagem a 110 °C.
TEMP. MÁX. DE UTILIZAÇÃO :	1450 °C.
PEGA HIDRÁULICA :	A <u>reação</u> do aluminato e água, inicia após 30min.
CURA:	A cura ideal é acima de 24 horas após a aplicação do concreto (24 a 52 horas).
TRABALHABILIDADE:	Aplicar até 30 minutos após a adição de água.
DESMONTAGEM :	Retirar as fôrmas após 8 a 10 horas da aplicação.
VALIDADE:	Seis meses após a fabricação.
TEMP. MÁX. DE UTILIZAÇÃO :	1450 °C.
PEGA HIDRÁULICA :	A <u>reação</u> do aluminato e água, inicia após 30min.
CURA:	A cura ideal é acima de 24 horas após a aplicação do concreto (24 a 52 horas).
TRABALHABILIDADE:	Aplicar até 30 minutos após a adição de água.
DESMONTAGEM :	Retirar as fôrmas após 8 a 10 horas da aplicação.
VALIDADE:	Seis meses após a fabricação.

#### ARMAZENAMENTO:

Sacos plásticos com 5, 10, 15 ou 25 kgs.

O material deve ser estocado em local seco e ventilado.

#### CONDIÇÕES DE SEGURANÇA:

As chamas diretas no refratário podem atingir temperaturas acima de 1700 °C, evite para a maior durabilidade e resistência mecânica.

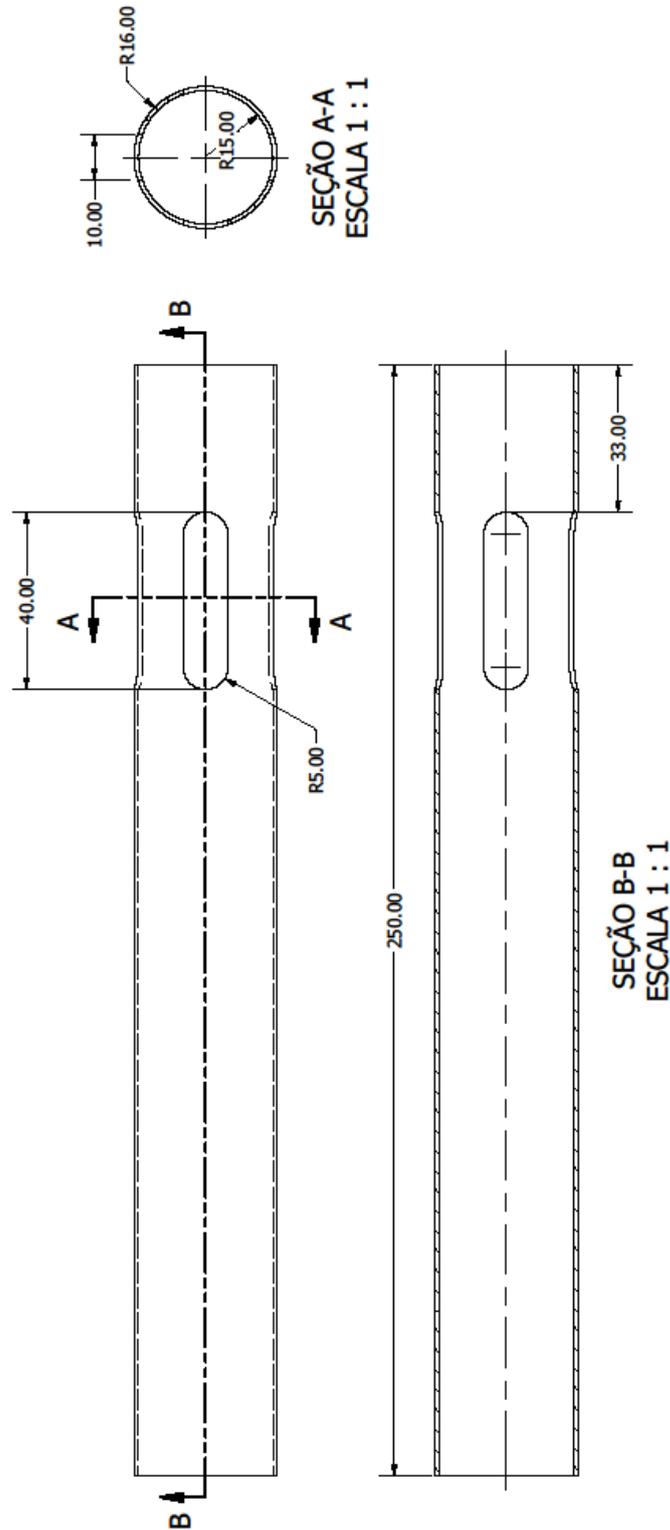
Esse material não contém componentes tóxicos.

Os ligantes são á base de de aluminato de cálcio e argilas refratárias plásticas.

No manuseio, utilizar máscaras contra pó, luvas e óculos de segurança.

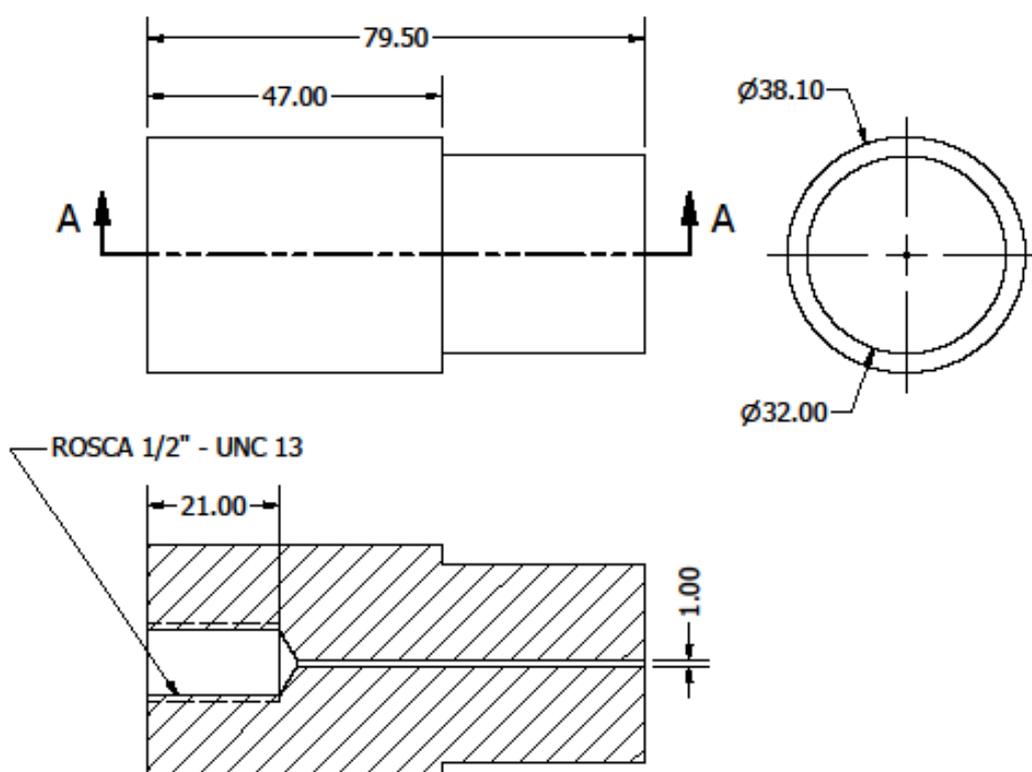
Evitar o desprendimento de pó, ao manusear o produto.

## APÊNDICE A – DESENHO DA ESTRUTURA DO QUEIMADOR



LISTA DE MATERIAIS		DIMENSÕES	
QTDE	MATERIAL		
1	Aço inox	Ø32 x 250 mm	
DESENHISTA: Rodolfo Peratello		INSTITUIÇÃO: Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Londrina	
PROJETO: TCC 2		TÍTULO: ESTRUTURA DO QUEIMADOR	
CURSO: Engenharia de Materiais		NÚMERO DO DESENHO: TCC2 - 01	
DESENHISTA: Rodolfo Peratello		ESCALA: 1 : 1	REV: 01
OBSERVAÇÃO: Silvia Midori Higa		FOLHA Nº: 1	DATA: 20/11/2018
		TAMANHO DA FOLHA: A3	

## APÊNDICE B – DESENHO DO TAMBOR DE UNIÃO

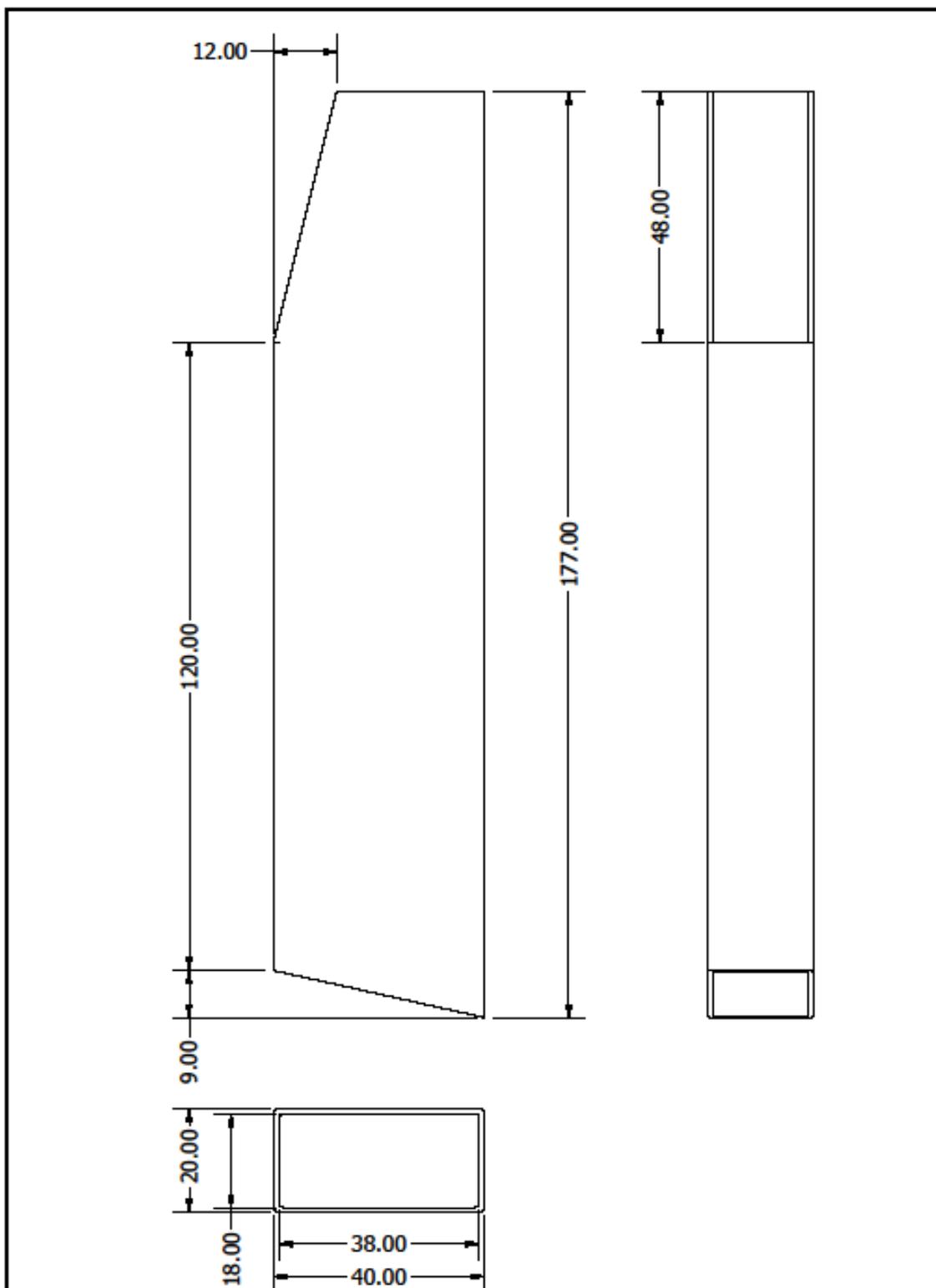


SEÇÃO A-A  
ESCALA 1 : 1

### LISTA DE MATERIAIS

QTDE	MATERIAL	DIMENSÕES
1	Alumínio	Ø1.1/2" x 80 mm
DESENHISTA: Rodolfo Peratello	INSTITUIÇÃO: Universidade Tecnológica Federal do Paraná	
PROJETO: TCC 2	TÍTULO: <b>TAMBOR DE UNIÃO</b>	
CURSO: Engenharia de Materiais	NÚMERO DO DESENHO: TCC - 02	REV: 01
DESENTE: Rodolfo Peratello	ESCALA: 1 : 1	FOLHA Nº: 1
ORIENTADORA: Sílvia Midori Higa	TAMANHO DA FOLHA: A4	DATA: 20/11/2018

## APÊNDICE C – DESENHO DO PÉ DE FIXAÇÃO DO FORNO



DESENHISTA: <b>Rodolfo Peratello</b>	INSTITUIÇÃO: <b>Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Londrina</b>		
PROJETO: <b>TCC 02</b>	TÍTULO: <b>PÉS DE FIXAÇÃO</b>		
CURSO: <b>Engenharia de Materiais</b>	NÚMERO DO DESENHO: <b>TCC 02 - 03</b>		REV: <b>01</b>
DESENHISTA: <b>Rodolfo Peratello</b>	ESCALA: <b>1 / 1</b>	FOLHA Nº: <b>1</b>	TAMANHO DA FOLHA: <b>A4</b>
ORIENTADORA: <b>Sílvia Midori Hiqa</b>	DATA: <b>12/11/2018</b>		

APÊNDICE D – DESENHO DA MONTAGEM DO FORNO

