



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

**JEOVAN RAMOS NASCIMENTO**

**CONSTRUÇÃO DE UM DISPOSITIVO DE SOLIDIFICAÇÃO UNIDIRECIONAL  
ASCENDENTE RESISTIVO PARA EXTRAÇÃO DE CALOR EM REGIME  
TRANSIENTE DE LIGAS A BASE DE ALUMÍNIO**

ANANINDEUA, PA

2024

**JEOVAN RAMOS NASCIMENTO**

**CONSTRUÇÃO DE UM DISPOSITIVO DE SOLIDIFICAÇÃO UNIDIRECIONAL  
ASCENDENTE RESISTIVO PARA EXTRAÇÃO DE CALOR EM REGIME  
TRANSIENTE DE LIGAS A BASE DE ALUMÍNIO**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia de Materiais, pela Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará.

Orientador: Prof. Dr. Deibson Silva da Costa.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Gabriel da Silva Nascimento.

ANANINDEUA, PA

2024

JEOVAN RAMOS NASCIMENTO

**CONSTRUÇÃO DE UM DISPOSITIVO DE SOLIDIFICAÇÃO UNIDIRECIONAL  
ASCENDENTE RESISTIVO PARA EXTRAÇÃO DE CALOR EM REGIME  
TRANSIENTE DE LIGAS A BASE DE ALUMÍNIO**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia de Materiais, pela Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará.

Data da Aprovação: 14 / 05 / 2024

Conceito: Excelente

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente



**DEIBSON SILVA DA COSTA**

Data: 29/05/2024 16:25:38-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Deibson Silva da Costa  
(FEMat/CAMPANIN/UFPA - Orientador)

Documento assinado digitalmente



**LUIZ GABRIEL DA SILVA NASCIMENTO**

Data: 30/05/2024 12:41:40-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Luiz Gabriel da Silva Nascimento  
(PPGMAT/IFPA - Orientador)

Documento assinado digitalmente



**ALACID DO SOCORRO SIQUEIRA NEVES**

Data: 04/06/2024 16:58:15-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Me. Alacid Siqueira Neves  
(FEMat/CAMPANIN/UFPA - Examinador Interno)

Documento assinado digitalmente



**EMERSON RODRIGUES PRAZERES**

Data: 24/04/2024 10:44:56-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Emerson Rodrigues Prazeres  
(FEM/ITEC/UFPA - Examinador Externo)

ANANINDEUA, PA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)  
autor(a)

---

N244c Nascimento, Jeovan Ramos.  
Construção de um dispositivo de solidificação  
unidirecional ascendente resistivo para extração de calor em  
regime transiente de ligas a base de alumínio / Jeovan  
Ramos Nascimento. — 2024.  
xiii, 58 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Deibson Silva da Costa  
Coorientador(a): Prof. Dr. Luiz Gabriel da Silva  
Nascimento  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -  
Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de  
Ananindeua, Curso de Engenharia de Materiais,  
Ananindeua, 2024.

1. Dispositivo . 2. Ligas de alumínio. 3. Fundição. I.  
Título.

CDD 620.11

---

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço primeiramente à Deus, pois sem ele nada disso seria possível.

Ao meu pai José Weicer, por todo suporte e apoio em todos os momentos.

A minha mãe Evangelina de Nazaré por todo incentivo e dedicação comigo.

Ao meu irmão Jean Ramos que sempre esteve presente nos momentos difíceis.

A minha namorada Haianny Lima por todo carinho, cuidado e empenho comigo, onde nunca mediu esforços para me ajudar.

Aos meus bons amigos de curso e projeto, Esaú Souza, Marlon Pinto e Jhonatha botelho que sempre me ajudaram, e tornaram a graduação mais leve.

Aos meus orientadores Deibson Silva da Costa e Luiz Gabriel da Silva Nascimento que foram os pilares na graduação e me deram total suporte desde o início.

Agradeço também ao Instituto Federal do Pará, que me permitiu desenvolver inúmeros trabalhos de pesquisa em seus laboratórios.

Agradeço a Universidade Federal do Pará e a Faculdade de Engenharia de Materiais, pois sem elas não seria possível a realização do projeto.

## RESUMO

As ligas à base de alumínio são muito utilizadas na indústria automobilística e aeroespacial devido às suas propriedades mecânicas e elétricas quando combinadas com outros elementos. Para fabricação de peças a base de alumínio o processo de fabricação é um item importante a ser considerado, visto que elas passam pelo processo de fundição e solidificação. A solidificação unidirecional é um recurso utilizado quando se deseja caracterizar o comportamento de uma liga para uma determinada taxa de resfriamento. Os moldes de solidificação unidirecional são específicos para controlar a direção e a taxa de resfriamento durante a solidificação do metal. Eles podem ser feitos de materiais refratários e possuem um sistema de resfriamento na parte inferior para promover a extração de calor de maneira controlada. Dessa forma, o trabalho teve como objetivo principal a construção de um dispositivo de solidificação unidirecional ascendente com regime transiente de fluxo de calor e a verificação de sua eficiência por meio de análises macro e microestruturais de ligas a base de alumínio. Para fabricação do dispositivo foram utilizados materiais refratários, resistências elétricas e um controlador de temperatura. Posteriormente, foi obtido a curva de aquecimento, que mostrou que o dispositivo em aproximadamente 3 minutos atingiu uma temperatura de 800 °C e teve uma máxima de 1000 °C, tendo em seu interior quantidade de calor e temperatura desejável a fim de se obter um gradiente apenas em uma direção. Para verificar a eficiência do dispositivo foram solidificadas três ligas a base de alumínio: Al-2,5%Ni, Al-9%Ni e Al-4,5%Cu-2,5%Ni e verificou-se, por meio da caracterização metalográfica, grãos colunares indicando que todo o sistema hidráulico e de aquecimento da câmara do dispositivo foram eficazes.

**Palavras-chave:** Dispositivo; Ligas de alumínio; Fundição.

## ABSTRACT

Aluminum-based alloys are widely used in the automobile and aerospace industries due to their mechanical and electrical properties when combined with other elements. For the manufacture of aluminum-based parts, the manufacturing process is an important item to be considered, as they go through the casting and solidification process. Unidirectional solidification is a resource used when one wishes to characterize the behavior of an alloy for a given cooling rate. Unidirectional solidification molds are specifically designed to control the direction and rate of cooling during metal solidification. They can be made from refractory materials and have a cooling system at the bottom to promote heat extraction in a controlled manner. Therefore, the main objective of the work was to build an ascending unidirectional solidification device with a transient heat flow regime and verify its efficiency through macro and microstructural analyzes of aluminum-based alloys. To manufacture the device, refractory materials, electrical resistance and a temperature controller were used. Subsequently, the heating curve was obtained, which showed that the device in approximately 3 minutes reached a temperature of 800 °c and had a maximum of 1000 °c, having inside the amount of heat and desirable temperature in order to obtain a gradient just in one direction. To verify the efficiency of the device, three aluminum-based alloys were solidified: al-2.5%ni, al-9%ni and al-4.5%cu-2.5%ni and it was verified, through metallographic characterization, columnar grains indicating that the entire hydraulic and heating system of the device chamber were effective.

**Keywords:** Device; Aluminum Alloys; Casting.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Transferência de calor no sistema metal/molde.....	18
<b>Figura 2</b> – Fluxo de calor através da interface metal/molde.....	20
<b>Figura 3</b> – Velocidade de deslocamento da isoterma <i>liquidus</i> .....	21
<b>Figura 4</b> – Taxa de resfriamento em função da posição a partir da interface metal/molde.....	22
<b>Figura 5</b> – Gradientes de temperatura.....	23
<b>Figura 6</b> – Representação esquemática das diferentes zonas macroestruturais.....	24
<b>Figura 7</b> – Influência das variáveis de solidificação na microestrutura resultante.....	25
<b>Figura 8</b> – Dispositivo experimental direcional ascendente.....	27
<b>Figura 9</b> – Dispositivo experimental unidirecional descendente.....	28
<b>Figura 10</b> – Dispositivo de solidificação unidirecional horizontal.....	29
<b>Figura 11</b> – Curva de aquecimento do dispositivo de solidificação.....	32
<b>Figura 12</b> – Fluxograma da fabricação do dispositivo.....	34
<b>Figura 13</b> – (a) estrutura básica do dispositivo vista de frente e (b) estrutura do dispositivo vista de cima.....	35
<b>Figura 14</b> – Molde em madeira de compensado.....	36
<b>Figura 15</b> – Forno após a retirada do molde de compensado.....	36
<b>Figura 16</b> – Medidas da interface metal/molde e da lingoteira.....	37
<b>Figura 17</b> – (a) suporte do forno (b) chapa de zinco da parte superior do suporte.....	38
<b>Figura 18</b> – (a) resistência enrolada no tubo, (b) o tubo com a resistência colocado dentro de outro tubo e (c) tubos preenchidos com massa e gesso refratários.....	39
<b>Figura 19</b> – Resistências prontas.....	39
<b>Figura 20</b> – (a) termopar tipo K e (b) transistor BTA 41 (triac).....	40
<b>Figura 21</b> – circuito elétrico do dispositivo.....	41
<b>Figura 22</b> – (a) os dois tubos de aço unidos por um joelho de aço e (b) mangueira e braçadeira.....	42
<b>Figura 23</b> - Método utilizado para medir a vazão da água.....	42
<b>Figura 24</b> – (a) chapa de aço e funil e (b) decaimento do líquido na rede de esgoto.....	43
<b>Figura 25</b> – Vazamento do metal dentro da lingoteira.....	44
<b>Figura 26</b> – (a) remoção das braçadeiras da lingoteira, (b) retirada do molde e (c) lingote desmoldado.....	44

<b>Figura 27</b> – (a) Keller – solução aquosa ácida e (b) Keller sendo passado na liga de alumínio + 2,5% de níquel.....	45
<b>Figura 28</b> – (a) Tucker – solução aquosa ácida e (b) Tucker sendo passado na liga de alumínio + 9% de níquel.....	46
<b>Figura 29</b> – Marcação da região dos corpos de prova (A) esquema de embutimento das amostras (B).....	47
<b>Figura 30</b> – Forno de solidificação de frente .....	48
<b>Figura 31</b> –Desenho esquemático do dispositivo de solidificação unidirecional.....	49
<b>Figura 32</b> – Gráfico da curva de aquecimento para a resistência de 0,90 mm de diâmetro, no intervalo de 2 em 2 segundos.....	51
<b>Figura 33</b> – Macroestrutura (a) Al-2,5%Ni, (b) Al-9%Ni e (c) Al-4,5%Cu-2,5%Ni.....	52
<b>Figura 34</b> – Espaçamentos dendríticos do Al-2,5%Ni, Al-9%Ni e Al-4,5%Cu-2,5%Ni.....	53

## LISTA DE TABELA

<b>Tabela 1</b> – Dados do dispositivo de solidificação unidirecional.....	49
--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al	Alumínio
Cu	Cobre
Co	Concentração de soluto
G <sub>L</sub>	Gradiente de temperatura
V <sub>L</sub>	Isoterma <i>liquidus</i>
Ni	Níquel
S/L	Sólido/líquido
SRC	Super Resfriamento Constitucional
T	Taxa de resfriamento
TCE	Transição Colunar/Equiaxial

## LISTA DE SIMBOLOS

°C	Grau Celsius
GPa	Giga Pascal
cm	Centímetro
t	Tempo
P	Pressão
N/m <sup>2</sup>	Newton por metro quadrado
s	Segundo
$\dot{T}$	Taxa de resfriamento
$V_L$	Velocidade de deslocamento da isoterma <i>liquidus</i>
$T_L$	Temperatura <i>líquidus</i>
$T_V$	Temperatura de vazamento
$T_S$	Temperatura de solidificação
$G_L$	Gradiente de temperatura à frente da isoterma <i>liquidus</i>
$h_i$	Coefficiente de transferência de calor na interface metal/molde
$h_{amb}$	Coefficiente de transferência de calor na interface molde/ambiente
mm	Milímetro
$\mu\text{m}$	Micrometro
%	Por cento
g	Gramma
$\lambda$	Espaçamento dendrítico
$\lambda_2$	Espaçamento dendrítico secundário

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>1.1 Objetivo geral</b> .....	<b>15</b>
1.1.1 Objetivos específicos.....	15
<b>1.2 Composição do trabalho</b> .....	<b>16</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1 Solidificação de ligas metálicas</b> .....	<b>17</b>
2.1.1 Processo de solidificação .....	17
2.1.1.1 Nucleação e crescimento .....	18
<b>2.2 Transferência de calor na interface metal/molde</b> .....	<b>19</b>
<b>2.3 Parâmetros térmicos</b> .....	<b>21</b>
<b>2.3.1 Velocidade da isoterma <i>líquidus</i> - <math>V_L</math></b> .....	<b>21</b>
<b>2.3.2 Taxa de resfriamento</b> .....	<b>22</b>
<b>2.3.3 Gradiente de temperatura à frente da isoterma <i>liquidus</i> – <math>G_L</math></b> .....	<b>22</b>
<b>2.4 Macroestrutura</b> .....	<b>23</b>
<b>2.5 Microestrutura</b> .....	<b>24</b>
<b>2.6 Solidificação direcionada</b> .....	<b>25</b>
2.6.1 Solidificação unidirecional ascendente.....	26
2.6.2 Solidificação unidirecional descendente.....	27
2.6.3 Solidificação unidirecional horizontal.....	28
<b>2.7 Sistema hidráulico</b> .....	<b>29</b>
<b>2.8 Funções da resistência elétrica</b> .....	<b>29</b>
<b>2.9 Isolamentos térmicos</b> .....	<b>30</b>
2.9.1 Material refratário .....	30
<b>2.10 Transdutor de temperatura</b> .....	<b>31</b>
<b>2.11 Curva de aquecimento</b> .....	<b>31</b>
<b>2.12 Macroestrutura de solidificação</b> .....	<b>32</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>34</b>
<b>3.1 Estrutura do dispositivo</b> .....	<b>34</b>
3.1.1. Construção do forno do dispositivo .....	35

3.1.2 Procedimento para fabricação da resistência.....	38
3.1.2.1 Alocação da resistência dentro do dispositivo .....	39
3.1.3 Parte hidráulica .....	41
<b>3.2. Solidificação da liga .....</b>	<b>43</b>
3.2.1 Caracterização Macroestrutural .....	45
3.2.1.1 Macroestrutura .....	45
3.2.1.2 Microestrutura .....	46
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>48</b>
<b>4.1 Tabela de dados coletados do dispositivo .....</b>	<b>49</b>
<b>4.2 Curva de aquecimento .....</b>	<b>50</b>
<b>4.3 Estudo metalográfico.....</b>	<b>51</b>
4.3.1 Macrografia das ligas Al-2,5%Ni, Al-9%Ni, Al-4,5%Cu-2,5%Ni.....	51
4.3.2 Micrografia das ligas Al-2,5%Ni, Al-9%Ni, Al-4,5%Cu-2,5%Ni.....	52
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>54</b>
<b>5.1 Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>55</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>46</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A demanda por novos experimentos, especialmente para aprofundar nosso entendimento do processo de solidificação de metais e ligas metálicas, está em constante crescimento. Esse aumento é reflexo da importância tanto científica quanto tecnológica desse campo, que desempenha um papel vital em diversas áreas da indústria moderna. A crescente necessidade da indústria por materiais com propriedades superiores, melhor qualidade e aplicações cada vez mais específicas impulsiona essa busca (Silva, 2017).

Durante a solidificação de um metal, a energia associada à mudança de fase é consumida na reorganização atômica, sendo retirada pelo próprio molde. Inicialmente, essa remoção de energia ocorre de forma sensível, e após atingir a condição de equilíbrio, a energia é retirada de forma latente, provocando a mudança de fase, sendo um processo ativo e dinâmico, onde diversos eventos podem comprometer o desempenho do produto final, se não forem controlados (Souza, 2004).

A solidificação de ligas metálicas desempenha um papel fundamental na indústria, uma vez que permite a obtenção de materiais com propriedades mecânicas e estruturais específicas. A busca por técnicas de solidificação mais eficientes e controladas tem sido uma constante, visando melhorar a qualidade e as propriedades dos materiais produzidos. Nesse contexto, a construção de dispositivos de solidificação unidirecional em regime transitório de fluxo de calor tem se mostrado uma abordagem promissora. Esses dispositivos permitem controlar o processo de solidificação de forma mais precisa, influenciando diretamente nas propriedades finais do material (Silva, 2017).

Para criar lingotes de estrutura completamente colunar, é necessário o uso de dispositivos de solidificação unidirecional. Isso nos leva ao projeto atual, que tem como meta a criação de um pequeno dispositivo para direcionar o processo de solidificação, permitindo a investigação dos efeitos da solidificação em ligas de alumínio em cenários de transição nas condições de fluxo de calor.

## 1.1 Objetivo geral

Construir um dispositivo de solidificação unidirecional ascendente com regime transiente de fluxo de calor e verificar sua eficiência por meio de análises macro e microestruturais de ligas a base de alumínio.

### 1.1.1 Objetivos específicos

- Selecionar os materiais adequados para a fabricação do dispositivo;
- Produzir o molde de solidificação do dispositivo;
- Dimensionar cada componente elétrico e hidráulico do dispositivo;
- Obter a curva de aquecimento da câmara do forno de solidificação;
- Realizar a solidificação unidirecional ascendente para verificar a eficiência do processo através da análise da macro e microestrutura.

## 1.2 Composição do trabalho

Na seção 1 é apresentada uma introdução sobre o tema em conjunto com a justificativa para a fabricação do dispositivo de solidificação unidirecional como alternativa para potencializar os vazamentos de ligas metálicas. Nesta seção são apresentados objetivo geral e objetivos específicos.

Na seção 2 é apresentada a revisão da literatura que inclui as características dos materiais estudados com ênfase em materiais metálicos, ligas de alumínio, processos de solidificação e estruturas de solidificação.

Na seção 3, são abordados os detalhes da metodologia empregada no trabalho, incluindo a descrição dos materiais utilizados e a explicação dos métodos experimentais, acompanhados de representações ilustrativas e esquemáticas.

Na seção 4, são apresentados os resultados com ênfase na análise dos dados que são representados através de gráfico e tabelas, os quais derivam das caracterizações realizadas.

Na seção 5, são destacadas as conclusões do trabalho, juntamente com recomendações para pesquisas futuras. Além disso, no final desta seção, são listadas as referências que foram utilizadas ao longo do trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Solidificação de ligas metálicas

A solidificação trata de processos que implicam em transições de fase, onde uma fase líquida é transformada em uma fase sólida. No contexto de metais e ligas, a solidificação, por sua vez, compreende a cristalização, resultando em um sólido cristalino que exhibe uma organização regular na disposição dos átomos, mantendo um espaçamento atômico uniforme ao longo de uma distância significativa (Ashcroft *et al.*, 2011).

Segundo Toledo (2013), a solidificação de uma liga incorpora a transferência de calor do fluido e o movimento dos solutos, fatores que impactam a formação da macroestrutura. Antecipar a evolução dessas estruturas é de considerável importância para o processo de planejamento e avaliação das propriedades mecânicas de peças fundidas.

#### 2.1.1 Processo de solidificação

Segundo Garcia (2007), após a determinação da composição química da liga metálica, a dinâmica da solidificação assume o papel primordial na definição da microestrutura resultante. Uma série de fatores exerce influência sobre o processo de solidificação, e a temperatura de vazamento, em conjunto com a intensidade das correntes convectivas durante o enchimento do molde, desempenham o papel inicial. O molde exerce uma função dupla, além de conferir forma à peça, ele também extrai o calor do metal, facilitando a transição do estado líquido para o sólido. A velocidade dessa transformação pode variar de acordo com a capacidade de absorção do molde.

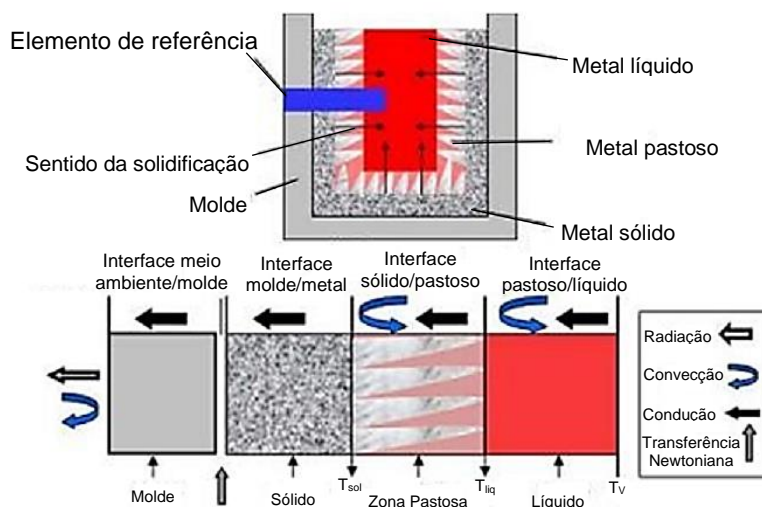
A posição relativa da liga metálica dentro do seu diagrama de fases correspondente também assume um papel crucial, pois pode resultar na rejeição de solutos ou solventes durante o processo de solidificação, gerando um movimento de espécies associado à transferência de calor. A interação entre os processos de transferência de massa e calor define as condições que moldarão a morfologia do crescimento (Garcia, 2007).

De acordo com Mohanty e Sarangi (2020), a solidificação abrange uma sequência de fases consecutivas: Nucleação e Crescimento. A direção ou o padrão

assumido durante a solidificação, é influenciado por esses dois elementos. Segundo Santos (2006), no decorrer do processo de solidificação, a mudança do estado líquido para o sólido libera calor latente ao longo de uma "fronteira móvel", que separa as duas fases e apresenta propriedades termo físicas distintas. A formação de núcleos e o subsequente crescimento das partículas na fase sólida ocorrem dentro da fase líquida. Para que esse processo de solidificação seja eficaz, é essencial que tanto a nucleação (homogênea ou heterogênea) quanto o crescimento do núcleo sólido aconteçam.

A extração de calor latente, através do sistema metal/molde, tem influência direta com os parâmetros térmicos, velocidade de solidificação, e as mudanças estruturais na fase líquido/sólido, que interferem diretamente nas propriedades mecânicas da liga solidificada (Rocha, 2003). A Figura 1 apresenta um esquema da transferência de calor no sistema metal/molde.

**Figura 1 –** Transferência de calor no sistema metal/molde



**Fonte:** Meza, 2012.

#### 2.1.1.1 Nucleação e crescimento

O processo de solidificação segue um padrão de nucleação e crescimento, em que os núcleos cristalinos se formam inicialmente e, com a adição subsequente de átomos, expandem-se para constituir os grãos sólidos. A nucleação ocorre quando a energia cinética de múltiplos átomos no metal líquido diminui o suficiente para permitir sua incorporação nas posições de equilíbrio dentro da estrutura cristalina. Pode-se

afirmar que as circunstâncias que favorecem o surgimento da nucleação dependem de considerações termodinâmicas e das condições cinéticas que caracterizam a transformação (Silva, 2019).

A nucleação é a formação de partículas sólidas no interior do material líquido, podendo ocorrer sem estímulo energético externo, conhecida assim como nucleação homogênea. Em metais, mesmo acima do ponto de fusão, é possível surgir regiões com ordenação cristalina de curto alcance, chamadas de embriões da fase sólida, porém instáveis abaixo da temperatura de fusão. Durante a organização de átomos para criar um embrião, uma superfície separa-o do líquido circundante, com energia livre positiva que aumenta à medida que a superfície evolui. A sobrevivência do embrião depende da redução da energia livre total, favorecendo a nucleação homogênea por meio de embriões esféricos, devido à menor relação superfície-volume (Garcia, 2007; Souza 2019).

Na nucleação heterogênea se manifesta quando certas regiões da peça exibem uma maior propensão à perda de calor, resultando em uma maior inclinação para iniciar a solidificação. Esse processo é influenciado pela presença de agentes nucleantes, que podem ser impurezas ou materiais estruturais. A ocorrência de nucleação heterogênea é uma característica comum no processo de fundição, com a transformação de fases tipicamente iniciando nas áreas próximas às paredes do molde (Soares, 2000).

## **2.2 Transferência de calor na interface metal/molde**

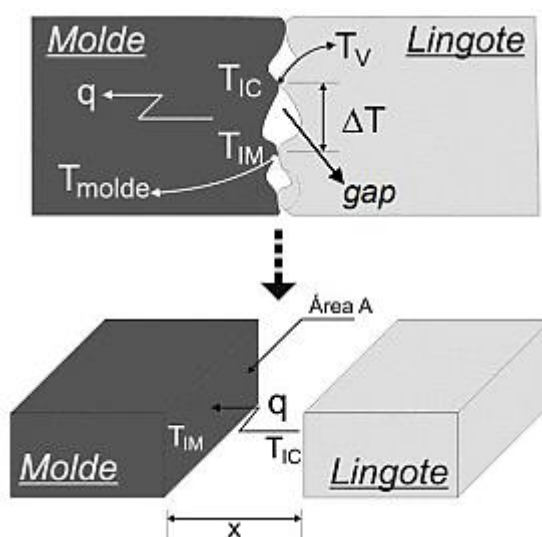
Uma vez que o processo de solidificação tem início com o material em estado líquido, é necessário utilizar um molde que forneça a geometria desejada, ao mesmo tempo em que remove o calor liberado durante a transformação líquido/sólido (Garcia, 2007; Meza, 2012).

Ao entrar em contato com as paredes do molde, esse metal desencadeará um fenômeno de resistência de contato conhecido como resistência newtoniana. Tal fenômeno é resultado de diversos fatores, incluindo a afinidade físico-química entre o material do molde e o metal a ser solidificado, a contração do metal e a expansão do molde. Além disso, o contato na interface metal/molde não é perfeito devido à usinagem de acabamento, que cria uma “micro geometria” propícia ao surgimento de rugosidades nas áreas de contato físico entre o metal e o molde. Conseqüentemente,

o molhamento pelo metal líquido na parede interna do molde não atinge a perfeição (Meza, 2012).

Portanto, a perda de calor inicial, não é somente regulada pela capacidade térmica de armazenamento do material do molde, mas também pelas condições de transferência de calor do metal e, particularmente, na interface metal/molde. As partículas sólidas encontram-se somente em contato em pontos isolados e a área real de contato é somente uma pequena fração da área nominal, conforme apresentado na Figura 2.

**Figura 2** - Fluxo de calor através da interface metal/molde



Fonte: Spinelli, 2004.

O fluxo de calor através da interface metal/molde, conforme apresentado esquematicamente na Figura 2, pode ser caracterizado por um coeficiente médio macroscópico de transferência de calor, dado pela Equação 1.

$$h_i = \frac{q}{A(T_{ic} - T_{IM})} \quad (1)$$

Onde  $q$  é o fluxo de calor global através da interface,  $T_{IC}$  e  $T_{IM}$  são, respectivamente, as temperaturas superficiais do lingote e do molde e  $A$  é a área. No entanto, as temperaturas  $T_{IC}$  e  $T_{IM}$  são difíceis de serem medidas, pois a localização exata de termopares na interface não se constitui em uma tarefa trivial. Para superar

este obstáculo experimental, os métodos de cálculo de  $h_i$  existentes na literatura são baseados no conhecimento e aplicação de outras condições.

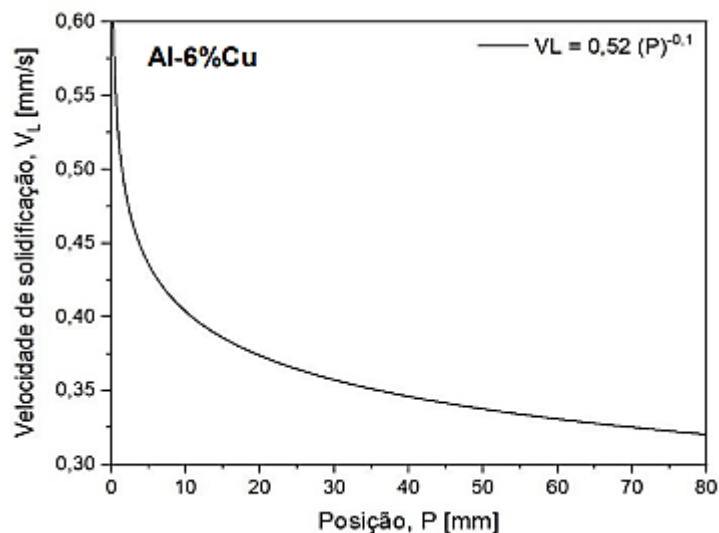
### 2.3 Parâmetros térmicos

A partir das curvas de resfriamentos durante a solidificação unidirecional vertical da liga, pode-se determinar os parâmetros térmicos sendo eles a velocidade da isoterma *liquidus* ( $V_L$ ), a taxa de resfriamento ( $\dot{T}$ ), e o gradiente de temperatura frente à interface de solidificação ( $GL$ ).

#### 2.3.1 Velocidade da isoterma *liquidus* - $V_L$

Refere-se ao deslocamento da frente líquida através de cada termopar durante a progressão da fase sólida. A velocidade de formação das dendritas na fase sólida pode ser calculada quando a temperatura na ponta das dendritas (interface sólido/líquido) se iguala à temperatura *liquidus* (Garcia, 2007). A Figura 3 mostra a curva  $V_L$  de uma liga binária Al6%Cu em função da posição ( $P$ ) dos termopares.

**Figura 3** - Velocidade de deslocamento da isoterma *liquidus*

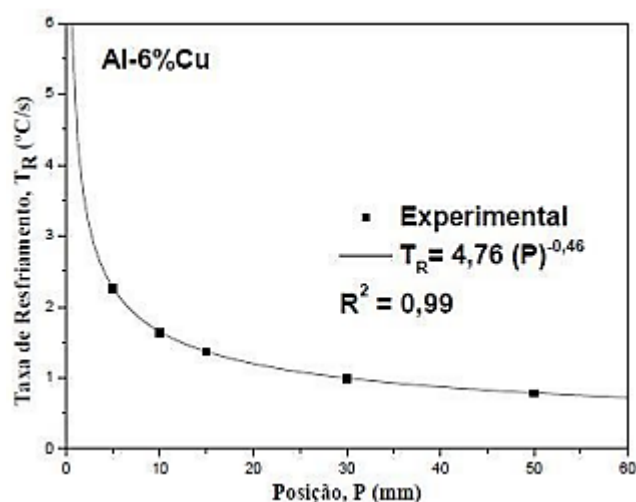


Fonte: Pola *et al.*, 2013

### 2.3.2 Taxa de resfriamento

A taxa de resfriamento próxima à isoterma *liquidus* pode ser expressa como a derivada da temperatura em relação ao tempo. Essa informação pode ser adquirida ao monitorar a curva de resfriamento no instante em que atinge a temperatura *liquidus* e calculando a derivada nesse ponto (Garcia, 2007). A Figura 4 mostra a curva T de uma liga binária Al6%Cu em função da posição (P) de cada termopar.

**Figura 4** – Taxa de resfriamento em função da posição a partir da interface metal/molde



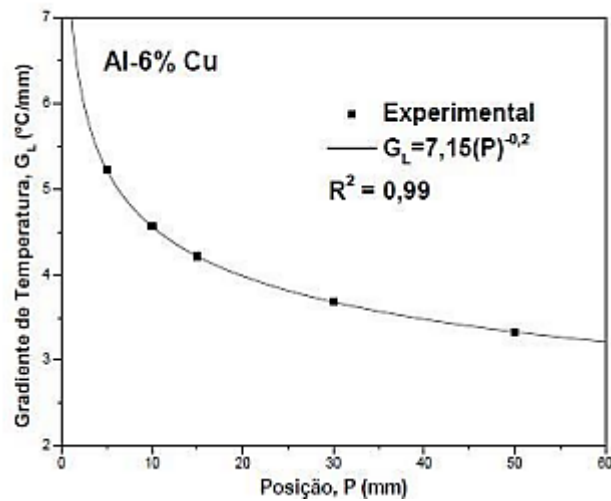
Fonte: Pola *et al.*, 2013.

### 2.3.3 Gradiente de temperatura à frente da isoterma *liquidus* – $G_L$

Trata-se da alteração da temperatura ao longo do comprimento do lingote. A presença de um gradiente de temperatura durante o processo de solidificação é resultado da discrepância na quantidade de calor dissipado. Nas regiões próximas à interface de extração de calor, o processo de solidificação inicia-se primeiro, com a frente de solidificação crescendo ao longo do tempo. Isso possibilita a coexistência de zonas solidificadas e zonas ainda líquidas, além de áreas mistas (Garcia, 2007).

A Figura 5 mostra a curva  $G_L$  da liga Al6%Cu em função da posição (P) de cada termopar a partir da interface metal/molde.

**Figura 5 – Gradientes de temperatura**



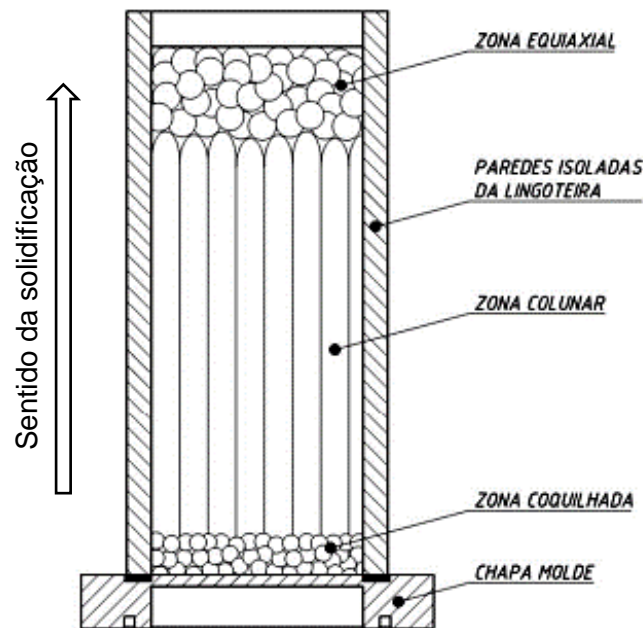
Fonte: Pola *et al*, 2013.

## 2.4 Macroestrutura

A solidificação de ligas metálicas ocorre quando núcleos sólidos se formam a partir do estado líquido e sob condições termodinâmicas favoráveis, esses núcleos se expandem, resultando no desenvolvimento dos grãos cristalinos que moldarão a macroestrutura da peça. A macroestrutura do metal solidificado é definida pelas dimensões, orientação, forma e distribuição dos seus grãos cristalinos (Goulart, 2010).

A macroestrutura é composta de três zonas. Sendo elas a zona coquilhada (observada nas proximidades das paredes do molde), a zona colunar (composta de grãos alongados cujo crescimento é preferencialmente orientado em uma direção próxima ao fluxo de calor), a zona equiaxial (localizada na parte central em que os grãos crescem em todas as direções espaciais). Todas as três zonas podem ou não estar presentes, dependendo da solidificação e da liga solidificada (Carvalho, 2014). A Figura 6 apresenta um esquema das diferentes zonas macroestruturais.

**Figura 6** – Representação esquemática das diferentes zonas macroestruturais



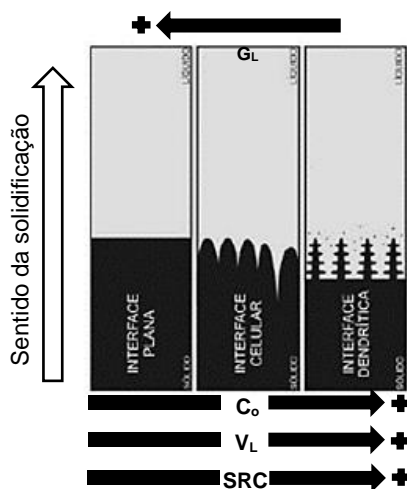
Fonte: Santos, 2006.

## 2.5 Microestrutura

É de conhecimento geral que a resistência mecânica e dureza de uma liga metálica dependem da morfologia macro e microestrutura. As microestruturas resultantes do processo de solidificação estão relacionadas com a forma da interface sólido/líquido (S/L) e influenciam diretamente nas propriedades mecânicas (Goulart, 2006).

Segundo Nascimento *et al.* (2017), uma interface plana, ocorre em situações de baixas velocidades de resfriamento ( $V_L$ ), baixa concentração de soluto ( $C_0$ ), baixo grau de super-resfriamento constitucional (SRC) e altas taxas de gradiente térmico ( $G_L$ ), o que torna improvável obter essa estrutura em condições operacionais na maioria das operações metalúrgicas com um sistema metal/molde. A Figura 7 apresenta esquematicamente a influência dessas variáveis na microestrutura resultante.

**Figura 7** – Influência das variáveis de solidificação na microestrutura resultante



Fonte: Nascimento, 2017.

A solidificação é controlada por duas condições, sendo elas o equilíbrio e fora de equilíbrio. Na primeira condição, o avanço da fronteira (S/L) ocorre de forma demorada o suficiente para que o soluto rejeitado seja homogeneizado no volume do líquido por meio do processo de difusão e movimentação do líquido. Essas condições são típicas de metais mais puros, onde a interface permanece plana. Porém, quando a solidificação ocorre fora do equilíbrio, a velocidade de deslocamento da interface (S/L) é alta, o que resulta em uma distribuição não semelhante no líquido à frente da interface e originando instabilidades na microestrutura (Mesquita Filho *et al.*, 2018).

O arranjo microestrutural é responsável por proporcionar ao material uma maior resistência mecânica, especialmente em condições de tração. Existe uma correlação entre o espaçamento da liga metálica e a velocidade de avanço da frente de solidificação. É extensamente conhecido que, para a maioria das condições de solidificação, a microestrutura predominante em ligas hipoeutéticas de alumínio é de morfologia dendrítica, com mistura eutética nas regiões inter dendríticas, contribuindo de forma significativa para a resistência mecânica aprimorada do material (Mesquita Filho *et al.*, 2018; Carvalho, 2016).

## 2.6 Solidificação direcionada

Segundo os estudos de Tiburtino (2019), a solidificação direcionada é um método cuidadosamente controlado de solidificação de materiais, ocorrendo sob condições específicas para criar propriedades desejadas. A investigação da

solidificação direcionada é aplicada para analisar os parâmetros térmicos do processo de solidificação e sua relação com as mudanças ao longo do tempo, permitindo correlacionar esses aspectos com as macroestruturas desenvolvidas, além das propriedades resultantes, como resistência mecânica, resistência à corrosão, capacidade de resistência à fadiga e durabilidade contra desgaste.

Ademais para Fernandes *et al.* (2002), a solidificação unidirecional é um importante arranjo experimental quando se trata de prever estruturas que possam vir a estar relacionadas aos parâmetros térmicos envolvidos na solidificação metálica, tais como: a taxa de resfriamento, a velocidade de solidificação, mas principalmente o coeficiente de transferência de calor tanto da interface metal/molde como da interface molde/ambiente.

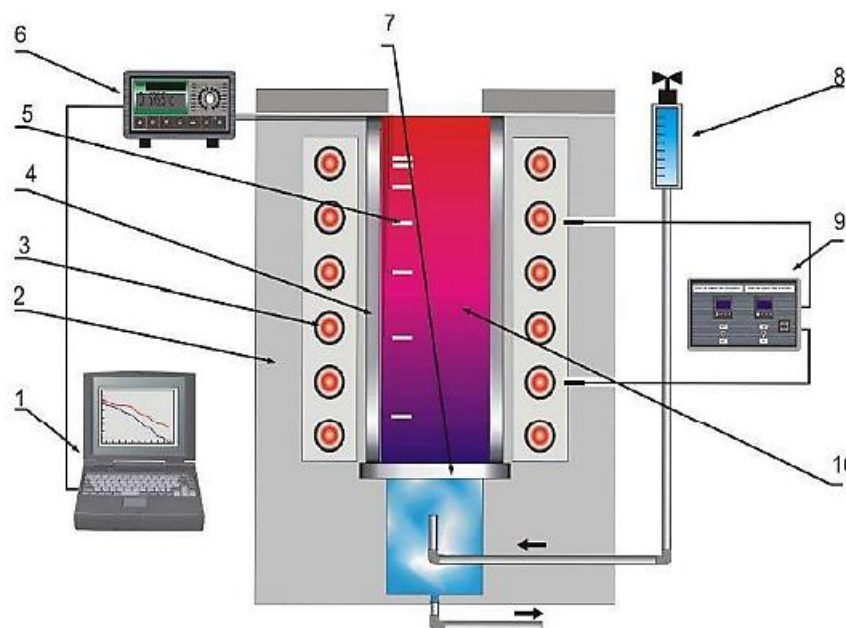
### 2.6.1 Solidificação unidirecional ascendente

De acordo com Spinelli (2005), a solidificação unidirecional vertical ascendente é um método avançado de solidificação em que um material é solidificado de baixo para cima, enquanto as condições térmicas variam ao longo do tempo.

A transferência de calor se manifesta principalmente através da condução térmica unidirecional, o que viabiliza a realização de análises experimentais e cálculos teóricos sem a interferência da convecção natural. À medida que o soluto é repelido durante o processo de solidificação, dependendo da combinação específica entre soluto e solvente, é possível a formação de uma região líquida interdendrítica mais densa em comparação com o restante do volume total do metal líquido. Isso, por sua vez, assegura a estabilidade do processo de solidificação em termos de movimentação do líquido (Moutinho, 2011).

A Figura 8 apresenta um esquema do dispositivo experimental unidirecional ascendente, onde: (1) Computador e software de aquisição de dados; (2) Camada cerâmica isolante; (3) Resistências elétricas; (4) Lingoteira; (5) Termopares; (6) Registrador de dados; (7) Base extratora de calor; (8) Rotâmetro; (9) Controlador de potência e (10) Metal líquido.

**Figura 8** – Dispositivo experimental direcional ascendente



Fonte: Meza, 2012.

### 2.6.2 Solidificação unidirecional descendente

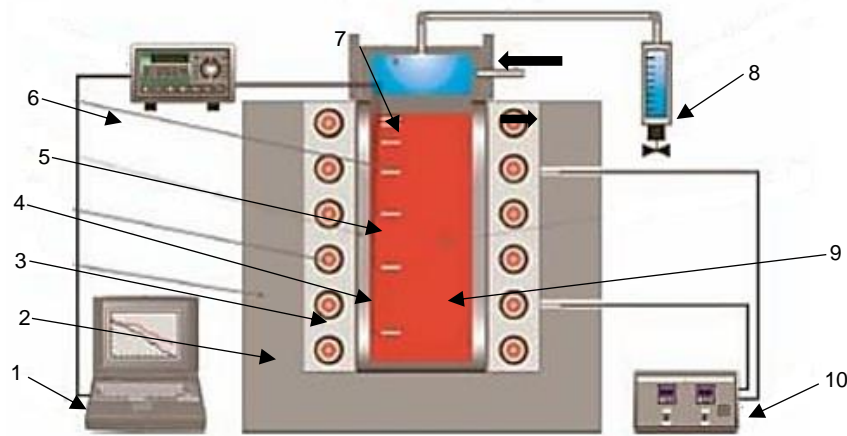
Semelhante ao sistema ascendente em termos de organização estrutural, no entanto a câmara refrigerada por água está situada no topo do lingote. Sob essas circunstâncias, o processo de solidificação ocorre na mesma direção da força gravitacional, onde o peso exerce uma força que tende a afastar o lingote do contato com a base refrigerada, resultando em uma maior resistência térmica à transferência de calor do lingote em direção ao fluido de refrigeração, quando comparada com a solidificação ascendente (Spinelli, 2005).

No caso da solidificação vertical descendente o fenômeno da convecção no líquido, devido ao soluto rejeitado e o efeito da gravidade, é preponderante na formação da morfologia da microestrutura frente à interface sólido/líquido, ao contrário da solidificação vertical ascendente, pode ocorrer o fenômeno da convecção termossolutal, isto é, convecção devido ao movimento de soluto frente a esta interface (Dias Filho *et al.*, 2015).

A Figura 9 apresenta um esquema de um dispositivo de solidificação unidirecional descendente onde: (1) aquisição via computador; (2) material refratário isolante; (3) resistência elétrica; (4) lingoteira bipartida; (5) termopares; (6) registrador

de dados térmicos; (7) câmara de refrigeração; (8) rotâmetro; (9) metal líquido e (10) controle de temperatura do forno.

**Figura 9** – Dispositivo experimental unidirecional descendente

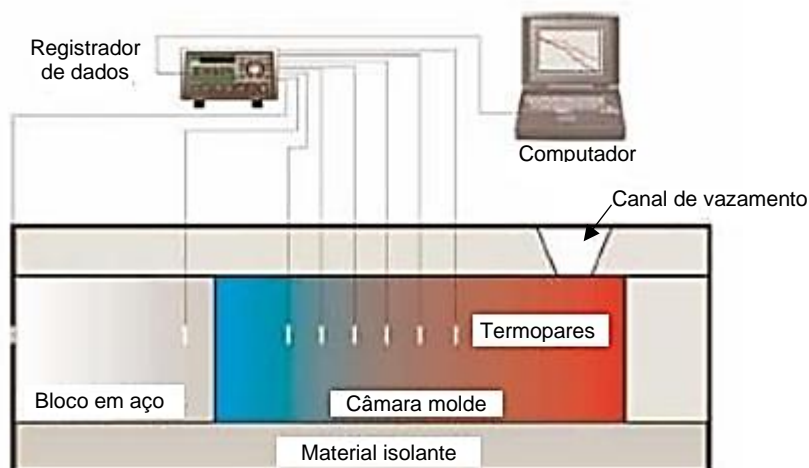


Fonte: Spinelli, 2005.

### 2.6.3 Solidificação unidirecional horizontal

A forma no sentido horizontal é notavelmente mais complexa quando se trata de determinar as variáveis térmicas no processo de solidificação. Nesse cenário o procedimento pode seguir por dois lados distintos. Primeiro o metal líquido é introduzido no molde, que tem suas laterais isoladas termicamente, enquanto o calor é retirado apenas por uma extremidade, por meio de um bloco metálico robusto, fazendo com que o vazamento do metal líquido provoque turbulência, resultando em correntes de convecção forçada que demandam um certo tempo para se dissipar, além de acabarem atuando com diferentes intensidades ao longo do lingote com o metal líquido vazado. O que irá diferenciar um método do outro, é a forma com que o calor vai ser extraído, sendo feito através de uma câmara de refrigeração (Quaresma, 1998). A Figura 10 representa um dispositivo de solidificação unidirecional horizontal.

**Figura 10** - Dispositivo de solidificação unidirecional horizontal



**Fonte:** Quaresma, 1998; Goulart, 2006.

## 2.7 Sistema hidráulico

Quanto ao conceito de trocador de calor, pode ser definido como sendo um dispositivo utilizado para a realização da troca térmica entre dois ou mais fluidos de temperaturas diferentes. Em processos industriais são encontradas várias formas para a transferência de calor. O trocador de calor aquece ou esfria um determinado fluido e isso é de suma importância para a eficiência do processo como um todo (Mattjie, 2013).

Sistemas hidráulicos são muito comuns dentro do ambiente industrial, pelo fato de possuírem uma variedade muito grande de aplicações úteis para o andamento dos processos, além disso, ele é responsável por gerar energia através de fluidos sob pressão, garantindo o funcionamento de maneira segura e eficaz, pelo fato de não produzir faíscas e ter um funcionamento simples (Nepin, 2022).

## 2.8 Funções da resistência elétrica

Resistência elétrica é caracterizada como a oposição ao fluxo de carga através de um material, originada da interação entre elétrons e átomos do material. Essa resistência tem a capacidade de transformar a energia elétrica em energia térmica. Além disso, ela sustenta que cada material reage de maneira singular a tensões aplicadas para estabelecer uma corrente elétrica em seu interior (Boylestad, 2004).

Na produção de resistências elétricas destinadas ao aquecimento de fornos, é comum empregar ligas constituídas por ferro, cromo e alumínio. Na maior parte, ela é aplicada em fornos operando em temperaturas elevadas, como no processo de tratamento térmico e fabricação de aços, resistindo até 1.400 °C (Kanthal, 2001).

Os fornos de resistência elétrica trazem uma série de vantagens, uma delas é a obtenção de peças fundidas de alta qualidade, pelo fato de conseguir controlar de forma precisa a composição do produto final, desta maneira evitando a contaminação por elementos estranhos que possam vir a prejudicar o produto (Silva, 2016).

## **2.9 Isolamentos térmicos**

De acordo com Incropera (2011) isolante térmico é definido como um elemento que possui uma capacidade reduzida de dispersar calor, devido a sua elevada resistência térmica. Esse material cria uma espécie de barreira com a transferência de calor entre dois meios, que normalmente buscariam igualar suas temperaturas de maneira rápida. Essa situação é viável quando os materiais exibem baixa condutividade térmica. Muitas vezes é empregada uma combinação de materiais com o intuito de alcançar uma condutividade térmica mais reduzida.

A resistência térmica de condução de um material está associada à sua capacidade limitada de transferir calor e é calculada pela divisão entre a espessura do material e sua condutividade térmica. Quanto maior a espessura do material, e menor a condutividade térmica, o isolamento térmico é mais eficaz (Incropera, 2011).

### **2.9.1 Material refratário**

Os materiais empregados no isolamento térmico de fornos abrangem tanto fibras de alta temperatura quanto tijolos refratários. As fibras de alta temperatura estão disponíveis em fornos como fibras cerâmicas refratárias isolantes, apresentando variedade em blocos, módulos, placas conformadas a vácuo e outras geometrias. Há disponibilidade de materiais refratários para o isolamento de fornos, incluindo diferentes categorias de tijolos refratários. Esses materiais refratários possuem propriedades físicas e estruturais altamente adequadas para aplicações em isolamento de fornos (Rebernak; Chernack, 2010).

Ao escolher o material destinado a ser utilizado como isolamento térmico para um forno, diversos elementos devem ser ponderados. Isso inclui considerar a temperatura de operação, o padrão de funcionamento, o sistema de aquecimento a ser utilizado, a possibilidade de carga mecânica sobre o revestimento e outros fatores relevantes (Rezende, 2011).

A resistência térmica de condução de um material refere-se à capacidade desse material que dificulta a transferência de calor. Essa resistência é calculada como o resultado da divisão entre a espessura do material e sua condutividade térmica. Quanto menor para a condutividade térmica e maior para a espessura do material, mais eficiente será o isolamento térmico fornecido por ele (Incropera, 2011).

## **2.10 Transdutor de temperatura**

Um transdutor de temperatura desempenha o papel de um dispositivo que é empregado na medição e na conversão da temperatura de um objeto ou ambiente em um sinal elétrico, o qual pode ser interpretado e processado por aparelhos eletrônicos (Teixeira, 2023).

Nos procedimentos que envolvem o uso de fornos de resistência, é essencial garantir uma elevada precisão na temperatura da câmara de aquecimento. Em certas aplicações, como na produção de cerâmica, é importante que não tenha variações bruscas de temperatura (Guerra, 2006).

Produtos e matérias-primas sensíveis à temperatura atravessam uma câmara de aquecimento, exigindo um ambiente térmico constante. Em muitos setores industriais, o controle de temperatura nessas zonas é realizado através do método ON-OFF, a forma mais simples de regulação. Contudo, a desvantagem desse sistema é que a temperatura alvo oscila entre os limites superior e inferior, em vez de estabilizar em um ponto fixo (Roggia; Fluentes, 2016).

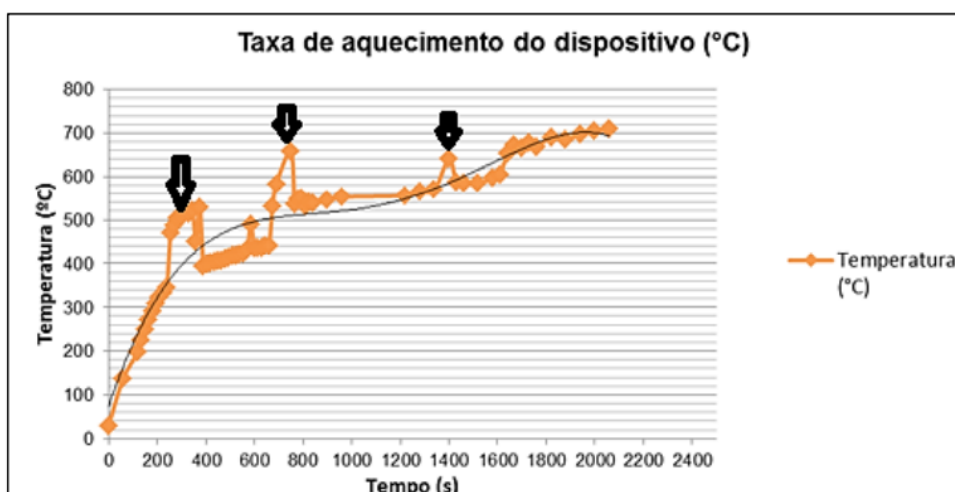
## **2.11 Curva de aquecimento**

Em um forno intermitente, a cada ciclo de queima, há potencial para obter resultados diferentes, permitindo a adaptação da curva de aquecimento às características do produto e às particularidades do forno. Essa personalização envolve ajustes na duração tanto da etapa de queima quanto da fase final de secagem interna

do forno. É crucial ressaltar que a termo "curva de queima" se refere à configuração da distribuição de temperatura dos gases, medida por termopares ao longo do tempo em fornos intermitentes e ao longo da extensão em fornos de túnel. Embora, por vezes, seja associada à temperatura das peças, essa não é sua definição exata, mas sua natureza é peculiar, tornando-a aplicável em análises. Quanto à medição das temperaturas na carga, enfrentam-se desafios significativos devido ao contínuo deslocamento desta (Nicolau, 2012).

Ao representar graficamente a curva de aquecimento de um forno, Nascimento (2015) descreveu uma curva que permite antecipar o momento em que o dispositivo se torna capaz de fundir ou receber algum material líquido para solidificação. Os picos nos pontos mais distantes da tendência da curva podem estar relacionados à umidade presente no material utilizado na fabricação. Isso ocorre porque o material não foi aquecido o suficiente para permitir a completa evaporação da água adicionada à massa refratária. A representação da curva pode ser vista na Figura 11.

**Figura 11** - Curva de aquecimento do dispositivo de solidificação



Fonte: Nascimento, 2015.

## 2.12 Macroestrutura de solidificação

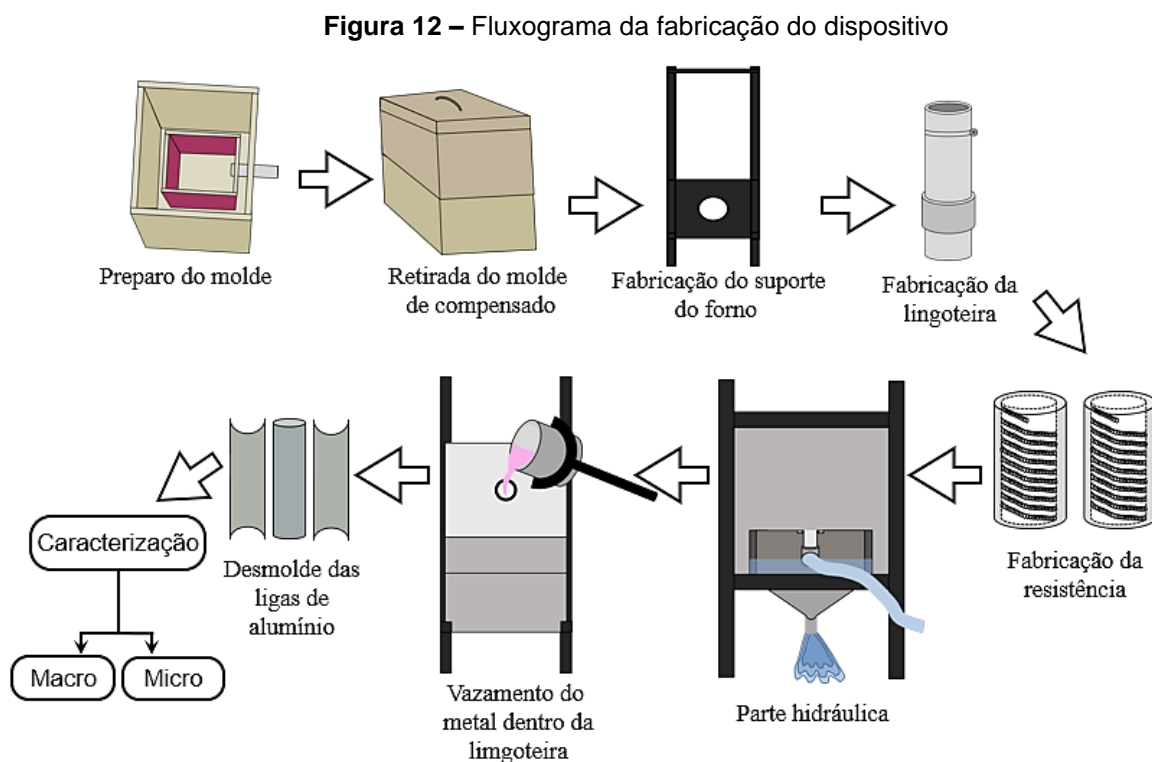
Segundo Kurz *et al.* (2001), a solidificação conduz a macroestrutura de três tipos morfológicos característicos: coquilhada, colunar e equiaxial, na revelação macroestruturais dos lingotes, comumente encontram-se estas diferentes estruturas distribuídas de uma forma característica.

As altas taxas de resfriamento estão associadas com a formação de grãos equiaxiais de granulometria reduzida, que estão na região periférica em contato direto com o molde. Os pequenos grãos de orientação randômica são nucleados a partir da parede do metal e constituem a zona coquilhada, seguindo seu crescimento por uma região intermediária de grãos alongados unidirecionalmente, denominados de colunares e orientados na direção do fluxo de calor (Kurz *et al.*, 2001).

A macroestrutura de solidificação é afetada por vários fatores, tais como: superaquecimento do líquido, composição química, fluxo do fluido, adição de refinadores de grãos e tamanho do fundido (Kurz *et al.*, 2001)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O dispositivo de solidificação direcional foi produzido no laboratório de fundição do instituto federal do Pará (IFPA) campus Belém, através de recursos próprios de docentes e alunos. A Figura 12 apresenta um fluxograma com as principais etapas de fabricação.

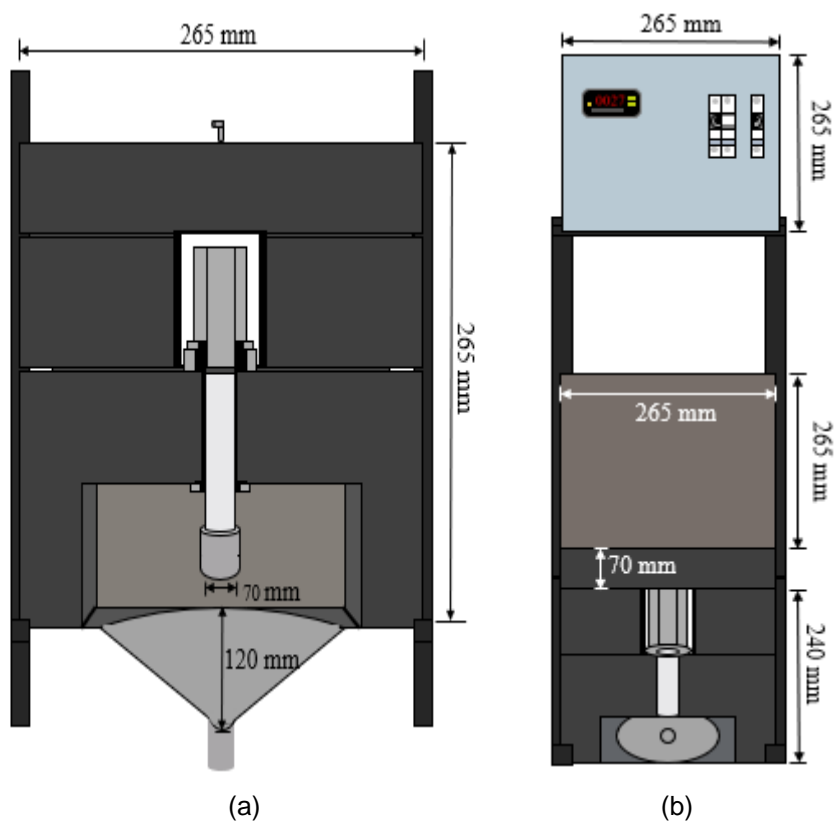


Fonte: O autor, 2024.

#### 3.1 Estrutura do dispositivo

A Figura 13 (a) e (b) apresenta a estrutura do dispositivo com as seguintes dimensões: a tampa possui 265 mm de largura, 265 mm de comprimento e 70 mm de altura; a parte superior mede 265 mm por 265 mm de largura e 160 mm de altura; a parte inferior tem dimensões de 265 mm por 265 mm de largura e 240 mm de altura (vale ressaltar que todas essas medidas já incluem o revestimento com a manta refratária); o funil possui uma altura de 120 mm, e o furo central do forno tem um diâmetro de 70 mm.

**Figura 13** – (a) Estrutura básica do dispositivo vista de frente e (b) Estrutura básica do dispositivo vista de cima



Fonte: O autor, 2024.

### 3.1.1. Construção do forno do dispositivo

Para iniciar a fabricação do dispositivo, passou-se pela construção do forno, que teve início com a preparação do molde. Utilizou-se madeira compensada para moldar tanto a parte superior, a inferior e a tampa do forno, conforme ilustrado na Figura 14.

**Figura 14** – Molde em madeira de compensado



**Fonte:** O autor, 2024.

Para a fabricação do forno, foi utilizado argamassa refratária do tipo quartzolit e manta refratária de fibra cerâmica devido à sua capacidade de resistir a altas temperaturas e baixa condutividade térmica. A manta refratária foi aplicada para revestir completamente a parte interna e a tampa do dispositivo, o cimento refratário serviu como concreto para preencher o molde, e após um período de cinco a sete dias, o molde de compensado foi removido, revelando o forno, conforme demonstrado na Figura 15.

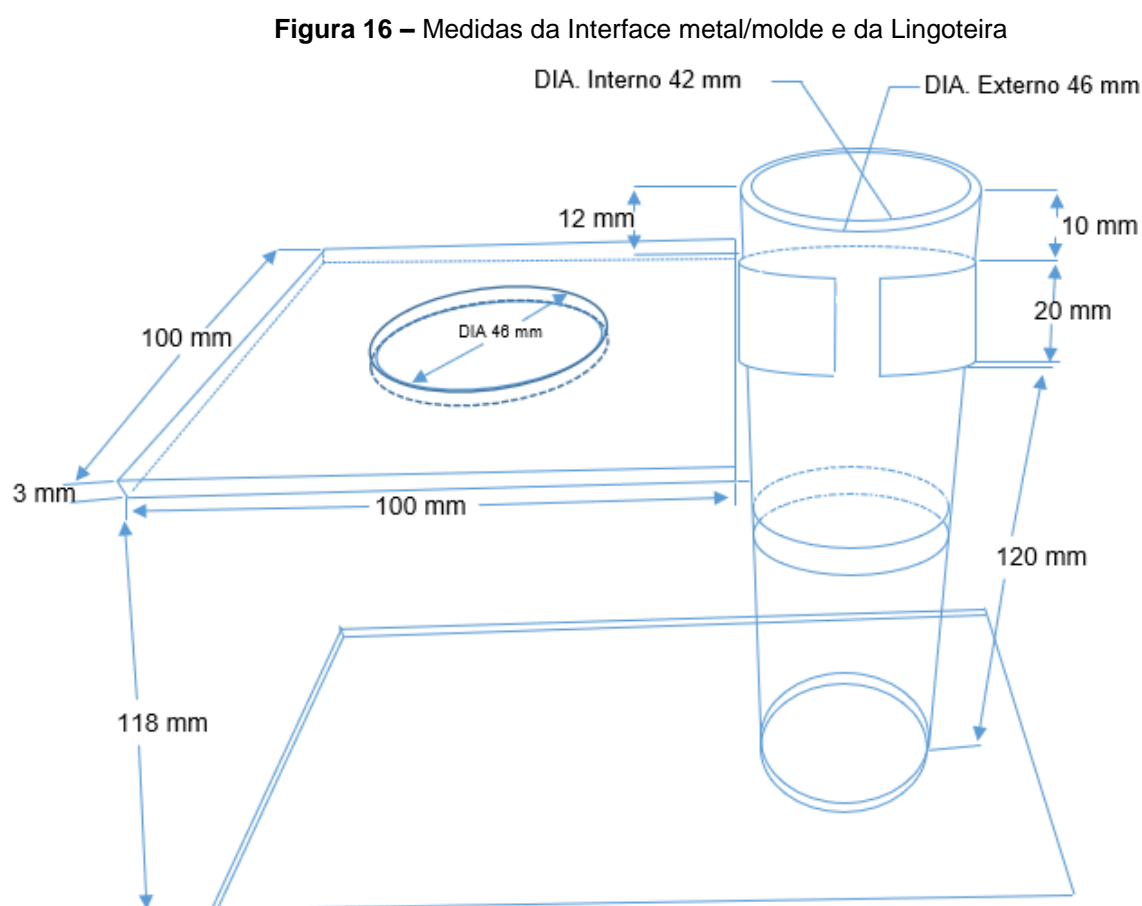
**Figura 15** – Forno após a retirada do molde de compensado



**Fonte:** O autor, 2024.

Para fabricação da lingoteira, utilizou-se um tubo de aço com 30 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento, que foi cortado longitudinalmente para facilitar o processo de desmolde posterior. Para evitar o vazamento de metal líquido e facilitar o movimento subsequente do lingote, foram aplicadas braçadeiras em ambas as extremidades do tubo.

Na parte inferior do sistema de solidificação, colocou-se uma chapa de aço com um furo central, que foi coberto pela panelinha da lingoteira, permitindo o contato direto com o líquido de resfriamento, geralmente água, para acelerar a dissipação de calor do metal. As medidas da interface entre metal e molde, bem como as dimensões da lingoteira, estão ilustradas no desenho gráfico da Figura 16.

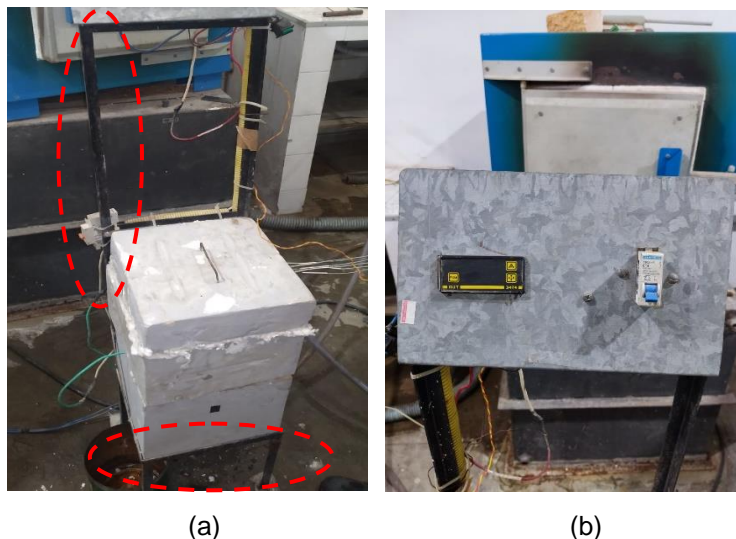


Fonte: O autor, 2024.

O forno do dispositivo foi alocado sobre um suporte, evidenciado nas Figuras 17 (a) e (b), cujas medidas são: chapa de zinco da parte superior medindo 270 mm de largura por 250 mm de altura; parte superior medindo 270 mm por 270 mm de

largura e 900 mm de altura; pé do suporte medindo 270 mm por 270 mm de largura e 250 mm de altura.

**Figura 17** - (a) Suporte do forno e (b) Chapa de zinco da parte superior do suporte



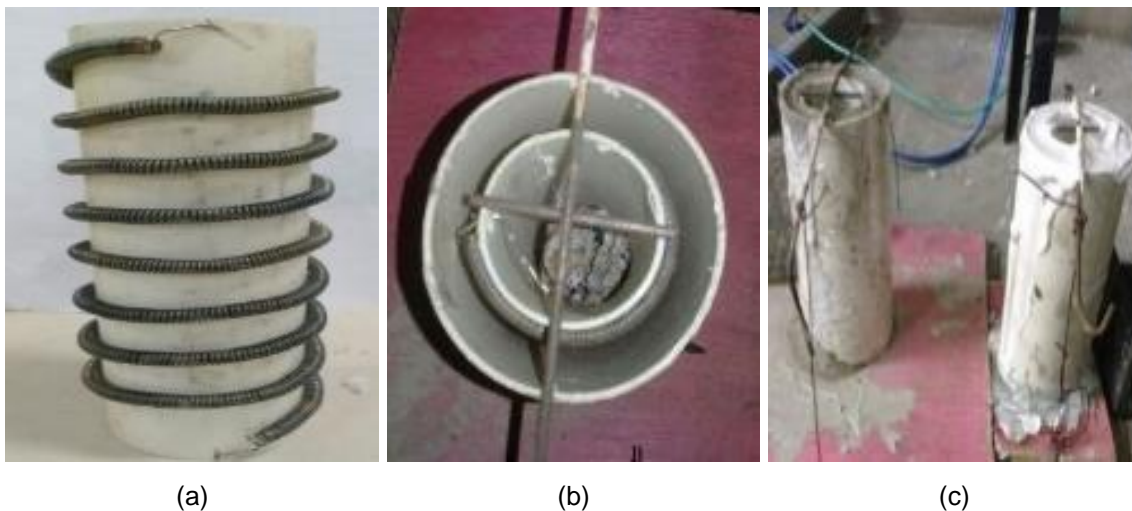
Fonte: O autor, 2024.

### 3.1.2 Procedimento para fabricação da resistência

Para fornecer o calor necessário à criação de uma atmosfera adequada para a solidificação direcional, o dispositivo utiliza resistência elétrica. A fabricação da resistência envolveu o uso de um fio de níquel-cromo com 0,90 mm de diâmetro, que foi enrolado em forma de espiral. Em seguida, essa resistência foi enrolada ao redor de um tubo com 50 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento, que, por sua vez, foi inserido em outro tubo de 100 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento, preparou-se duas resistências distintas.

Na primeira resistência, o espaço entre os dois tubos foi preenchido com massa refratária de modelo Quartzolit, enquanto na segunda resistência, o espaço entre os tubos recebeu gesso refratário. Nas três ligas testes a resistência utilizada continha gesso refratário. Os detalhes do processo de fabricação das resistências estão ilustrados nas Figuras 18 (a) onde é mostrado a resistência enrolada no tubo, (b), os dois tubos vistos de cima já com a resistência enrolada em seu interior e (c), os moldes já preenchidos.

**Figura 18** - (a) Resistência enrolada no tubo; (b) O tubo com a resistência colocado dentro de outro tubo e (c) Tubos preenchidos com massa e gesso refratários



Fonte: O autor, 2024.

Após um período de três a cinco dias, o molde de PVC foi removido das resistências, revelando-as completamente prontas, como ilustrado na Figura 19.

**Figura 19** - Resistências prontas



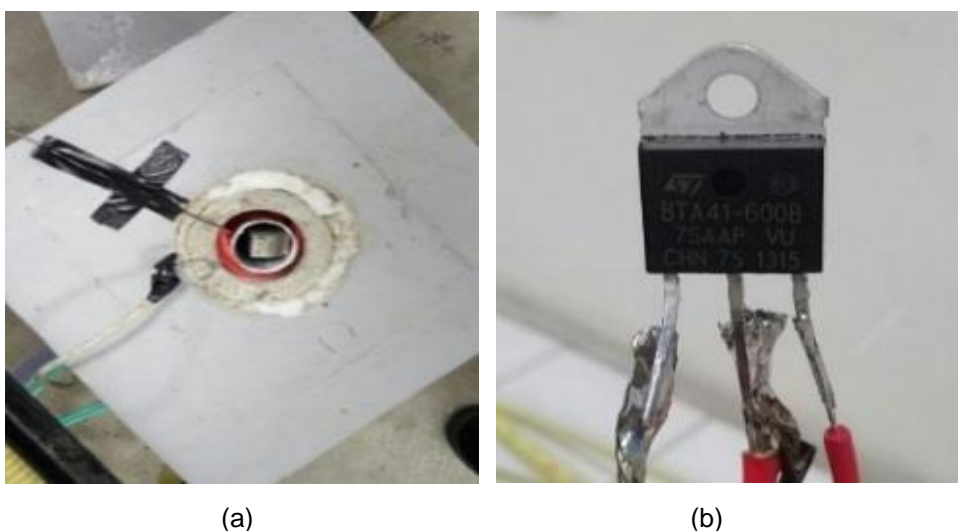
Fonte: O autor, 2024.

### 3.1.2.1 Alocação da resistência dentro do dispositivo

A alocação da resistência dessa forma teve como objetivo facilitar a manutenção em caso de queima da mesma, onde foi necessário incorporar um Termopar tipo K, que se mostrou mais adequado para o dispositivo por conta de sua temperatura de trabalho e seu bom custo-benefício, sendo responsável por monitorar a temperatura interna. Esse componente foi fixado no forno com fita isolante, como

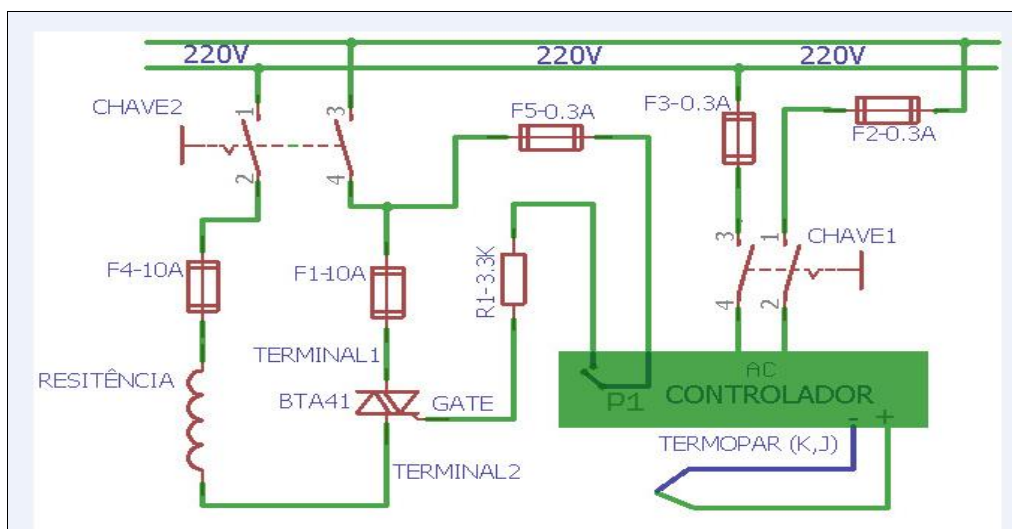
demonstrado na Figura 15 (a). Além disso, empregou-se um transistor BTA 41 (triac), cuja finalidade é receber a energia da rede elétrica e direcioná-la para a resistência por meio de um dos dois terminais de alimentação, conforme ilustrado na Figura 20 (b).

**Figura 20** - (a) Termopar tipo K e (b) Transistor BTA 41 (triac)



**Fonte:** O autor, 2024.

Para proteger os componentes elétricos, foram agregados dois disjuntores, um destinado ao termopar e o outro à resistência, com o propósito de prevenir danos causados por curtos-circuitos e sobrecargas elétricas. Adicionalmente, foram utilizados cinco fusíveis, incluindo dois de 10 A e três de 0,3 A, que interrompem o fluxo de corrente elétrica caso ultrapasse os limites permitidos, evitando curtos-circuitos no dispositivo, o circuito elétrico é demonstrado na Figura 21.

**Figura 21** – circuito elétrico do dispositivo

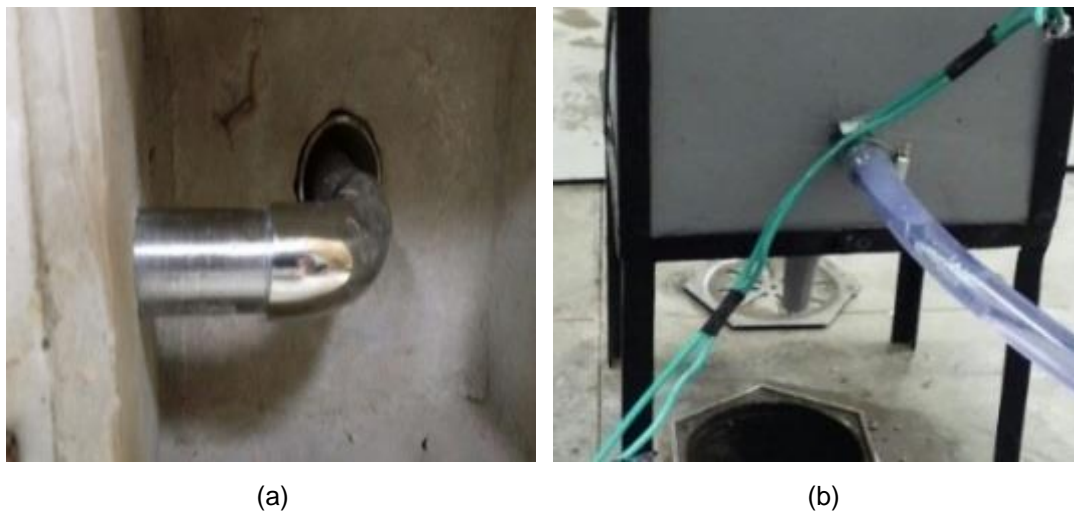
Fonte: O autor, 2024.

Um Controlador de Temperatura foi empregado para monitorar a temperatura interna do forno, ajustando-a conforme necessário para o projeto, mantendo-a em cerca de 700 °C. Para conectar a resistência ao dispositivo, foi necessária a utilização de um Plug Industrial de 220 V ca com capacidade de 32 A, além de quatro metros de fio elétrico com seção de 6 mm<sup>2</sup>, para receber a energia proveniente da rede de distribuição.

### 3.1.3 Parte hidráulica

Para a parte hidráulica do dispositivo, foram necessários dois tubos de aço com 150 mm de comprimento e 16 mm de diâmetro, juntamente com um joelho de aço que serviu para conectar esses dois tubos, conforme representado na Figura 22 (a). Um desses tubos foi inserido no suporte da lingoteira, que possui 32 mm de diâmetro e entrará em contato direto com a panelinha da lingoteira. O segundo tubo foi posicionado ao lado de uma mangueira de 4 metros de comprimento e fixado a ela por meio de uma braçadeira, assegurando uma conexão firme. Na extremidade oposta dessa mangueira, também foi utilizada uma braçadeira para conectá-la à torneira, de onde fluirá o jato d'água, como indicado na Figura 22 (b).

**Figura 22** - (a) Os dois tubos de aço unidos por um joelho de aço e (b) Mangueira e braçadeira



Fonte: O autor, 2024.

Para medir a vazão do líquido utilizado no resfriamento do lingote, uma mola em formato de espiral foi inserida em uma garrafa PET que havia sido cortada ao meio. Para aplicar pressão sobre essa mola, uma tampa de garrafa foi fixada em uma extremidade da mangueira, enquanto a outra extremidade foi conectada à saída de água da torneira, conforme ilustrado na Figura 23. Através da lei de Hooke foi possível calcular o módulo da força elástica produzida pela mola e chegar a pressão de água que foi quantificada em  $P = 2,09 \text{ N/m}^2$ , resultando em uma vazão aproximada de 25 litros por minuto.

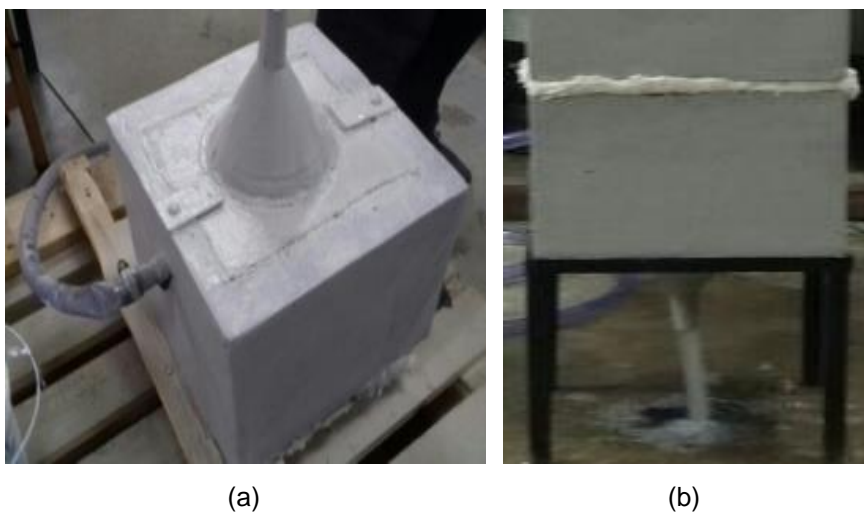
**Figura 23** - Método utilizado para medir a vazão da água



Fonte: O autor, 2024.

Conforme mostra a Figura 24 (a) colocou-se uma chapa de aço de 100x100 mm no fundo do forno, junto com um funil de aço medindo 120 mm de comprimento, para possibilitar o escoamento do líquido de resfriamento, no caso, a água, sendo que esse líquido resultante vai decair direto na rede de esgoto ou em caso de necessidade pode ser acoplado uma mangueira com o intuito de direcionar a vazão do líquido, como apresenta a Figura 24 (b).

**Figura 24** - (a) Chapa de aço e funil e (b) Decaimento do líquido na rede de esgoto



Fonte: O autor, 2024.

### 3.2. Solidificação das ligas

No início do processo de fabricação do lingote das ligas contendo Al-Ni e Al-Cu-Ni, aplicou-se uma camada de alumina tanto dentro quanto fora da lingoteira. Em seguida, a lingoteira foi colocada no forno para secar, com o objetivo de prevenir qualquer interação entre o metal líquido e o material da lingoteira. Uma quantidade de alumínio sólido foi inserida no cadinho e aquecida em um forno industrial previamente aquecido a 900 °C. Após um período de 40 a 50 minutos, o alumínio atingiu o estado líquido e o metal foi despejado na lingoteira do dispositivo, conforme ilustrado na Figura 25. Posteriormente, a tampa foi selada, e simultaneamente a torneira de água foi ativada por 10 minutos para permitir o resfriamento completo do lingote.

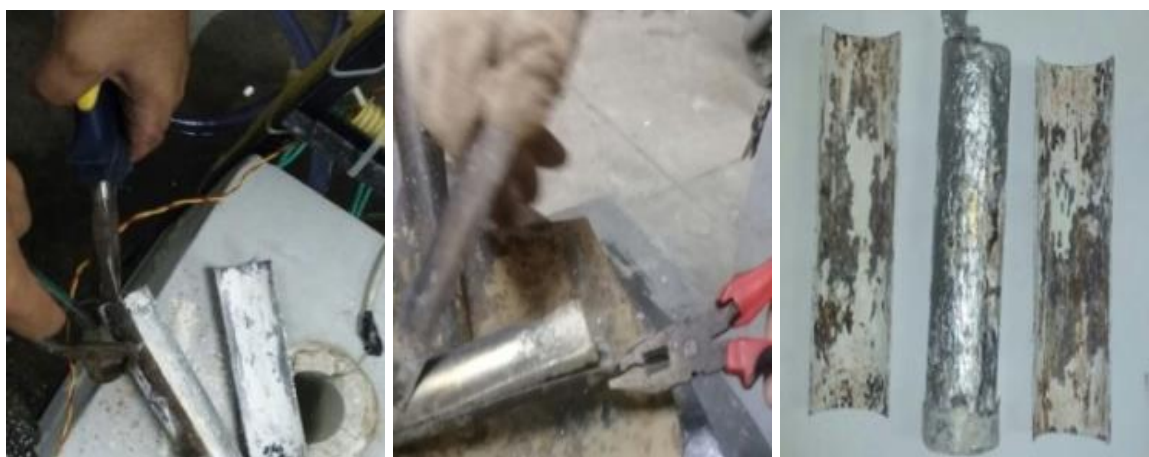
**Figura 25** - Vazamento do metal dentro da lingoteira



Fonte: O autor, 2024.

Após o material ter esfriado completamente, as braçadeiras da lingoteira foram removidas, resultando no primeiro lingote de alumínio, pronto para as próximas etapas, conforme demonstrado na Figura 26. O mesmo procedimento mencionado anteriormente foi repetido para os lingotes das ligas contendo 2,5%Ni, 9%Ni e 4,5%Cu2,5%Ni.

**Figura 26** – (a) remoção das braçadeiras da lingoteira, (b) retirada do molde e (c) lingote desmoldado



(a)

(b)

(c)

Fonte: O autor, 2024.

Para o estudo da granulometria interna das peças, após o desmolde dos três lingotes, foi feito um corte longitudinal em cada um deles com o uso de uma serra industrial.

### 3.2.1 Caracterização Macroestrutural

Após a solidificação vertical ascendente, os lingotes foram cortados longitudinalmente ao meio e uma secção foi usada para se caracterizar a geometria da macroestrutura.

#### 3.2.1.1 Macroestrutura

Depois da peça ser cortada longitudinalmente, uma secção do lingote foi lixada em uma lixadeira manual, em uma sequência de lixas de granulometria que variaram de 80 até 1200 Mesh, alternando a direção do lixamento em 90 graus para cada novo lixamento até a última lixa, de modo a se conseguir uma superfície espelhada, sem a presença de riscos. Em seguida, a superfície polida, ou seja, a liga de alumínio contendo 2,5% de níquel, foi atacada quimicamente com uma solução aquosa ácida (Keller), Figuras 27 (a) e 27 (b), para que fosse possível se fazer a visualização da macroestrutura da peça.

**Figura 27** - (a) Keller - solução aquosa ácida e (b) Keller sendo passado na liga de alumínio +2,5% de níquel



(a)

(b)

Fonte: O autor, 2024.

O mesmo procedimento de lixamento foi realizado para a liga de alumínio contendo 9% de níquel, entretanto, esta foi atacada por outra solução aquosa ácida (Tucker), conforme mostram as Figuras 28 (a) e 28 (b), para que fosse possível a visualização da macroestrutura da supracitada peça.

**Figura 28** - (a) Tucker - solução aquosa ácida e (b) Tucker sendo passado na liga de alumínio + 9% de níquel



(a)

(b)

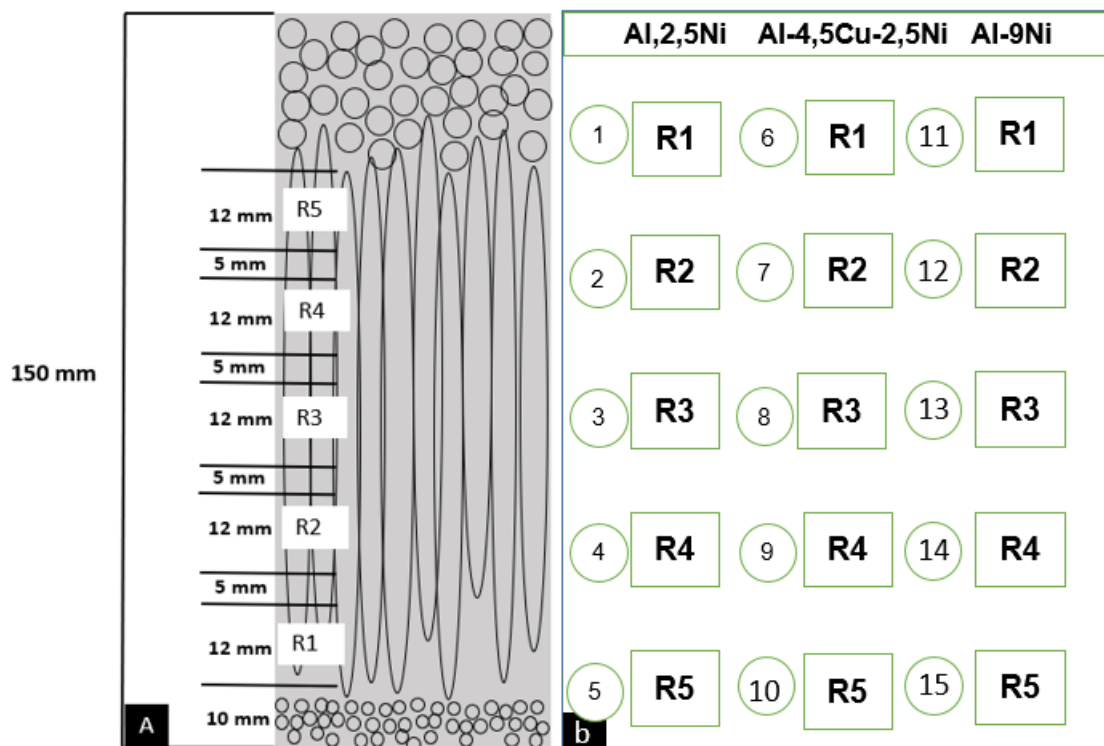
Fonte: O autor, 2024.

### 3.2.1.2 Microestrutura

Na outra secção do lingote, usada para caracterizar a geometria da microestrutura da peça, foram utilizadas lixas de granulometria que variaram de 120 a 1500 Mesh e em uma politriz rotativa com velocidade variada com a presença de água e alumina, este foi polido variando o ângulo de  $90^\circ$  até que a superfície ficasse isenta de riscos e irregularidades. Após este procedimento, foi realizado o ataque com as mesmas soluções aquosas ácidas dos itens anteriores, ou seja, Keller – alumínio +2,5% de níquel e Tucker – alumínio +9% de níquel e alumínio +4,5% de cobre +2,5% de níquel, que atuou na superfície da peça por alguns minutos e, logo em seguida, foram realizadas análises microscópicas com o auxílio do sistema de processamento de imagem.

A Figura 29 apresenta de forma ilustrativa as amostras embutidas em resina líquida onde foram divididas em cinco regiões de 12mm cada, com espaçamento de 5mm entre uma e outra, tendo como referência para as regiões 10mm a partir da base do lingote.

**Figura 29** – Marcação da região dos corpos de prova (A) esquema de embutimento das amostras (b)



Fonte: O autor, 2024.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após todo o processo e metodologia utilizada durante o trabalho, a Figura 30 apresenta o dispositivo pronto para utilização depois de testes feitos, tais como: aquecimento da câmara interna, vazamento do líquido refrigerante para solidificação unidirecional ascendente e estabelecer uma faixa de temperatura no transdutor. O dispositivo possui o sistema de aquisição de dados de temperatura automático, além da sua fácil manutenção, mobilidade e uso simplificado, podem ser feitas adaptações para substituição de líquido refrigerante por um resfriamento com gás.

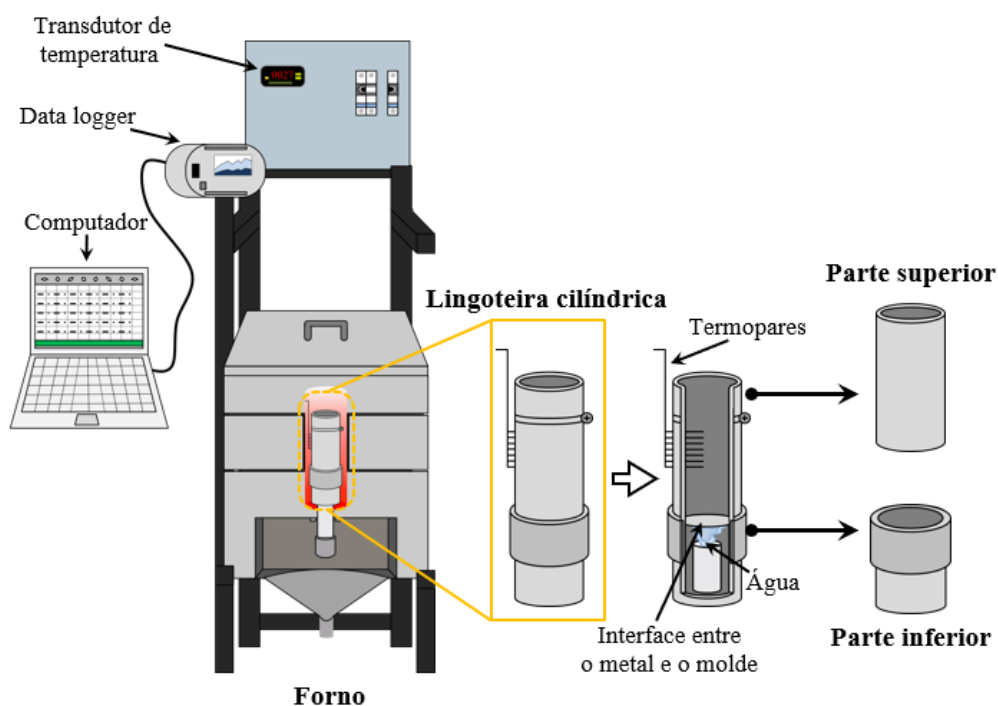
**Figura 30** – Forno de solidificação de frente



**Fonte:** O autor, 2024.

É possível controlar a temperatura de dentro da câmara através de um termopar acoplado a um controlador. Isso permite que a resistência utilizada tenha uma maior vida útil, não sendo necessário que o forno trabalhe com temperaturas fora da faixa de 600°C a 800°C, desejadas para o processo de solidificação. Além disso, permite que o material refratário sofra o mínimo de dano possível devido ao aumento interno da temperatura. A manta refratária cerâmica permite que a temperatura interna fique concentrada na câmara do dispositivo, fazendo com que tenha um rápido aquecimento. A Figura 31 ilustra o desenho esquemático do dispositivo.

**Figura 31** - Desenho esquemático do dispositivo de solidificação unidirecional



Fonte: O autor, 2024.

#### 4.1 Tabela de dados coletados do dispositivo

A Tabela 1 apresenta alguns parâmetros calculados durante o trabalho que identifica as características gerais do dispositivo. Esse instrumento de solidificação depende de algumas variáveis como a vazão e pressão, uma vez que, variações de pressão de água no sistema hidráulico pode mudar de forma significativa o comportamento estrutural da liga que está sendo solidificada. O diâmetro da câmara de solidificação bem como sua altura vai definir as características geométricas da lingoteira e do corpo de prova cilíndrico durante o processo.

**Tabela 1** - Dados do dispositivo de solidificação unidirecional

<b>Ord</b>	<b>Mensurando</b>	<b>Quantidade</b>
1	Potência	2,2 kW
2	Voltagem de trabalho	220 W
3	Altura da câmara	15 mm
4	Volume da câmara	117,75 cm <sup>2</sup>
5	Diâmetro da câmara	50 mm
6	Vazão	25 L/min
7	Pressão	2,09 N/m <sup>2</sup>
8	Diâmetro da resistência	9,88 mm
9	Temperatura máxima	1000 °C

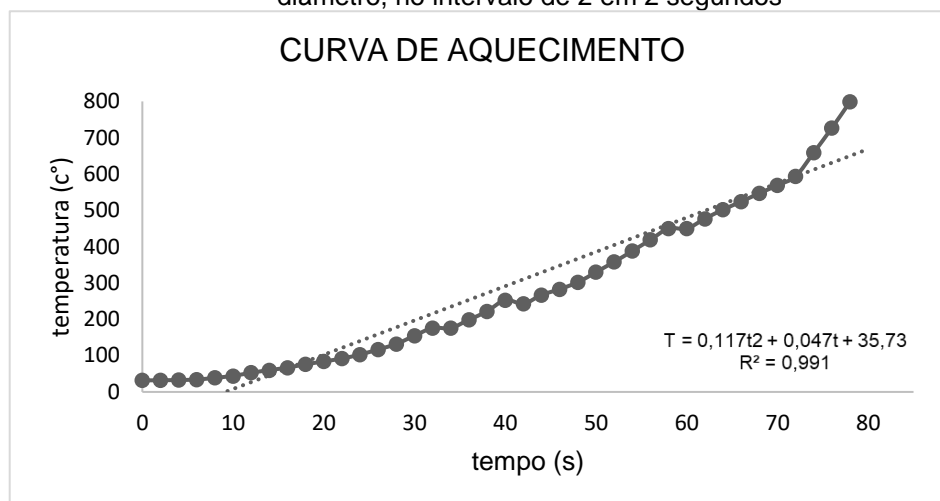
Fonte: O autor, 2024.

## 4.2 Curva de aquecimento

Ao analisar o gráfico da curva de aquecimento para uma resistência de 0,90 mm de diâmetro, com intervalos de 2 segundos, onde foi gerada por meio da equação (2)  $T(t)=0,1198t^2-0,0537t + 35,663$  ;  $R^2=0,988$ , conforme representado na Figura 32, pode-se concluir que os pontos no gráfico indicam que o dispositivo atinge uma temperatura de aproximadamente 800 °C em 2 minutos. De acordo com a Associação Brasileira de Alumínio (2023), o alumínio tem um ponto de fusão de 660°C, indicando assim a eficácia do dispositivo para facilitar o processo de fusão do alumínio líquido.

Segundo Nicolau (2014), a distribuição de temperatura dos gases revela uma zona de queima mais breve, caracterizada por um aumento acentuado a partir de 700 °C, onde também foi possível observar um aumento de temperatura repentina na curva de aquecimento do dispositivo. O encurtamento da zona de queima pode ter um impacto significativo na sinterização da matéria-prima.

**Figura 32** - Gráfico da Curva de Aquecimento para a resistência de 0,90 mm de diâmetro, no intervalo de 2 em 2 segundos



Fonte: O autor, 2024.

### 4.3 Estudo metalográfico

A partir da análise metalográfica, pode-se entender o desempenho macroestrutural de determinados componentes, fornecendo informações sobre composição, organização dos grãos e até mesmo presença de falhas dentro do material.

#### 4.3.1 Macrografia das ligas Al-2,5%Ni, Al-9%Ni, Al-4,5%Cu-2,5%Ni

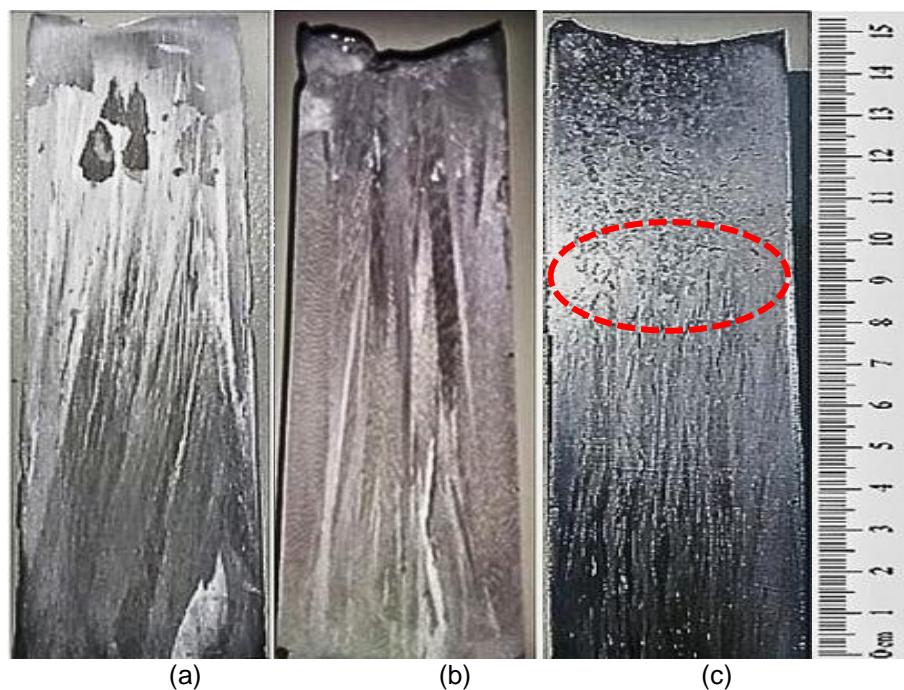
Após a aplicação das técnicas metalográficas para examinar a macroestrutura, as imagens revelaram a presença de grãos colunares nas três ligas que foram estudadas. Embora todas as ligas tenham apresentado grãos colunares, foi observada uma transição de colunar para equiaxial em uma delas (Figura 33 (c) linha tracejada), na qual o cobre desempenhou um papel importante na modificação da estrutura do material durante o processo de solidificação direcional.

A transição de colunar para equiaxial ocorreu durante a solidificação, quando, possivelmente, os grãos equiaxiais à frente da zona de crescimento colunar impediram o avanço desta região. A formação dos grãos equiaxiais depende dos mecanismos de nucleação e crescimento comuns aos processos de transformação de fases, influenciados pela presença do cobre na liga ternária, quando a solidificação direcional for bem-sucedida.

Através do estudo metalográfico foi possível fazer uma análise comparativa entre a macroestrutura gerada pelo dispositivo e a macroestrutura fornecida pela literatura. A macroestrutura do lingote solidificado é determinada através do surgimento, no líquido, de núcleos sólidos que em circunstâncias termodinâmicas convenientes, crescem originando grãos cristalinos da macroestrutura. As dimensões, orientação e distribuição, isto é, a morfologia dos grãos cristalinos, caracterizam a macroestrutura das ligas (Faria, 2015; Goulart, 2010; Canté, 2009).

A Figura 33 apresenta a macroestrutura do (a) Alumínio + 2,5% de Níquel, (b) Alumínio + 9% de Níquel e (c) Alumínio + 4,5% de Cobre e 2,5 de Níquel.

**Figura 33** – Macroestrutura (a) Al-2,5%Ni, (b) Al-9%Ni e (c) Al-4,5%Cu-2,5%Ni



Fonte: O autor, 2024.

#### 4.3.2 Micrografia das ligas Al-2,5%Ni, Al-9%Ni, Al-4,5%Cu-2,5%Ni

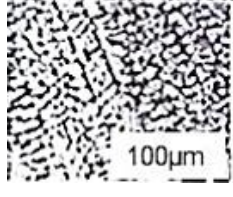
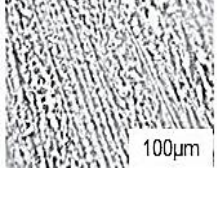
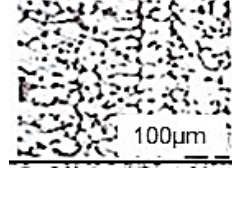
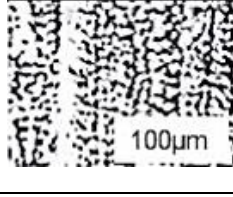
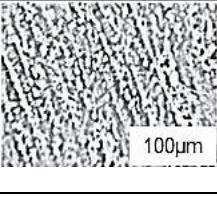
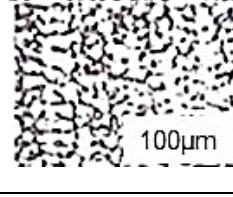
Após análises microscópicas (aumentadas em 200x) notou-se que a microestrutura da liga Al-2,5%Ni tem os espaçamentos dendríticos maiores e mais afastados uns dos outros, resultado este também constatado no trabalho de Nascimento (2015).

De acordo com Seixas (2018), em áreas mais distantes do ponto de extração de calor, o espaçamento dendrítico secundário aumenta, e quanto maior a concentração de Ni, menor é a microestrutura.

Foi possível determinar que a liga Al-4,5%Cu2,5%Ni apresenta grãos mais refinados e o espaçamento das ligas contendo apenas Al-Ni foram menores em relação a liga contendo Al-Ni-Cu.

Na Figura 34 é possível observar que quanto mais se afasta da interface de solidificação, maior é o espaçamento interdendrítico secundário. Ademais, verificou-se que a liga Al-4,5%Cu2,5%Ni possui uma região com espaçamentos dendríticos maiores.

**Figura 34** - Espaçamentos dendríticos do Al-2,5%Ni, Al-9%Ni e Al-4,5%Cu-2,5%Ni

Região	Al-2,5%Ni	$\lambda_2$ médio ( $\mu\text{m}$ )	Al-9%Ni		Al-4,5%Cu- 2,5%Ni	
R1		8,48		4		9,91
R2		10,09		6		12,05

Fonte: O autor, 2024.

## 5 CONCLUSÕES

O projeto e o desenvolvimento do dispositivo de solidificação unidirecional ascendente com regime transiente de fluxo de calor se mostraram eficiente na solidificação, por meio das análises das caracterizações macro e microestruturais das ligas Al-2,5%Ni, Al-9%Ni e Al-4,5%Cu-2,5%Ni.

A seleção cuidadosa dos materiais, o dimensionamento adequado dos componentes elétricos e hidráulicos, a obtenção da curva de aquecimento da câmara do forno e a realização bem-sucedida da solidificação unidirecional foram fundamentais para atestar a eficiência do processo.

De acordo com a metodologia utilizada no presente trabalho, concluiu-se que a potência do dispositivo, avaliada em 2MW, demonstrou sua capacidade de fundir e solidificar ligas de alumínio de maneira eficiente. A rápida elevação da temperatura na câmara interna do forno, alcançando os 800°C em apenas 3 minutos, revelou-se adequada para promover a formação de estruturas colunares em diversas ligas de alumínio.

A utilização do transdutor de temperatura possibilitou o estabelecimento de uma faixa de temperatura de trabalho, facilitando a solidificação de diferentes tipos de ligas, considerando suas variadas temperaturas *liquidus* e de vazamento.

A análise macroestrutural das ligas solidificadas evidenciou a presença de estruturas com grãos colunares e microestruturas dendríticas, direcionadas para uma única direção de gradiente de temperatura.

### 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Otimização do dispositivo com a investigação de novos materiais refratários ou revestimentos que possam prolongar a vida útil do dispositivo e melhorar sua resistência às altas temperaturas;
- Realizar experimentos com diferentes composições de ligas, variando os elementos de liga para estudar seus efeitos na macro e microestrutura durante a solidificação direcional;
- Avaliar as propriedades mecânicas dos lingotes produzidos, como resistência à tração, dureza e tenacidade;
- Analisar o efeito de diferentes taxas de resfriamento nos lingotes produzidos, explorando como isso afeta a estrutura e as propriedades finais dos materiais.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. **Características Químicas e Físicas**. 2023. Disponível em < <https://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/>>. Acesso em: 16 de mar. de 2024.
- ASHCROFT, N. W.; MERMIN, D. N., **Solid state physics**, New York: 2011, Holt, Rinehart and Winston, 2011.
- BOYLESTAD, R. L. Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos. 8. ed. São Paulo: Pearson, 2004.
- CANTÉ, M. V. **Solidificação Transitória, Microestrutura e Propriedades de Ligas Al-Ni**. 2009. 204 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Campinas, 2009.
- CARVALHO, D. B. *et al.* The columnar to equiaxed transition of horizontal unsteady-state directionally solidified Al-Si alloys **Materials Research**, v. 17, n. 2, p. 498–510, 2014.
- CORRÊA, E. G. **Estudo dos parâmetros térmicos, microestrutura e dureza após os processos de solidificação e tratamento térmico t6 da liga al-3%cu-3%ni solidificada direcionalmente**. Belém-Pa. Dissertação. 2021.
- DANTAS, P.P. **Caracterização de Ligas Hipereutéticas de Al-Ni Solidificadas Unidirecionalmente**, Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Faculdade UnB Gama, Brasília, 2014.
- DIAS FILHO, J. M. *et al.* Influência das Variáveis Térmicas Sobre os Espaçamentos Dendríticos Terciários durante a Solidificação Direcional Horizontal da Liga Al- 6%Cu. **Revista Matéria**. Rio de Janeiro, 2015.
- FARIA, J. D. **Correlações entre Variáveis Térmicas, Microestrutura e Propriedades Mecânicas das Ligas Al-4%Cu e Al-4%Cu-4%Ag Solidificadas em Regime Transitório**. 2015. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, 54 Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Campinas, 2015.
- MESQUITA FILHO *et al.* **Estudo da influência na estrutura e propriedade mecânica da adição de 4,5% de cobre em liga al-2,5%ni solidificada sobre regime transiente de fluxo de calor**. ABM 49° ed. 2018.
- FERNANDES, D. S., *et al.* **Avaliação da solidificação unidirecional de ligas do sistema sn-pb em moldes de aço com 6 e 50 mm de espessuras**. Departamento de Engenharia Mecânica, UFPA, Belém/PA, 2002.
- GARCIA, A. **Solidificação: fundamentos e aplicações**. 2 ed. Campinas-SP: Editora da Unicamp, 2007.

GOULART, P. R. **Caracterização da Microestrutura de Solidificação de Ligas Al-Fe e Correlação com Propriedades Mecânicas**. 2010. 178 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Campinas, 2010.

GOULART, P. R. **Variáveis térmicas de solidificação, microestrutura e propriedades mecânicas de ligas hipoeutéticas Al-Si**, 2005. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

GUERRA, L. N. de A. **Uso de compensador PID no controle da taxa de variação de temperatura em um forno elétrico a resistência**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2006. 52 p. Disponível em: <<https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/7050>>. Acesso em: 22 ago. 2023.

INCROPERA, F. P. *et al.* **Fundamentos de transferência de calor e massa**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

KANTHAL, H. **Resistance heating alloys and systems for industrial furnaces**. 2001.

KURZ, W.; BEZENÇON, C.; GÄUMANN, M. Columnar to equiaxed transition in solidification processing. **Science and technology of advanced materials**, v. 2, n. 1, p. 185, 2001.

MATTJIE, A. C.; RISTOF, R. **Dimensionamento de um trocador de calor para resfriamento de fluido em um circuito hidráulico utilizado em uma plantadeira**. Graduação do curso de engenharia mecânica, Faculdade Horizontina, 2013.

MEZA, E. S. **Modelagem Analítica e Numérica da Solidificação de Ligas Binárias: Análise de Fatores de Influência**. Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de UNICAMP-FEM-DEMA, Campinas, SP. Vol. 306 p. Tese (Doutorado). 2012.

MOHANTY, U. K; SARANGI, H. Solidification of metals and alloys. **Casting Processes and Modelling of Metallic Materials**, p. 19-40, 2020.

MOUTINHO, D. J. C. **Análise da Evolução Microestrutural e da Formação de Macrosegregação e Microporosidade na Solidificação Unidirecional Transitória de Ligas Ternárias AlCuSi**, Tese de Doutorado. Campinas – São Paulo. 2011.

NASCIMENTO, L. G. da S. *et al.* **Influência da adição de nanotubos de carbono nas propriedades mecânicas da liga AL-2% NI solidificadas direcionalmente**. 2015. P.163. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém, 2015.

NICOLAU, V. de P. A Importância da Curva de Queima em Fornos Cerâmicos, **cerâmica industrial**, n.10, p. 28-31, 2012.

OLIVEIRA, E. R. **Correlação entre microestruturas e propriedades mecânicas de ligas Al-Mg solidificadas unidirecionalmente**. 2017. Tese (Doutorado) – programa de pós-graduação em engenharia mecânica, universidade federal da Paraíba – UFPB, paraíba, 2017.

POLA, A.; MONTESANO, L.; GELFI, M.; ROBERTI, R. Semisolid processing of AlSn-Cu alloys for bearing applications. **Solid State Phenomena**. p. 562-568, 2013

QUARESMA, J. M. V. SANTOS C. A; SPIM, Jr, GARCIA, A. **Medidas dos coeficientes de Transferência de calor Metal/Molde na Solidificação de Metais e Ligas**. Anais do VII Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas-ENCIT, p. 615-620, 1998.

REBERNACK, T.; CHERNACK, S. Manutenção para eficiência energética. **Industrial Heating**, p. 32, abril, 2010.

REZENDE, W. de S. **Tipos de refratários: parte III produtos não conformados (monolíticos)**. **Industrial Heating**, p. 47, out./dez. 2011.

ROCHA, O. F. L. **Análise Teórico-Experimental da Transição Celular/Dendrítica e da Evolução da Morfologia Dendrítica na Solidificação Unidirecional em Condições de Fluxo de Calor Transitório**. 2003. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

ROGGIA, L.; FUENTES, R. **Automação industrial**. Colégio técnico industrial de Santa Maria. Universidade Federal de Santa Maria. 2016

SANTOS, R. G. **Transformação de fases em materiais metálicos**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 432 p., 2006.

SEIXAS, K.C. **caracterização mecânica e estrutural das ligas al-2,5%Ni e al 4%Ni, solidificadas via resfriamento direcionado em regime transiente de fluxo de calor**. TCC (Bacharel em Engenharia de materiais). Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, p. 59. 2018.

SILVA, A. A. X.. **Solidificação**. 2017. Disponível em <file:///C:/Users/jeanr/Downloads/Aula\_6\_-\_CM\_-\_Solidificacao.pdf>. Acesso em: 16 de mar. de 2024.

SILVA, D. V. **Estudo do efeito termodinâmico da pressão na solidificação de ligas de alumínio**. João Pessoa – Paraíba, 2019.

SILVA, D. H. **Projeto de um forno à resistência elétrica para fundição de alumínio**. Trabalho de conclusão de curso (TCC). Universidade do vale do taquari, 2016.

Sistema hidráulico: o que é e como funciona. **Nepin acessórios industriais**, 2022. Disponível em: <https://www.nepin.com.br/blog/solucoes-industriais/sistema-hidraulico-o-que-e-e-como-funciona/>. Acesso em: 22 ago. 2023

SOARES, G. **Fundição: Mercado, Processo e Metalurgia**. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2000.

SOUZA, T. A. **Análise experimental da influência das variáveis do processo de solidificação no comportamento de resistência à tração e microdureza de ligas hipoeutética de AL-5%Si**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica. Volta redonda, 2019.

SOUZA, E. N. **Análise Teórica e Experimental do Fluxo de Calor Variacional na Solidificação de Cilindros Horizontais e sua Correlação com Características Estruturais**. Tese de Doutorado, DEMA/FEM/UNICAMP, 2004.

SPINELLI, J. E. *et al.* **Thermosolutal convective effects on dendritic array spacings in downward transiente directional solidification of Al-Si alloys**. Journal of Alloys and Compounds, in press, 2005.

TEIXEIRA, M. M. Transdutor. **Brasil Escola**. Disponível em:< <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/transdutor.htm>>. Acesso em: 21 de Set de 2023.

TIBURTINO, G. de L. **Influência da solidificação direcional nas propriedades mecânicas de uma liga cu-al-be-nb-ni com memória de forma**. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. João Pessoa – Paraíba, 2019.

TOLEDO, R. C. **Estudo da solidificação de ligas metálicas eutéticas em ambiente de microgravidade**. São José dos Campos: INPE, 2013.