



Unifesspa

UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ

CAMPUS DE MARABÁ

FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

RENAN MINEIRO FERREIRA

**CORRELAÇÃO ENTRE PARAMETROS DE SOLIDIFICAÇÃO E
MICROSTRUTURA DA LIGA Al-7%Si-0,5%Mg SOLIDIFICADA
UNIDIRECIONALMENTE.**

MARABÁ

2014

RENAN MINEIRO FERREIRA

**CORRELAÇÃO ENTRE PARAMETROS DE SOLIDIFICAÇÃO E
MICROSTRUTURA DA LIGA Al-7%Si-0,5%Mg SOLIDIFICADA
UNIDIRECIONALMENTE.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Materiais,
Campus de Marabá, Universidade
Federal do Pará. Orientador: Prof.
Carlos Vínicius de Paes Santos.

MARABÁ

2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Biblioteca II da UNIFESSPA. CAMAR, Marabá, PA

Ferreira, Renan Mineiro

Correlação entre parâmetros de solidificação e microestrutura da liga Al-7%Si-0,5%Mg solidificada unidirecionalmente / Renan Mineiro Ferreira ; orientador, Carlos Vinícius de Paes Santos. — 2014.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Engenharia de Materiais, Curso de Engenharia de Materiais, Marabá, 2014.

1. Solidificação. 2. Ligas de alumínio. 3. Microestrutura. I. Santos, Carlos Vinícius de Paes, orient. II. Título.

CDD: 21. ed.: 669.94

RENAN MINEIRO FERREIRA

**CORRELAÇÃO ENTRE PARAMETROS DE SOLIDIFICAÇÃO E
MICROSTRUTURA DA LIGA Al-7%Si-0,5%Mg SOLIDIFICADA
UNIDIRECIONALMENTE.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Materiais,
Campus de Marabá, Universidade
Federal do Pará. Orientador: Prof.
Carlos Vínicius de Paes Santos.

Data de aprovação: 27/06/2014

Conceito: EXECENTE

Banca examinadora:

Prof. Eng. Carlos Vínicius de Paes Santos

ORIENTADOR – UNIFESSPA/FEMAT

Prof. Esp. Márcio Paulo de Araújo Mafra

EXAMINADOR – UNIFESSPA/FEMAT

Prof. Msc. Wenderson Gomes dos Santos

EXAMINADOR – UNIFESSPA/FEMAT

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha filha Júlia da Cruz Ferreira e minha esposa Rayssa Matayoshi da Cruz Ferreira, as maiores inspirações da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Desejo expressar aqui, os meus mais sinceros agradecimentos à todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para que eu me mantivesse forte nesta difícil jornada, sempre incansáveis, no apoio, amizade e incentivo;

A minha mãe, Clemilda Mineiro Ferreira, grande responsável pela minha educação, e grande exemplo de dignidade e perseverança.

A minha esposa Rayssa Matayoshi da Cruz Ferreira, pelos conselhos, amor, dedicação, companheirismo e paciência;

Ao amigo, Kerlon Klayo de Melo Sousa, irmão que ganhei durante esta graduação, e companheiro dos experimentos no laboratório;

Ao amigo e compadre, Christopher Cardoso de Brito, exemplo de dedicação e amizade, e grande responsável pela realização deste trabalho

A Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, pelo apoio na parte experimental deste trabalho.

Aos amigos, Marcelo Torres de Oliveira, Flaviano dos Santos Rodrigues, Elaíne Andrade, Elaine Gonçalves, Cleison Lameira, Eerson Penalva, e todos que contribuíram direta e indiretamente de alguma forma.

Ao meu orientador Prof^o Vinicius Paes, pela orientação, apoio e compreensão.

A todos os professores da Faculdade de Engenharia de Materiais (FEMAT), tutores nesta jornada do conhecimento

A Universidade do Sul e Sudeste do Pará - Unifesspa, pela graduação em Engenharia de Materiais.

E a todos, que de alguma forma contribuíram nesta jornada.

EPIGRÁFE

“O que eu sei é uma gota, o que desconheço é um oceano”.

-Isaac Newton

RESUMO

As propriedades mecânicas de peças fundidas dependem estritamente da sua estrutura interna formada na solidificação. Assim, é de fundamental importância conhecer os aspectos físicos e químicos que influenciam nesta construção estrutural para se obter os melhores processos de solidificação. Este trabalho tem o objetivo de avaliar os parâmetros térmicos e a microestrutura da liga Al-7%Si-0,5%Mg solidificada unidirecionalmente, bem como identificar a correlação entre as mesmas através da obtenção da curva de resfriamento, além da avaliação da taxa de resfriamento direto na interface metal/molde. Uma abordagem teórica experimental foi desenvolvida com o objetivo de demonstrar a influência nos parâmetros térmicos para a obtenção da estrutura granulométrica desejada. A microestrutura obtida foi avaliada através da caracterização de amostras obtidas nas posições longitudinal e transversal. A avaliação da presença de espaçamentos dendríticos secundários (λ_2) foi bastante satisfatória e é geralmente associada a um aumento na resistência mecânica das ligas de alumínio.

Palavras-Chaves: Solidificação Unidirecional, parâmetros térmicos, espaçamentos dendríticos

ABSTRACT

The mechanical properties of castings depends strictly on its internal structure formed during solidification. Thus, it is of fundamental importance to know the physical and chemical aspects that influence this structural construction to best Solidification processes. This work aims to evaluate the thermal parameters and the microstructure of the alloy Al-7% Si-0,5% Mg solidified unidirectionally and identify the correlation between them by obtaining the cooling curve, and evaluation of the rate direct cooling in the metal / mold interface. An experimental theoretical approach was developed with the aim of demonstrating the influence on thermal parameters for obtaining the desired particle size structure. The microstructure obtained was evaluated by the characterization of samples obtained in the longitudinal and transverse positions. The evaluation of the presence of secondary dendrite arm spacings (λ_2) was quite satisfactory and is generally associated with an increase in the mechanical resistance of the alloys.

Keywords: Unidirectional Solidification, thermal parameters, dendritic spacings

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama de Equilíbrio Al-Si.	16
Figura 2 - Esquema de ramificações dendríticas caracterizadas por espaçamentos interdendríticos primários (λ_1) secundários (λ_2) e terciários(λ_3).	18
Figura 3 - Dispositivo de solidificação vertical ascendente: 1) Rotâmetro; 2) Chapa molde; 3) Termopares; 4) Computador; 5) Registrador de temperatura; 6) Lingote; 7) Lingoteira; 8) Controle de temperatura; 9) Resistências elétricas; 10) Paredes de isolamento.	20
Figura 4 - Fluxograma representativo do procedimento experimental	21
Figura 5 - (a) Cadinho de Carbetto de Silício; (b) Forno de Fundição tipo Mufla; (c) Balança Analítica Digital.....	22
Figura 6 - Componentes do Forno de Solidificação Unidirecional Ascendente	23
Figura 7 - (a) Termopar acoplado com plug conector; (b) Registrador, Sistema de aquisição de dados; (c) Software para registro das temperaturas do processo.	24
Figura 8 - Lingoteira em aço inoxidável e a chapa molde, em aço carbono e aço inox, utilizadas na solidificação ascendente e obtenção do lingote resultantes.	25
Figura 9 - Temperatura de formação da primeira fase líquida para a concentração de 7% de Silício.....	26
Figura 10 - Lingote seccionado longitudinalmente. (a) Parte para a avaliação microestrutural longitudinal; (b) Parte para a avaliação microestrutural transversal.	27
Figura 11-Instrumentos de corte. (a) Máquina de corte “Serra fita”; (b) Arco de Serra.....	27
Figura 12 - Seções de corte para obtenção das amostras. (a) cortes transversais; (b) cortes longitudinais.	28
Figura 13 - Instrumentos de embutimento. (a) tubo de PVC; (b) Resina para embutimento; (c) Peças embutidas.	29
Figura 14 - Lixadeira com lubrificação a água.....	29
Figura 15 - Lixadeira Politriz.....	30
Figura 16 - Microscópio com interface digital	30
Figura 17 - Curva de resfriamento da liga Al-7%Si-0,5%Mg	32
Figura 18 - Curva da Isoterma Liquidus, Posição x tempo.	33
Figura 19 - Velocidade de passagem da Isoterma Liquidus pelos termopares	34
Figura 20-Taxa de resfriamento X posição.....	35
Figura 21 - Formação de (λ_2) em toda a geometria da peça. Posições Longitudinais	37
Figura 22-Formação de (λ_2) em toda a geometria da peça. Posições Transversais.	38
Figura 23 - Formação de (λ_2) em toda a geometria da peça. Posições Transversais.	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

λ_1	Espaçamento Dendritico Primário
λ_2	Espaçamento Dendritico Secundário
λ_3	Espaçamento Dendritico Terciário
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
FEMAT	Faculdade de Engenharia de Materiais
Unifesspa	Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
TCE	Transição Colunar/Equiaxial
V_L	Velocidade de Solidificação
G_L	Gradiente térmico à frente da interface metal/molde
T_V	Temperatura de vazamento
ΔT_V	Variação da temperatura de vazamento
T	Taxa de Resfriamento
Al-Si	Liga Alumínio-Silício
Cr-Ni	Liga Cromo-Níquel
<i>Liquidus</i>	Momento de formação da primeira fase líquida
<i>Solidus</i>	Momento de formação da primeira fase sólida

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO	12
1.1- OBJETIVOS	14
1.1.1- Objetivo Geral.....	14
1.1.2- Objetivos Específicos	14
2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1- LIGAS DE ALUMÍNIO	15
2.1.1- Sistema Alumínio - Silício	15
2.1.3- Ligas Alumínio-Silício-Magnésio	16
2.2- MICROESTRUTURA DE SOLIDIFICAÇÃO.....	17
2.3- TÉCNICA DA SOLIDIFICAÇÃO UNIDIRECIONAL.....	18
3- MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1- MATERIAIS UTILIZADOS NO PROCESSO EXPERIMENTAL	22
3.1.1- Equipamentos utilizados na fundição da liga	22
3.1.2- Forno de Solidificação Unidirecional Ascendente	23
3.1.3- Equipamentos para o controle da temperatura e a obtenção dos parâmetros térmicos.	24
3.1.4- Utensílios Operacionais	24
3.2- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DE CONFECÇÃO DA LIGA	25
3.2.1 Fusão e obtenção da liga solidificada unidirecionalmente	25
3.2.2. Corte do lingote e preparação das amostras	27
3.2.3. Caracterização das Amostras e obtenção das imagens	29
4- RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	31
4.2- PARAMETROS TÉRMICOS	31
4.2.1- Curvas de resfriamento	31
4.2.2- Curva da Posição X tempo	33
4.3- ESTRUTURAS DE SOLIDIFICAÇÃO	35
4.4- CORRELAÇÃO ENTRE PARAMETROS TÉRMICOS E MICROESTRUTURA	36
5- CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	40
5.1- CONCLUSÕES.....	40
5.2- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	41
REFERÊNCIAS	42

1- INTRODUÇÃO

As ligas de Alumínio possuem um amplo campo de utilização por conta da versatilidade de suas propriedades, uma vez que este metal se combina facilmente a outros elementos metálicos e proporciona a confecção de ligas com boas características para as mais variadas aplicações. Dentre as ligas de Alumínio utilizadas na produção de componentes fundidos e acabados, a série do sistema Alumínio-Silício são as mais importantes, pois as mesmas correspondem a 90% das ligas de Alumínio consumidas atualmente.

A razão para a ampla utilização desta série deve-se à atrativa combinação de propriedades mecânicas, resistência à corrosão e excelente fundibilidade. As propriedades das ligas alumínio-silício são fortemente dependentes do processo de fundição usado, das eventuais adições químicas para modificação do eutético, da estrutura granulométrica, da morfologia do silício primário e do tratamento do metal líquido (para remoção de hidrogênio e para remover inclusões). Para processos de fundição sob baixas taxas de resfriamento (moldes de areia, gesso), a faixa de composições usuais vai de 5 a 7% em peso de Si, para moldes permanentes de 7 a 9% Si e para fundição sob pressão de 8 a 12%. Um dos principais atributos desta classe de ligas é sua fluidez, ou seja, a habilidade para preencher uma cavidade de molde. Fluidez é uma característica complexa que é influenciada pela tensão superficial, viscosidade, faixa de solidificação da liga, superaquecimento do líquido antes do vazamento, etc. O sistema Al-Si forma um eutético simples, no qual as fases em equilíbrio são Al- α e Si, na forma de lâminas ou partículas finamente dispersas [1].

Outros elementos combinados ao Sistema Al-Si resultam em melhorias consideráveis em propriedades com bastante importância para determinadas aplicações. A adição de outros metais a estas ligas podem produzir alterações microestruturais como refino de grão, formação de precipitados, fases intermetálicas e diminuição de inclusões. Dependendo do sistema de fundição dessas ligas, pode-se conseguir ainda uma melhoria na taxa de transferência de calor metal/molde, além de um aumento na fluidez correlacionado as taxas de superaquecimento da liga.

O Magnésio produz uma diminuição considerável na densidade das ligas Al-Si, além de proporcionar uma melhoria na resposta a tratamentos térmicos,

tornando as Ligas da Série A 3xxx.x fundidas e trabalhadas, consideravelmente aplicáveis a componentes na confecção de condutores elétricos, bicicletas, aeronáuticos, automobilísticos, aeroespaciais e estruturais que necessitam de baixa densidade e alta resistência.

Esta liga aliada a um bom processo de fundição pode produzir macroestruturas equiaxiais ou totalmente colunares, relacionadas a superaquecimento e taxas de transferência de calor. Microestruturalmente, pode formar estruturas bem refinadas com formação de espaçamentos dendríticos, primários, secundários e terciários, logo, fica evidente que o estudo das taxas de resfriamento pode proporcionar a obtenção de microestruturas mais refinadas com menores espaçamentos dendríticos e uma maior proporção de fases intragranulares, tendo assim impacto direto no aumento na resistência mecânica do lingote. Estudos têm mostrado que as variáveis significativas para o controle da solidificação são: velocidade da solidificação (V_L), gradiente térmico à frente da interface sólido/líquido (G_L) e taxa de resfriamento (T), que se interconectam através do super-resfriamento constitucional^[2].

Neste trabalho, a avaliação das taxas de resfriamento foram obtidas através do monitoramento da solidificação unidirecional ascendente da liga, posteriormente caracterizada para a avaliação da microestrutura predominante.

1.1- OBJETIVOS

1.1.1- Objetivo Geral

Avaliar os parâmetros microestruturais do Sistema Al-7%Si-0,5%Mg solidificada unidirecionalmente e correlacionar com as curvas de resfriamento obtidas.

1.1.2- Objetivos Específicos

- Analisar a formação de espaçamentos dendríticos secundários (λ_2);
- Obter a Isoterma *Liquidus* experimentalmente e correlacionar a curva experimental com a microestrutura formada;
- Através da obtenção da Isoterma *Liquidus*, obter as taxas de resfriamento da interface metal/molde e o tempo de passagem da Isoterma nas posições dos termopares.

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- LIGAS DE ALUMÍNIO

2.1.1- Sistema Alumínio - Silício

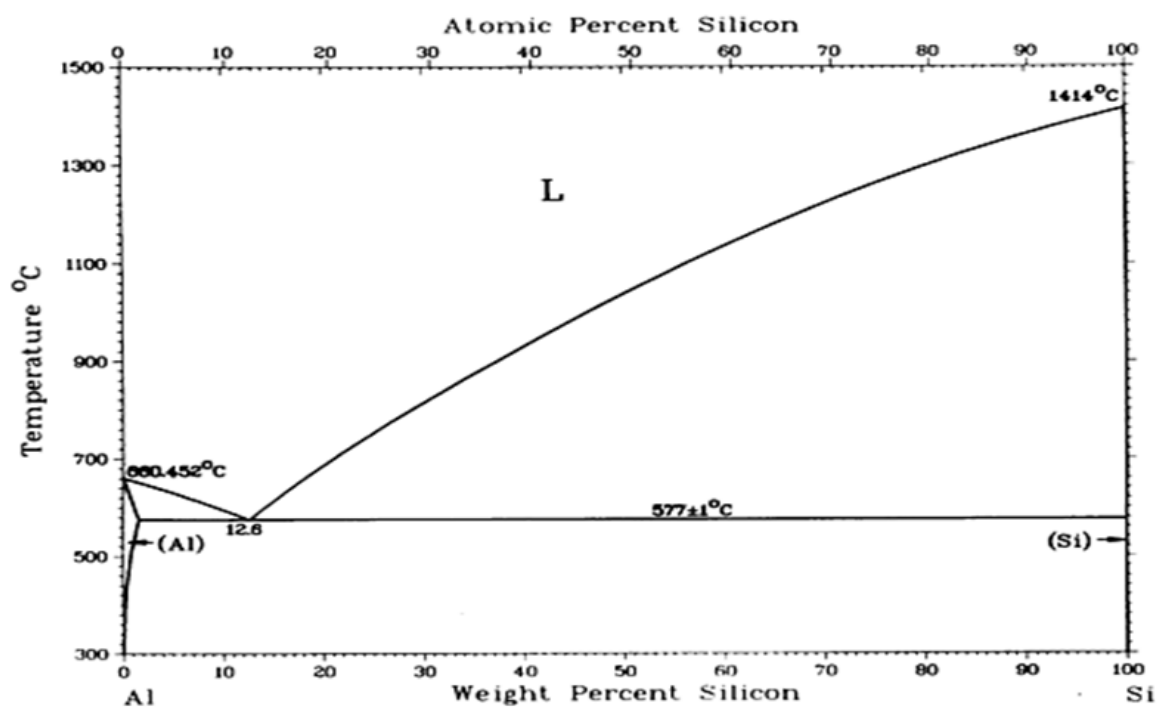
No acréscimo do aumento da demanda por produtos de maior qualidade e durabilidade aos requisitos de redução de consumo de matérias-primas, o Alumínio e suas ligas aparecem como alternativa bastante atrativa. O uso desses materiais, principalmente em substituição ao aço e o ferro fundido, permite a redução do peso do componente, a redução das perdas por corrosão e o aumento potencial da reciclagem. O considerável crescimento do consumo desses materiais ao longo dos últimos anos é um bom indicador dessa tendência. As principais limitações do alumínio referem-se à resistência mecânica e dureza, que são relativamente baixas, mas que podem ser melhoradas pela adição de elementos de liga e por meio de tratamentos térmicos específicos. Assim, justifica-se o crescimento do emprego das ligas de alumínio em um grande número de aplicações, inclusive naquelas sujeitas a severas solicitações mecânicas.

A amplitude da utilização das ligas de alumínio - silício ocorre por conta de certas vantagens claramente evidenciadas como baixo peso dos componentes produzidos, maior resistência a vibrações, estabilidade da resistência mecânica em baixas temperaturas, boa ductilidade, baixa formação de trincas a quente, alta resistência a fadiga, entre outras. Essas ligas possuem particularidades físicas que proporcionam essas características e as tornam aplicáveis a produtos fundidos e acabados.

A adição do Silício em ligas de alumínio é o principal fator na melhoria das propriedades do sistema, uma vez que o silício proporciona a diminuição da contração na solidificação (rechupe), aumenta a fluidez na fundição, melhora a soldabilidade e a resistência mecânica.

A figura 1 mostra o diagrama de fases Alumínio-Silício que possui o eutético na concentração 12,6% de teor de Silício.

Figura 1 - Diagrama de Equilíbrio Al-Si.



Fonte: [3]

2.1.3- Ligas Alumínio-Silício-Magnésio

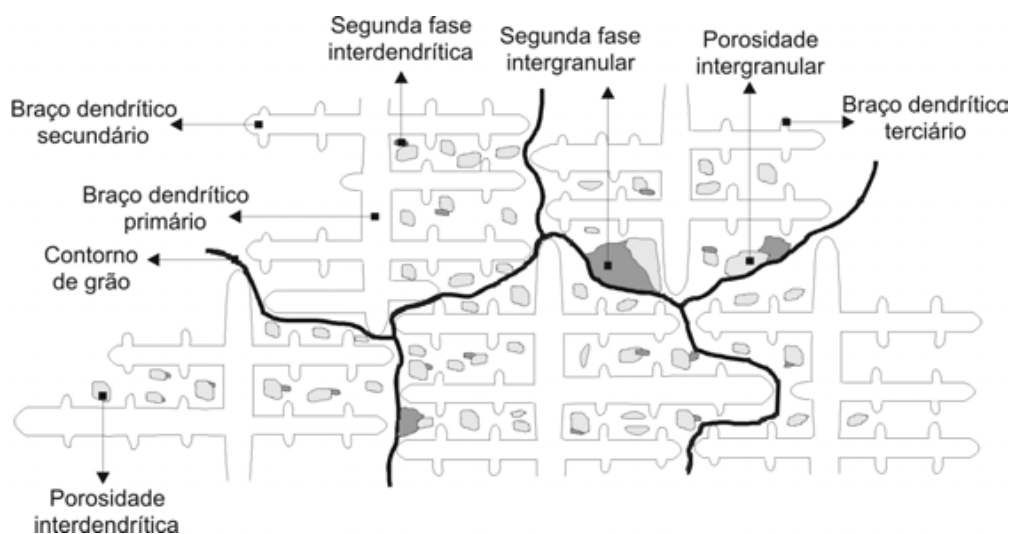
O magnésio, ao ser adicionado às ligas Al-Si, torna as ligas desse novo sistema termicamente tratáveis, devido à formação da fase Mg_2Si , que é a responsável pelo endurecimento das ligas Al-Mg-Si (série 6XXX). Entretanto, no caso das ligas Al-Si o teor de magnésio não poder ser muito elevado a ponto de dificultar a fundição, devido à formação da borra (oxidação excessiva do banho). Por outro lado, o magnésio melhora a resistência à corrosão e a usinabilidade. ^[4]

2.2- MICROESTRUTURA DE SOLIDIFICAÇÃO

A estrutura que se forma imediatamente após a solidificação determina as propriedades do produto final, não somente no caso de peças de fundição que já apresentam essencialmente a forma definitiva, mas também para aqueles produtos que serão trabalhados para a produção de chapas, fios e forjados. Embora se acredite que eventuais defeitos da estrutura bruta de solidificação sejam eliminados durante a etapa de conformação plástica de lingotes não ocorre exatamente isso na prática. Mesmo que determinados defeitos desapareçam macroscopicamente com o processo de deformação, geralmente a maioria deles é conduzida até o produto acabado. As características mecânicas dependem da macroestrutura e microestrutura resultantes^[5].

A microestrutura obtida durante o processo de solidificação é caracterizada pela formação de um arranjo policristalino de grãos, que por sua vez são formados por ramificações dendríticas em variadas orientações. Entretanto, as condições de solidificação são determinantes para a formação da microestrutura predominante, assim, fatores como composição química, superaquecimento, taxa de transferência de calor metal/molde podem ser determinantes em variações na microestrutura do material, além de rejeições de soluto, aprisionamento de gases durante o processo podem ocasionar ainda a formação de inclusões, precipitados e poros exemplificados na figura a seguir:

Figura 2 - Esquema de ramificações dendríticas caracterizadas por espaçamentos interdendríticos primários (λ_1) secundários (λ_2) e terciários (λ_3).



Fonte: [2]

Normalmente, a solidificação de metais sem um determinado controle produz macroestruturas e microestruturas desordenadas, assim, existe uma alta complexidade para o estudo de todos os parâmetros relacionados ao processo, uma vez que os mesmos não podem ser verificados isoladamente. Para este fato, a solidificação unidirecional torna-se uma excelente alternativa para a investigação dos parâmetros térmicos correlacionados as macroestrutura e microestrutura predominantes, assim, a anisotropia da liga formada permite o estudo da formação estrutural aliada ao cálculo da transferência de calor metal/molde, taxa de resfriamento, entre outros fatores que contribuem na formação estrutural da liga e conseqüentemente dispõem as características físicas e mecânicas do material. No aspecto experimental, a técnica de solidificação unidirecional tem sido bastante utilizada em estudos de caracterização de aspectos da macroestrutura, da microestrutura e de análise da segregação de soluto. [5]

2.3- TÉCNICA DA SOLIDIFICAÇÃO UNIDIRECIONAL

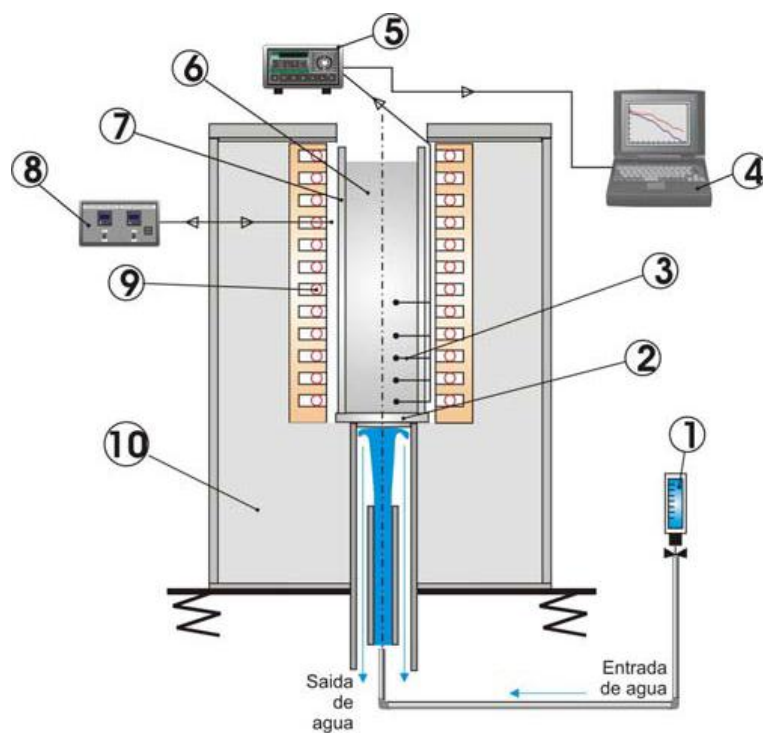
As ligas solidificadas unidirecionalmente são obtidas através da utilização de um dispositivo que aquece o material até a fusão, posteriormente, inicia-se a extração de calor através do acionamento da água que atinge a parte inferior da

lingoteira (molde), para que a solidificação aconteça preferencialmente em apenas uma direção, assim, a solidificação se processa na forma vertical de baixo para cima. Uma série de termopares inseridos dentro do metal em diferentes posições a partir da base permite o registro da evolução térmica durante todo o processo. Estes dados armazenados na memória de um computador são utilizados posteriormente para o levantamento das variáveis térmicas da solidificação como: coeficiente transitório de transferência de calor entre o metal e a água de refrigeração, velocidades das isothermas características (temperatura de fusão se metal puro, ou temperaturas *solidus* e *liquidus* se for o caso de uma liga), gradientes térmicos e taxas de resfriamento. [5]

O dispositivo permite ainda que sejam programados experimentos para analisar a influência do superaquecimento no metal líquido e para investigar o papel da resistência térmica de contato metal/molde na estrutura de solidificação. Após o término da solidificação, os lingotes são seccionados longitudinalmente ao meio, sendo uma metade utilizada na análise da macroestrutura e outra no mapeamento da microestrutura [5].

O dispositivo de solidificação unidirecional ascendente caracteriza-se de acordo com a figura esquemática abaixo:

Figura 3 - Dispositivo de solidificação vertical ascendente: 1) Rotômetro; 2) Chapa molde; 3) Termopares; 4) Computador; 5) Registrador de temperatura; 6) Lingote; 7) Lingoteira; 8) Controle de temperatura; 9) Resistências elétricas; 10) Paredes de isolamento.

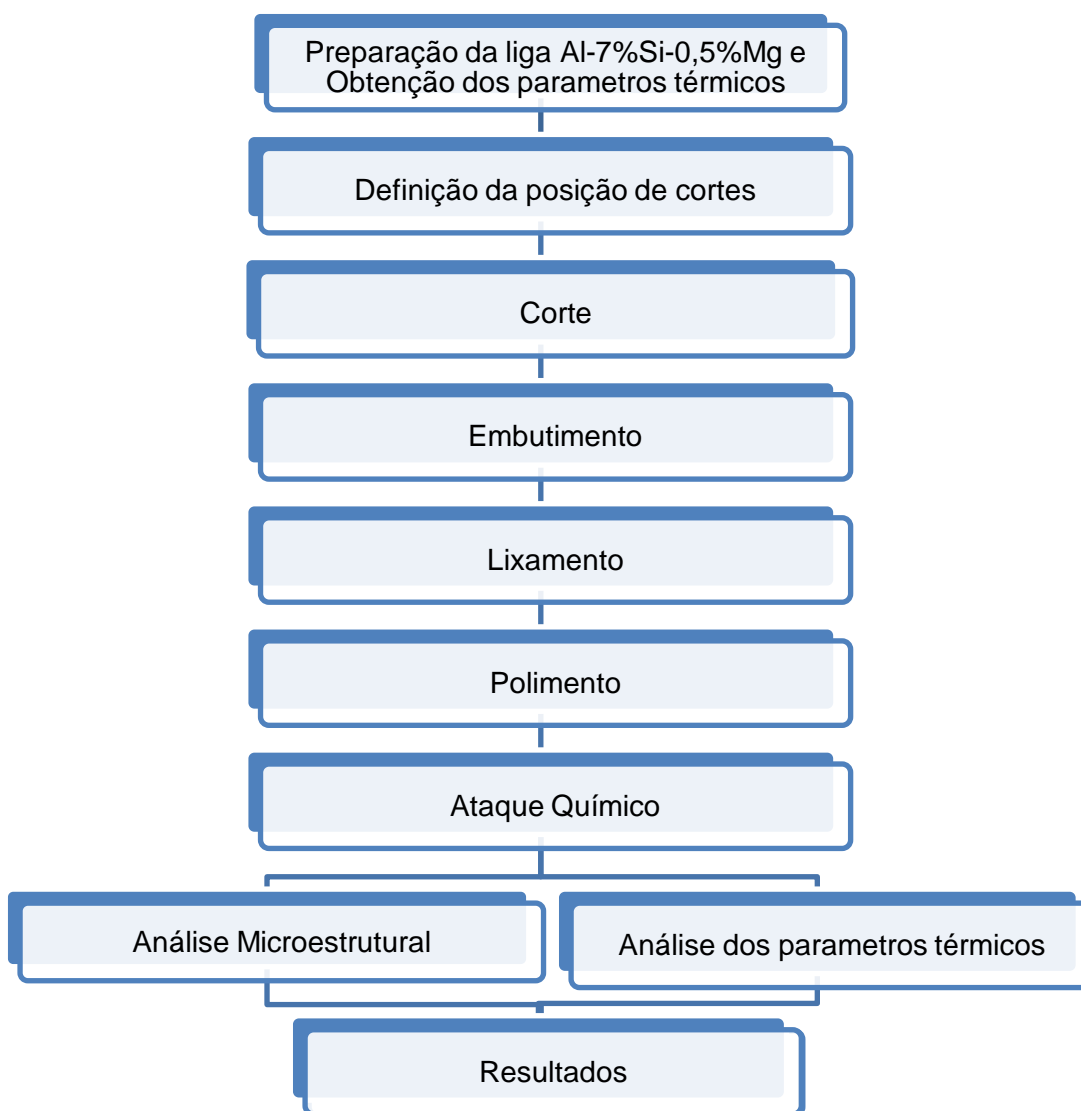


Fonte: [5]

3- MATERIAIS E MÉTODOS

A liga do presente trabalho foi obtida no Laboratório de Solidificação da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) juntamente com as suas curvas de resfriamento, gradientes térmicos, isoterma *Liquiduse* e taxas de resfriamento na interface metal/molde. Posteriormente, os lingotes passaram por cortes e embutimentos para a preparação de amostras para a obtenção das microestruturas de acordo com o fluxograma abaixo:

Figura 4 - Fluxograma representativo do procedimento experimental



Fonte: Autor

3.1- MATERIAIS UTILIZADOS NO PROCESSO EXPERIMENTAL

3.1.1- Equipamentos utilizados na fundição da liga

O processo de obtenção do lingote se deu primeiramente com a pesagem e o balanço de massa dos componentes da liga, que posteriormente foram fundidos em um Cadinho de Carbetto de Silício em um forno de Fundição tipo Mufla, mostrados na figura abaixo:

Figura 5 - (a) Cadinho de Carbetto de Silício; (b) Forno de Fundição tipo Mufla; (c) Balança Analítica Digital.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor

- **Cadinho de Carbetto de Silício:** Modelo AS 6 da Carbosil, revestido internamente com alumina em solução, para evitar contaminação do banho de metal líquido;
- **Forno Tipo Mufla:** Marca Elektro ThermLinn, temperatura máxima 1300 °C, com interior revestido de placas refratárias e controle processado de temperatura;
- **Balança Analítica Digital:** Marca Marte com precisão de três dígitos.

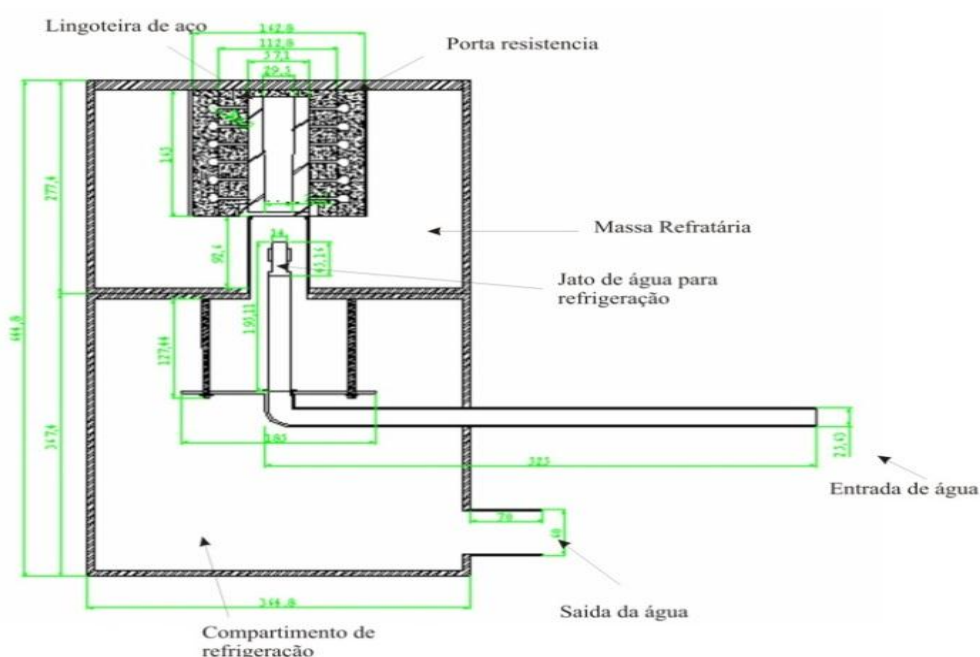
3.1.2- Forno de Solidificação Unidirecional Ascendente

A liga fundida é vazada na lingoteira do forno de solidificação unidirecional ascendente. O forno é aquecido para que a liga atinja novamente o ponto de fusão e a taxa de superaquecimento, e a partir deste ponto a entrada de água é liberada para que ocorra a extração de calor para a realização da solidificação controlada.

O forno é constituído de uma célula refratária com resistências elétricas de Cr-Ni que são responsáveis pelo reaquecimento da liga. Possui uma lingoteira de aço 1020 que funciona de molde para lingote e possui contato direto com o mesmo objetivando a extração de calor. A parte exterior da célula possui uma camada de imento refratário que tem a função de manter o sistema mais isolado possível para que haja o mínimo de dissipação de calor.

Na parte inferior do forno existe um dispositivo que libera o jato de água que entra em contato direto com a base da lingoteira para que aconteça a extração preferencial de calor. Existe ainda nesta parte do forno um reservatório que recebe a água que entrou em contato com a base da lingoteira como na figura 6:

Figura 6 - Componentes do Forno de Solidificação Unidirecional Ascendente

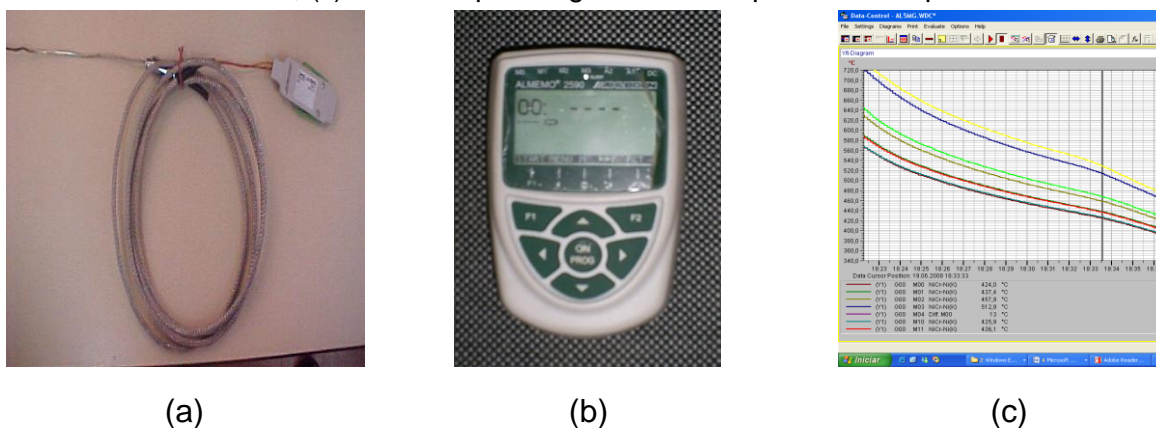


Fonte: [6]

3.1.3- Equipamentos para o controle da temperatura e a obtenção dos parâmetros térmicos.

O processo é monitorado através do posicionamento de termopares em contato direto com a liga fundida. Os termopares foram posicionados nas em 3, 7, 11, 20, 50, 65 e 87 milímetros e conectados a um sistema de aquisição de dados (da marca ALEMO 2590). As curvas de resfriamento da liga foram obtidas com o auxílio do software AMR Data-Control; Essas curvas são comparadas com as curvas referentes a composição da liga obtidas pelo método analítico. Esses equipamentos estão dispostos na figura abaixo:

Figura 7 - (a) Termopar acoplado com plug conector; (b) Registrador, Sistema de aquisição de dados; (c) Software para registro das temperaturas do processo.



Fonte: Autor

3.1.4- Utensílios Operacionais

- **Haste de aço SAE 1045**, revestida com suspensão à base de alumina para homogeneização do banho por agitação.
- **Garra metálica**, utilizada para introduzir e/ou retirar os cadinhos de dentro do forno durante as operações de vazamento do banho de metal líquido no molde.
- **Lingoteira de Aço Inox** com diâmetro interno de 50 mm, altura de 110 mm e espessura de parede de 5 mm e uma chapa de fundo de aço 1020 e aço inoxidável 316 com espessura de 3 mm, Figura 8.

Figura 8 - Lingoteira em aço inoxidável e a chapa molde, em aço carbono e aço inox, utilizadas na solidificação ascendente e obtenção do lingote resultantes.



Fonte: Autor

- **Chapa Molde de Aço 1020:** chapa para a parte inferior da lingoteira e que separa o metal do fluido de refrigeração, com 50 mm de diâmetro interno e 3 mm de espessura.
- **Chapa Molde de Aço Inoxidável:** chapa para a parte inferior da lingoteira e que separa o metal do fluido de refrigeração, com 50 mm de diâmetro interno e 3 mm de espessura.

3.2- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DE CONFECÇÃO DA LIGA

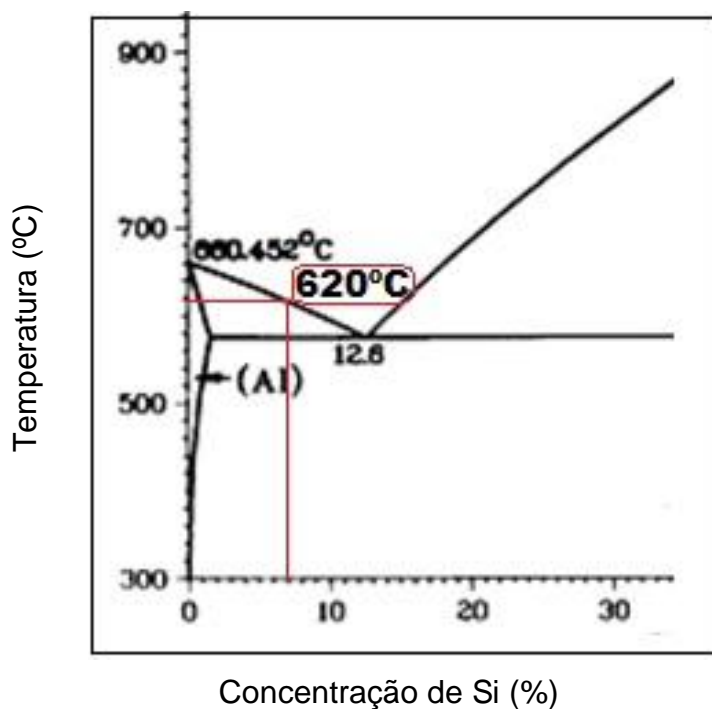
3.2.1 Fusão e obtenção da liga solidificada unidirecionalmente.

Os componentes da liga são devidamente pesados após o balanço de massa, depois são colocados no cadinho que deve ser revestido de Alumina pastosa que tem o objetivo de proteger o banho de contaminação química. Em seguida, o cadinho é levado ao forno Mufla para que ocorra a fusão total dos componentes.

Em seguida a liga fundida é retirada do forno Mufla com a garra de aço e agitada com a haste também banhada com Alumina pastosa; Este procedimento tem o objetivo de levantar possíveis “borras” produzidas dentro da liga durante o processo de fusão. Posteriormente, quando o banho atingiu a temperatura de 650° C, foi retirado do forno e vazado na lingoteira do forno de solidificação unidirecional.

A próxima etapa é refundir a liga e atingir a sua temperatura de superaquecimento. Como a porcentagem de Mg é desprezível para alterações no ponto de fusão da liga, considera-se que a mesma respeita as características do diagrama Al-Si. Assim, a liga funde a 620°C de acordo com figura 4.6, contudo, é necessário uma maior temperatura para se obter o superaquecimento da liga, que para o experimento foi de 10%, logo o banho atingiu 682°C para que se iniciasse a solidificação unidirecional.

Figura 9 - Temperatura de formação da primeira fase líquida para a concentração de 7% de Silício



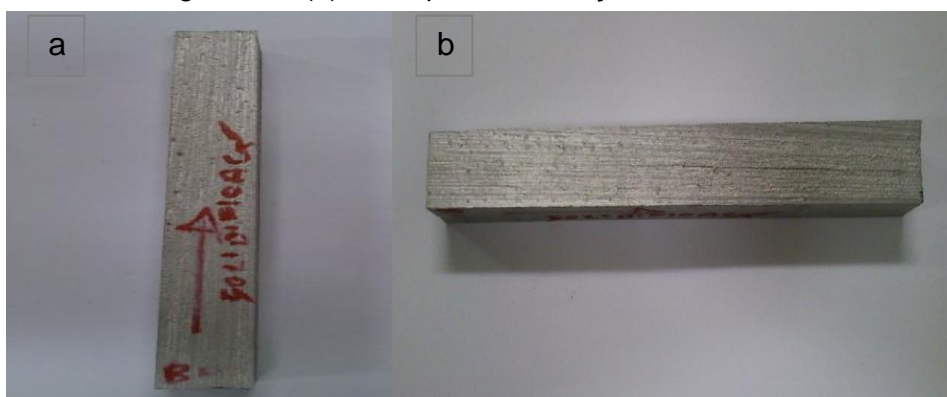
Fonte: Autor

Com o superaquecimento atingido, inicia-se então a extração de calor pela parte inferior da lingoteira com o acionamento do jato de água. Assim, o lingote solidifica trocando calor preferencialmente pela parte inferior da lingoteira.

3.2.2. Corte do lingote e preparação das amostras

Após a solidificação, o lingote é desmoldado e cortado para a preparação da amostras. Para a avaliação das microestruturas o lingote foi seccionado longitudinalmente dividindo o lingote em duas partes. A primeira parte é avaliada em sentido longitudinal e na outra as microestruturas são avaliadas em cortes transversais de acordo com a figura 10:

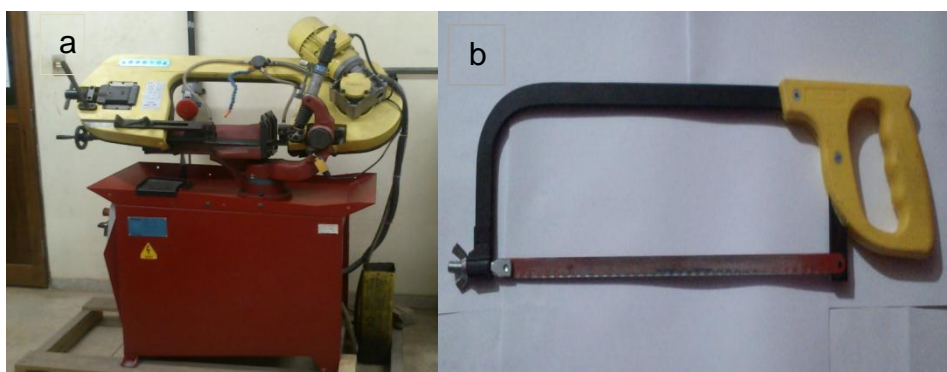
Figura 10 - Lingote seccionado longitudinalmente. (a) Parte para a avaliação microestrutural longitudinal; (b) Parte para a avaliação microestrutural transversal.



Fonte: Autor

O lingote foi seccionado com a máquina de corte e posteriormente dividido em partes menores com o auxílio de um arco de serra de acordo com a figura 11:

Figura 11-Instrumentos de corte. (a) Máquina de corte “Serra fita”; (b) Arco de Serra.

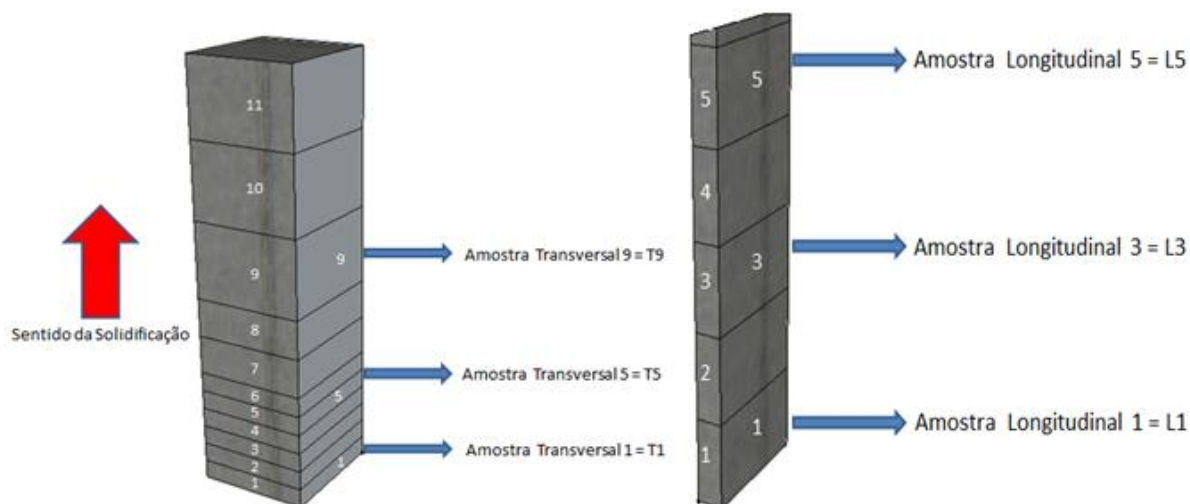


Fonte: Autor.

Para correlacionar a microestrutura de solidificação com os parâmetros térmicos, faz-se necessário preparar as amostras de modo que a microestrutura

seja identificada em pontos próximos ao posicionamento dos termopares durante a solidificação, assim, os pontos de cortes longitudinais e transversais foram definidos de acordo com a figura 12:

Figura 12 - Seções de corte para obtenção das amostras. (a) cortes transversais; (b) cortes longitudinais.



Fonte: Autor.

Convencionalmente, as amostras dos cortes transversais foram denominadas T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10 e T11, sendo que esta denominação corresponde as alturas 5mm, 10mm, 15mm, 20mm, 25mm, 30mm, 40mm, 50mm, 70mm, 90mm e 110mm respectivamente, sendo que as peças longitudinais atendem ao mesmo procedimento.

Com as alturas de corte estabelecidas, as peças foram cortadas com o arco de serra e embutidas em resina manualmente com o auxílio de tubos de PVC com o objetivo de simplificar a caracterização das peças.

Figura 13 - Instrumentos de embutimento. (a) tubo de PVC; (b) Resina para embutimento; (c) Peças embutidas.



Fonte: Autor

3.2.3. Caracterização das Amostras e obtenção das imagens

A última etapa do processo de caracterização consiste em tornar a peça suscetível a revelar sua estrutura de solidificação no microscópio. Para isso, as peças foram lixadas com lixas 100, 200, 300, 400, 500, 600, e 1100 MESH na lixadeira da marca SOLOTEST mostrada na figura 14.

Figura 14 - Lixadeira com lubrificação a água.



Fonte: Autor

Em seguida as peças foram polidas com pasta de diamante de 3 e 1 micrometro na politriz mostrada na figura 15, por 5 minutos cada. Finalmente, as peças foram expostas ao ataque químico do reagente HF a 10% diluído em água. O

ataque foi realizado em cada peça por 10 segundos para que as mesmas tivessem a microestrutura revelada.

Figura 15 - Lixadeira Politriz



Fonte: Autor

Após o ataque químico, as peças foram submetidas à análise no Microscópio Óptico mostrado na Figura 16, para a obtenção das imagens das microestruturas reveladas. O microscópio utilizado foi da marca OLYMPUS BX 51 com interface com um computador, utilizando uma placa de vídeo do tipo WIA/S3G. Em seguida as imagens foram capturadas e analisadas através do Software Motic Plus.

Figura 16 - Microscópio com interface digital



Fonte: Autor

4- RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A confecção da liga Al-7%Si-0,5%Mg com 10% de superaquecimento permitiu a obtenção de perfis térmicos relacionados a transferência de calor metal/molde que serão correlacionados com as microestruturas obtidas nas caracterizações das amostras levando em conta a direção preferencial de crescimento de grão de acordo com o planejamento da figura 4 e evidenciados neste capítulo.

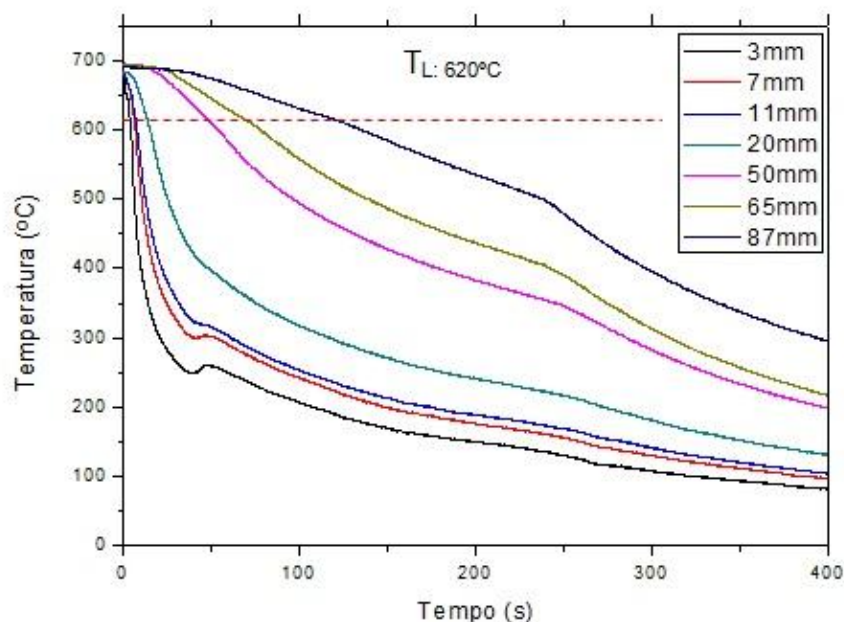
4.2- PARAMETROS TÉRMICOS

4.2.1- Curvas de resfriamento

Para o estudo da liga foram posicionados 7 termopares nas alturas 3, 7, 11, 20, 50, 65 e 87mm para a obtenção das curvas de resfriamento a partir da interface metal molde. Estas curvas são fundamentais para a obtenção dos parâmetros térmicos seguintes descritos posteriormente.

A curva abaixo mostra o comportamento térmico de toda a geometria das peças através dos termopares, que foram posicionados de forma a evidenciar o início da solidificação na parte de baixo através da extração de calor e o prolongamento do fenômeno no decorrer da peça.

Figura 17 - Curva de resfriamento da liga Al-7%Si-0,5%Mg



Fonte: Autor

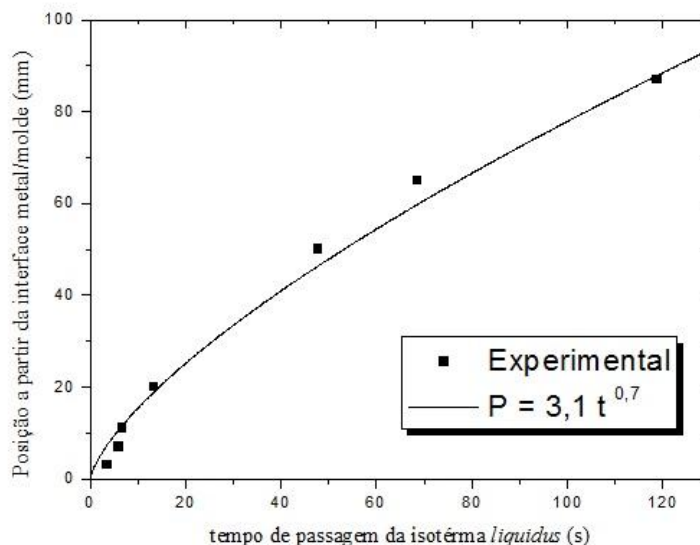
Considerando a liga como um sistema binário, avalia-se que a liga possui como (T_L) *Temperatura Liquidus* a 620°C , contudo de acordo com a maioria das situações práticas de solidificação, para que o líquido possa tomar completamente a forma geométrica que se pretende dar ao sólido é necessário que o vazamento desse líquido ocorra a uma temperatura superior àquela que dá início a transformação líquido/sólido, para que o líquido possa escoar e preencher completamente os contornos geométricos da peça. A diferença entre essa temperatura de vazamento e temperatura de transformação denomina-se *superaquecimento*^[2]. Para a liga estudada o *superaquecimento* empregado de 10% obedecendo a variação (ΔT_V) utilizando 10% da T_L ($0,1 * 620^\circ\text{C} = 62^\circ\text{C}$), portanto $T_V = 682^\circ\text{C}$.

É possível notar que a solidificação é mais rápida e intensa nas proximidades da base do lingote, ou seja, mais próximo da extração de calor. Com a obtenção das curvas de resfriamento foi possível ainda obter os seguintes parâmetros: velocidade de deslocamento da frente de solidificação em função da posição e taxa de resfriamento em função da posição.

4.2.2- Curva da Posição X tempo

O parâmetro a seguir (figura 18) relaciona o tempo de passagem da isoterma *Liquidus* por cada termopar, e confronta com o resultado analítico pré estabelecido pelo software de recolhimento de dados Data Control.

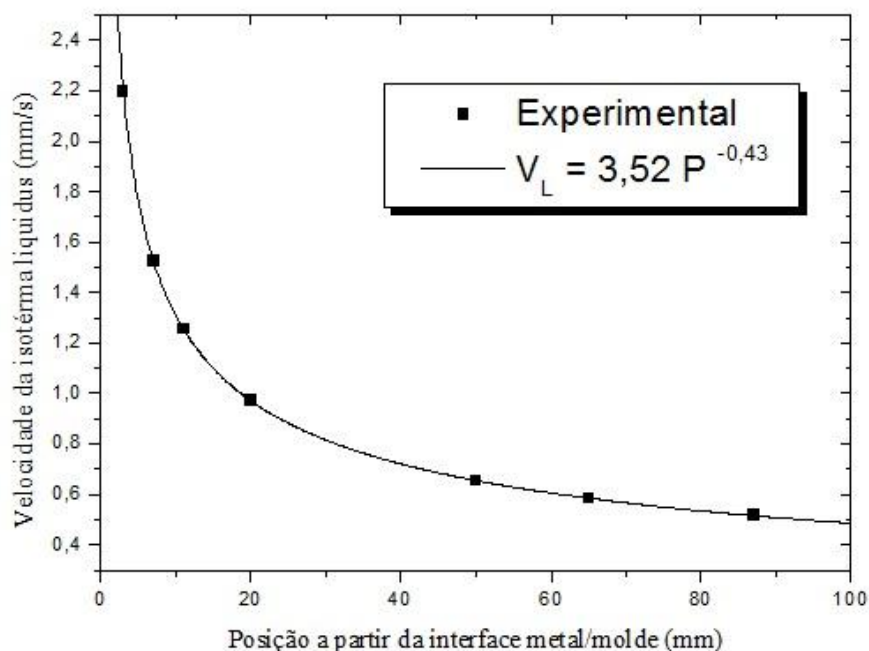
Figura 18 - Curva da Isoterma Liquidus, Posição x tempo.



Fonte: Autor

As figuras 18 e 19 mostram a passagem da Isoterma *Liquidus* pelos termopares com o tempo e a velocidade que a mesma leva para atingi-los. O resultado da liga estudada mostra-se bastante satisfatório já que as curvas experimentais aproximaram-se bastante da curva analítica, mostrando um bom desempenho na confecção da liga. A pequena diferença entre as curvas pode ser justificada pelo aumento gradual da resistência térmica dentro da peça, por conta da dificuldade de transferência de calor entre a parte solidificada e a parte líquida, além do bloqueio criado pelo “gap” de ar criado entre a peça o molde por conta da contração do lingote na solidificação. Esses fatores também são decisivos na acentuação da curva da isoterma na figura 19.

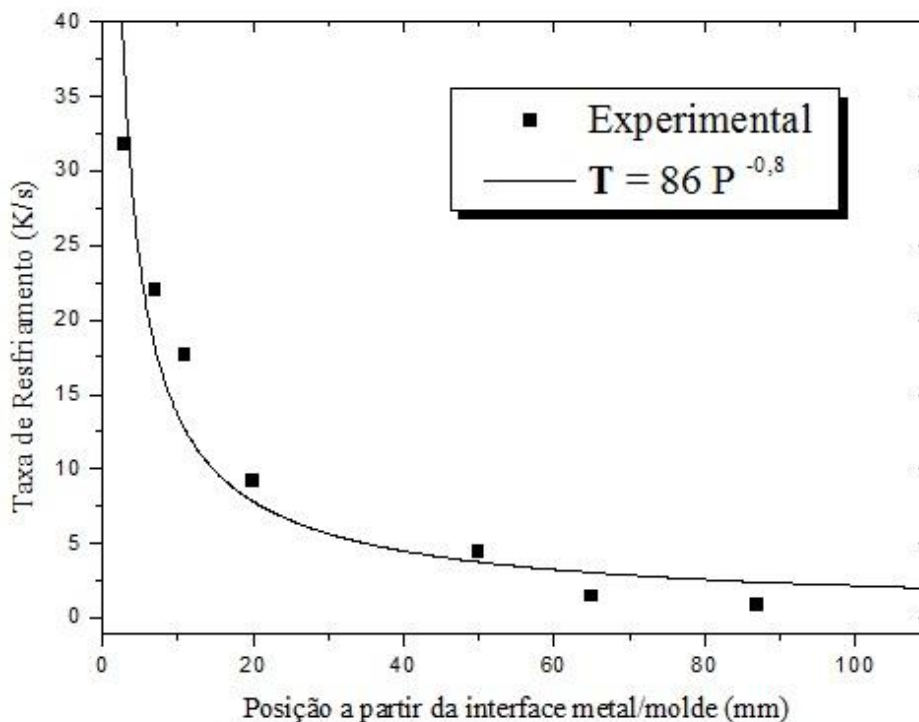
Figura 19 - Velocidade de passagem da Isoterma Liquidus pelos termopares



Fonte: Autor

A figura 20 mostra a consolidação das curvas experimentais que representam a taxa de resfriamento em função da posição para as ligas Al-Si solidificadas para cada condição de extração de calor já apresentadas, e superaquecimento de 62 °C. A taxa de resfriamento para cada posição da isoterma *liquidus* é obtida experimentalmente fazendo a diferença das temperaturas registradas pelo termopar um segundo antes e um segundo depois, dividido pelo intervalo de tempo considerado (dois segundos)^[7]. Pode-se observar que a taxa de resfriamento é inicialmente muito alta, devido à rápida extração de calor pelo molde refrigerado, decrescendo para as posições mais afastadas da base refrigerada, ou seja, da base extratora de calor, devido ao aumento da resistência ao fluxo de calor na interface metal/molde e na camada solidificada crescente, sendo que a partir da 5ª posição de avaliação a taxa de transferência de calor é de caráter isotérmico.

Figura 20-Taxa de resfriamento X posição



Fonte: Autor

4.3- ESTRUTURAS DE SOLIDIFICAÇÃO

Os tipos de microestruturas presentes em uma liga estão fortemente relacionados com a forma da interface entre o sólido e o líquido (S/L) durante o processo de solidificação^[2]. Sendo que os parâmetros térmicos atuam diretamente na construção granulométrica da liga, que aliados a composição química podem gerar, tanto estruturas planas em metais puros, quanto estruturas celulares e dendríticas em sistemas binários e terciários.

A liga em estudo apresentou em sua seção longitudinal (figura 19) uma microestrutura típica do sistema Al-Si com concentração próxima ao eutético. Com uma formação bastante regular de espaçamentos dendríticos secundários (λ_2).

Um resfriamento rápido geralmente refina a microestrutura e aumenta a solubilidade dos elementos de liga em solução sólida (solubilidade de Si na matriz de Al- α). As diferenças de raios atômicos entre elementos de liga promovem um campo de tensões e as discordâncias, melhorando assim, as propriedades mecânicas da liga^[8]. De fato, a liga mostrou-se bem solubilizada e a taxa de resfriamento foi bastante favorável para o refinamento da estrutura e a formação dos espaçamentos dendríticos secundários.

4.4- CORRELAÇÃO ENTRE PARAMETROS TÉRMICOS E MICROESTRUTURA

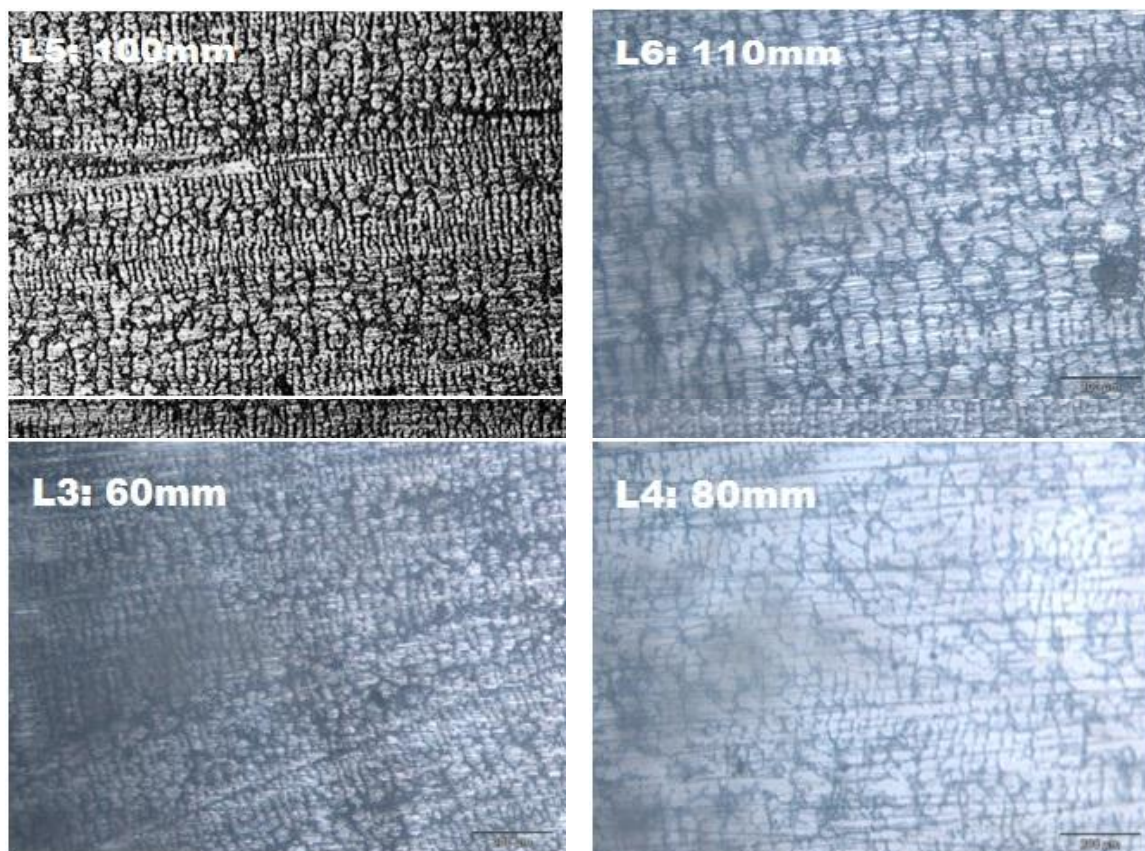
As figuras 21, 22 e 23 mostram as imagens das posições longitudinais e transversais. Nota-se em toda a geometria da peça, a presença de espaçamentos dendríticos secundários finamente dispersos que com um aumento relativo no tamanho dos espaçamentos com o aumento da altura avaliada.

A formação dendrítica da peça tem impacto direto nas suas propriedades mecânicas, logo, é de fundamental importância o controle dos parâmetros térmicos para a obtenção da liga, já que esses parâmetros controlam a formação microestrutural no processo.

As figuras 22 e 23 mostram a microestrutura da liga na posição transversal. Nesta posição é possível verificar a presença da formação de espaçamentos dendríticos secundários em formato de cruz. A curva de resfriamento (figura 15) mostra um deslocamento mais acentuado nas proximidades da extração de calor que ocasiona uma formação mais desordenada da estrutura com grãos menores e contornos menos nítidos.

As posições superiores sofrem menos influência da transferência de calor por conta da parte já solidificada da peça e com isso, proporciona a formação de grãos maiores e mais ordenados, além de uma menor presença de inclusões e porosidades.

Figura 21 - Formação de (λ_2) em toda a geometria da peça. Posições Longitudinais



Fonte: Autor

Figura 22-Formação de (λ_2) em toda a geometria da peça. Posições Transversais.

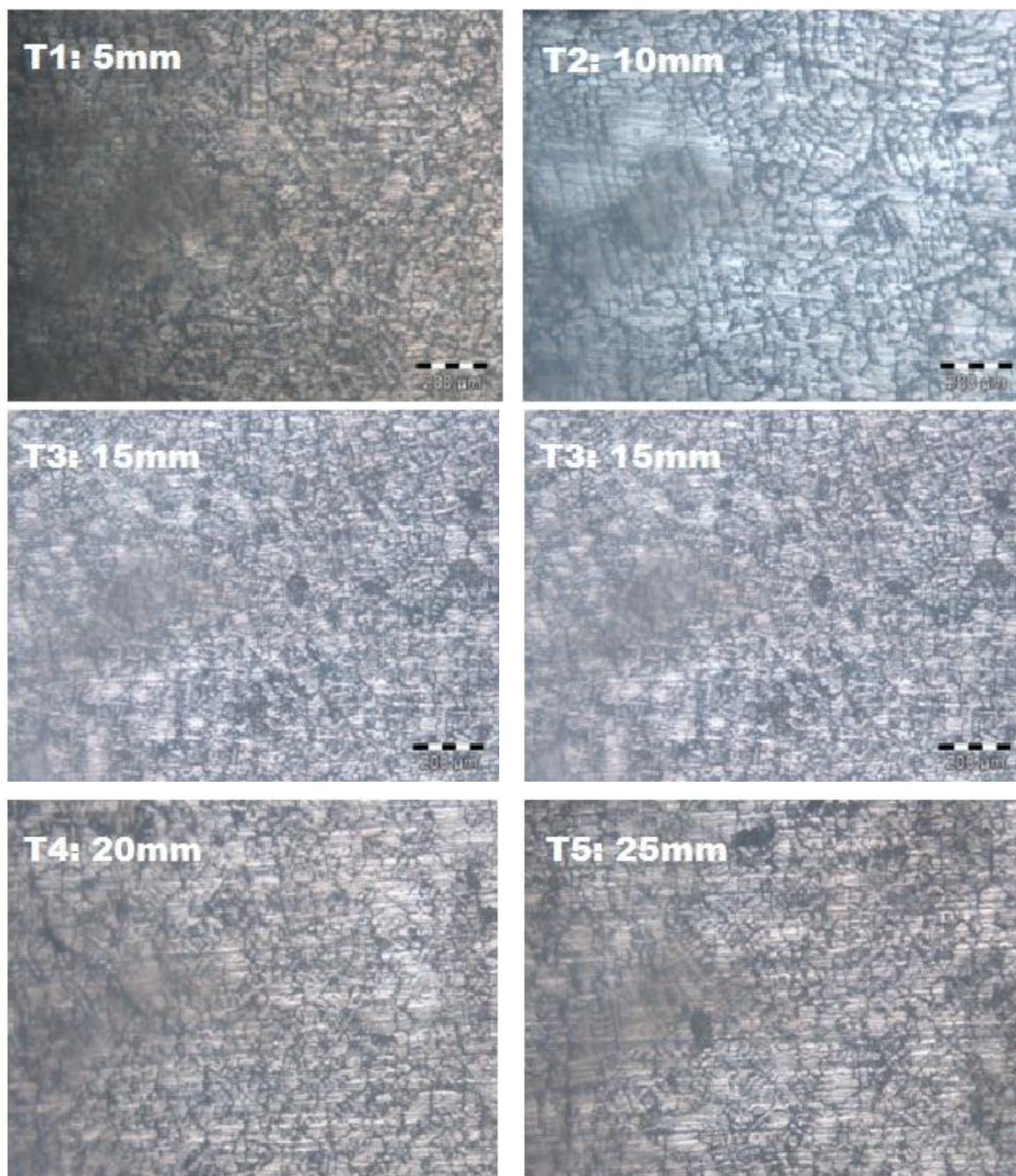
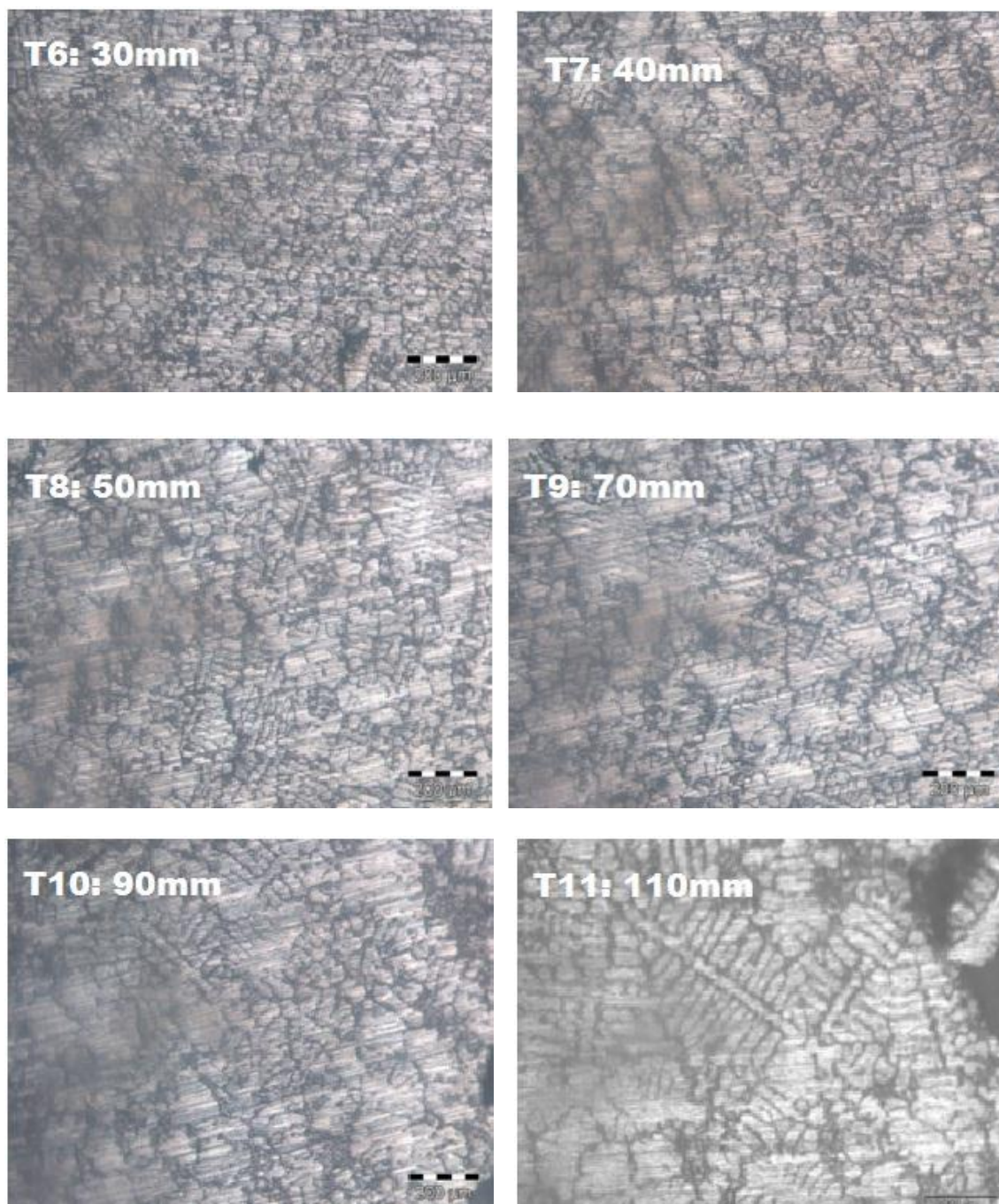


Figura 23 - Formação de (λ_2) em toda a geometria da peça. Posições Transversais.



Fonte: Autor

5- CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1- CONCLUSÕES

No presente trabalho foram construídas análises teóricas referentes ao processo de confecção da liga Al-7%Si-0,5%Mg, solidificada unidirecionalmente com regimes transitórios de calor. Com os dados experimentais obtidos pode-se concluir que:

- Com todos os parâmetros térmicos foi possível analisar que a liga possui boa resposta a solidificação unidirecional e que, a curva de resfriamento experimental aproximou-se bastante da curva analítica já conhecida;
- O modelo numérico analítico de solidificação obtido em estudos anteriores para determinação de variáveis térmicas de relevância do processo é validado no confronto teórico/experimental no que diz respeito à evolução da isoterma *liquidus* e das taxas de resfriamento para todas as condições experimentais examinadas, observando-se sempre uma boa concordância.
- Os espaçamentos dendríticos secundários diminuem a medida em que a velocidade de deslocamento da isoterma *Liquidus* aumenta.
- Nota-se que a formação de (λ_2) tem dependência direta com a curva de resfriamento, e que, para resfriamentos mais rápidos, formam-se dendritas secundárias com menor espaçamento e menos ordenadas, que aumentam de tamanho com a influência da transferência de calor da parte solidificada para a parte pastosa, criando grãos mais ordenados e de maior tamanho.
- A taxa de superaquecimento melhora a difusividade da liga, contudo, a torna suscetível a formação de grãos menores e desordenados, influenciados ainda, pela formação de inclusões e poros, que são raízes de formação de novos grãos.

5.2- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Avaliando os resultados do presente trabalho, são sugeridas as seguintes linhas de pesquisa:

1. Avaliar a formação macroestrutural bem como a presença da TCE (transição colunar/equiaxial) e a influência das taxas de superaquecimento para a sua formação;
2. Correlacionar a presença dos EDS (espaçamentos dendríticos secundários) com a resistência mecânica através de ensaios destrutivos;
3. Quantificar a resistência mecânica através de comparação de ensaios destrutivos em diferentes pontos da geometria da peça, relacionando com as variações nas medidas de λ_2 .

REFERÊNCIAS

- [1] GOULART, Pedro Roberto. **Variáveis térmicas de solidificação, microestrutura e propriedades mecânicas de ligas hipoeutéticas Al-Si**. Dissertação de Mestrado. UNICAMP-FEM-DEMA. Campinas, SP. 2005.
- [2] GARCIA, Amauri. **Solidificação: fundamentos e aplicações**. Editora da Unicamp, Campinas, SP. 2001.
- [3] KANICKI, D. P., **Castings Advantages, Applications, and Market Size**, IN.: American Society for Metals: ASM Handbook, vol 15, "Casting", 9a edition, p. 37-45, 1988.
- [4] GLAZOFF, Michael, et. al. **Casting Aluminium Alloys**. Editora Elsevier. Oxford, UK. 2007.
- [5] GARCIA, Amauri. **Influência das variáveis térmicas de solidificação na formação de macroestrutura e da microestrutura e correlação com propriedades recorrentes**. Editora da Unicamp, Campinas, SP - 2005.
- [6] BRITO, C.C; RODRIGUES, F.S; COSTA, A.L; SIQUEIRA, C.A. **Efeito das variáveis térmicas de solidificação na liga aa3003 solidificada unidirecionalmente**. In: 65º Congresso Anual da ABM, 2010, Rio de Janeiro. 65º Congresso Anual da ABM, 2010. p. 465-474.
- [7] PERES, Manoel Diniz. **Desenvolvimento da Macroestrutura e da Microestrutura na Solidificação Unidirecional Transitória de Ligas Al-Si**. Tese de Doutorado. UNICAMP-FEM-DEMA. Campinas, SP. 2005.
- [8] ZHANG, L. Y., **Effect of cooling rate on solidified microstructure and mechanical properties of aluminium-A356 alloy**, journal of Materials Processing technology, p. 1-5, 2008.
- [9] OHNO, Atsumi. **The Solidification of Metals**, ChijinShokan, Co. Ltd., Japan, 1976.
- [10] GARCIA, A.; PRATES, M. **Mathematical model for the unidirectional solidification of metals I: Cooled molds**. Metallurgical Transactions, v. 98, pp. 449-453, 1978.
- [11] ROCHA, Otávio Fernandes Lima. **Análise teórico-experimental da transição celular/dendrítica e da evolução da morfologia dendrítica na solidificação unidirecional em condições de fluxo de calor transitório**. Tese de Doutorado, UNICAMP-FEM-DEMA, Campinas – São Paulo. 2003.

[12] SIQUEIRA, Claudio Alves. **Influência de parâmetros térmicos de solidificação na transição colunar/equiaxial**. Tese de Doutorado, UNICAMP-FEM-DEMA, Campinas – São Paulo. 2002.

[13] CANTÉ, Manuel Venceslau. **Solidificação transitória, microestrutura e propriedades de ligas Al-Ni**. Tese de Doutorado, UNICAMP-FEM-DEMA, Campinas – São Paulo. 2009.