

**UNESP**  
**Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá**

**Guaratinguetá**  
**2011**

**ALEX DARLLAN ALVES DE LIMA**

**ANÁLISE DA CURVA DE RESFRIAMENTO E REFINO DE GRÃO DA  
LIGA DE ALUMÍNIO AA356**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Kiyan

Guaratinguetá  
2011

L732a	Lima, Alex Darllan Alves de Análise da curva de resfriamento e refino de grão da liga de alumínio AA 356 / Alex Darllan Alves de Lima – Guaratinguetá : [s.n], 2011. 62 f : il. Bibliografia: f. 61-62  Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011. Orientador: Prof. Dr. Carlos Kiyam  1. Resfriamento 2. Ligas de alumínio I. Título
	CDU 628.82

ANÁLISE DA CURVA DE RESFRIAMENTO E REFINO DE GRÃO DA LIGA  
DE ALUMÍNIO AA 356

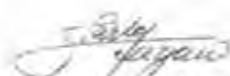
ALEX DARLLAN ALVES DE LIMA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO  
COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO  
DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Samuel Euzédice de Lucena  
Coordenador

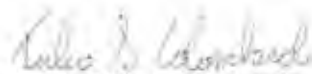
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Carlos Kiyam  
Orientador/UNESP-FEG



Eng.ª Cássia Cavalcanti da Silva  
UNESP-FEG



Eng.º Túlio Stefani Colombaroli  
UNESP-FEG

Dezembro de 2011

de um modo especial aos meus pais *Francisco* e *Edselma*, ao meu irmão *Alysson*, que me apoiaram durante essa longa jornada. A minha namorada *Amanda*, que sempre esteve no meu lado nos momentos difíceis cuidando do nosso filho maravilhoso *João Rodrigo*.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Carlos Kiyon*, que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível,

à mestranda, *Cássia*, que me ajudou com material, apoio e orientação para a realização deste trabalho,

aos meus pais *Francisco e Edselma*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos,

ao meu irmão *Alysson*, que me apoiou durante todo o tempo em que estive estudando,

à minha tia *Selma* e ao meu tio *Rivonaldo* que sempre me acolheram com alegria, atenção e carinho em suas casas,

ao meu filho *João Rodrigo*, pela sua alegria, sorriso, carinho e amor, que me fez a ter mais força para continuar lutando pelo esse momento tão importante e feliz da minha vida,

às funcionárias da Biblioteca, funcionários e técnicos do Departamento de Materiais e Tecnologia do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

aos meus amigos, moradores e ex-moradores da *República Adegá & Inferninho*, companheiros nas longas jornadas de estudo, ajudando a enfrentar as dificuldades e vivenciando as alegrias durante esta época,

à *Chaelmica*, que acompanhou todas as etapas desta jornada, com alegria e paciência,

e agradeço a todos os colegas e amigos da faculdade, em que tive o prazer de conhecer durante esses período da minha vida que com certeza serão inesquecíveis.

“É muito melhor arriscar coisas grandiosas, alcançar triunfos e glórias, mesmo expondo-se a derrota, do que formar fila com os pobres de espírito que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem nessa penumbra cinzenta que não conhece vitória nem derrota”.

Theodore Roosevelt

Lima, A. D. A. *Análise da Curva de Resfriamento e Refino de Grão da Liga de Alumínio AA 356* 2011. 58 f. Trabalho de graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

## RESUMO

A macroestrutura de uma liga no estado bruto de solidificação é de extrema importância devido a sua influência nas propriedades mecânicas. Uma estrutura apresentando grãos colunares é geralmente indesejável na maioria das aplicações de produtos fundidos e o refino de grão tem como objetivo suprimir a formação destes grãos e obter uma estrutura equiaxial de granulação fina que melhora as condições de alimentação do metal líquido e, as propriedades mecânicas, como limite de escoamento e limite de resistência a tração, bem como a tendência de formação de trincas a quente. O tipo e tamanho de grãos formados são determinados pela composição química, taxa de resfriamento e pelo uso de inoculadores para refino de grão. Titânio e Boro são os principais refinadores na indústria do alumínio e podem ser adicionados ao metal fundido sob a forma de ligas, tais como Al-Ti, Al-Ti-B ou Al-B. No presente trabalho serão abordadas as informações obtidas das curvas de resfriamento e da primeira derivada da curva de resfriamento para a obtenção dos parâmetros térmicos que influenciam o processo de refino de grão da liga AA 356.0.

**PALAVRAS-CHAVE:** Refino de grão; Curva de resfriamento; Liga AA 356.0



Lima, A. D. A. *Análise da Curva de Resfriamento e Refino de Grão da Liga de Alumínio AA 356* 2011. 58 f. Trabalho de graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

## **ABSTRACT**

The macrostructure of an alloy solidification in the raw state is of utmost importance due to its influence on mechanical properties. A structure showing columnar grains is generally undesirable in most applications of cast products and grain refining aims to suppress the formation of these grains and get a fine-grained equiaxed structure that improves the supply of liquid metal and the mechanical properties, as yield strength and tensile strength limit, as well as the tendency of formation of hot cracks. The type and size of grains formed are determined by chemical composition, cooling rate and the use of inoculum for grain refining. Titanium and boron are the major refiners in the aluminum industry and can be added to the molten metal in the form of alloys such as Al-Ti, Al-Ti-B or Al-B. In this paper we will discuss the information obtained from cooling curves and first derivative of the cooling curve to obtain the thermal parameters that influence the process of grain refining alloy AA 356.0.

**KEYWORDS:** Refining of grain; cooling curve; Alloy AA 356.0

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Representação de uma célula eletrolítica na redução da alumina em alumínio primário. ....	16
Figura 2 Fluxograma da obtenção da alumina que será usada no processo Hall-Héroult. ....	16
Figura 3 Ilustração do arranjo dos átomos de liga na rede cristalina. ....	19
Figura 4 Classificação geral das Ligas de Alumínio. ....	21
Figura 5 Diagrama de fases das Ligas de Al-Si. ....	26
Figura 6 Representação das três zonas de solidificação presentes na macroestrutura do metal fundido. ....	29
Figura 7 Zona de crescimento de grãos colunares. ....	30
Figura 8 Serra hidráulica. ....	32
Figura 9 Serra fita utilizado para cortar os pedaços da liga de alumínio AA 356.0. ....	33
Figura 10 Visor do forno de aquecimento programado para derreter a liga AA 356.0. ....	33
Figura 11 Forno utilizado para a fundição das peças no molde metálico e de areia. ....	34
Figura 12 Preparação do molde metálico com fundo de areia de fundição. ....	34
Figura 13 Fundido da liga AA 356.0 sendo envazado no molde metálico. ....	35
Figura 14 Configuração do molde de areia. ....	35
Figura 15 Fundição da liga AA 356.0 no molde de areia. ....	35
Figura 16 Macroestrutura obtida com a amostra de liga de alumínio AA 356.0 fundida em molde metálico. ....	37
Figura 17 Macroestrutura obtida pelo ataque da solução reagente na liga AA 356.0. ....	37
Figura 18 Gráfico de solubilidade do hidrogênio no metal fundido das ligas de alumínio em geral pela temperatura do fundido. ....	38
Figura 19 Esquema de uma unidade de desgaseificação contínua. ....	39
Figura 20 Esquema de um desgaseificador contínuo tipo SNIF (Spinnig nozzle inert flotation). ....	39
Figura 21 Disposição dos termopares no molde de areia para a fundição da liga de Al-Si AA 356.0. ....	42

Figura 22 Disposição dos termopares no molde permanente metálico usado na fundição da liga AA 356.0. ....	42
Figura 23 Curva de resfriamento típica de uma liga de Al-Si.....	43
Figura 24 Curva de resfriamento com sua primeira derivada e o cálculo da curva zero pela análise de Fourier. ....	47
Figura 25 Curva da diferença de temperatura entre o centro e a parede da liga Al-7%Si. ....	48
Figura 26 Montagem do experimento utilizado para o levantamento da curva de resfriamento da liga AA 356.0 no molde metálico. ....	49
Figura 27 Curva de resfriamento da liga AA 356.0 em molde metálico. ....	50
Figura 28 Curva de resfriamento da liga AA 356 em molde de areia.....	51
Figura 29 Esquema da nucleação do alumínio pela reação peritética.....	53
Figura 30 Diagrama de fase peritético do sistema Al-Ti.....	54
Figura 31 Partícula duplex no sistema Al-Ti-B aumentada 1870 vezes. ....	56
Figura 32 Curva de resfriamento para a liga AA 356 com a inoculação do refinador Al-Ti-B em molde de areia. ....	57
Figura 33 Macroestrutura da liga AA 356 com adição do refinador de Al-Ti-B.....	58

## **LISTA DE TABELAS**

TABELA 1- Insumos para a produção de alumínio primário. ....	17
TABELA 2- Comparativo das propriedades do alumínio com o aço e o cobre...	18

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1. Apresentação do alumínio e sua obtenção.....	15
1.2. Algumas características do alumínio .....	17
1.3. Ligas de alumínio.....	18
1.4. Classificação das ligas de alumínio .....	20
1.5. Classificação das ligas trabalhadas .....	21
1.6. Classificação das ligas fundidas .....	22
1.7. Descrição da liga de alumínio AA 356.0.....	25
<b>2. ANÁLISE DA MACROESTRUTURA .....</b>	<b>28</b>
2.1. Teoria da solidificação.....	28
2.2. Formação da macroestrutura.....	28
2.3. Materiais e Métodos .....	30
2.4. Resultados e discussão.....	36
<b>3. CURVAS DE RESFRIAMENTO .....</b>	<b>41</b>
3.1 Estudo e interpretação da curva de resfriamento.....	41
3.2 Curva Zero.....	44
3.3 Determinação da coesão dendrítica.....	48
3.4 Materiais e Métodos .....	49
3.5 Resultados.....	50
<b>4. REFINAMENTO DE GRÃOS.....</b>	<b>52</b>
4.1 Refinadores de grãos .....	52
4.1.1 Teoria do diagrama de fases.....	54
4.1.2 Teoria dos Carbonetos-Boretos .....	54
4.1.3 Teoria do envoltório peritético.....	55
4.1.4 Teoria da nucleação dúplex.....	55
4.2 Resultados.....	56
4.2.1 Análise da curva de resfriamento .....	56
4.2.2 Análise da macroestrutura.....	57
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>59</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>61</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A liga de Al-7%Si (AA 356.0) tem grande aplicação na engenharia em geral e, particularmente, na engenharia automotiva e aeroespacial, devido à excelente combinação de propriedades como, boa fluidez, baixa contração de solidificação, boa soldabilidade, alta resistência ao desgaste, elevada relação resistência e peso.

A microestrutura de uma liga no estado bruto de solidificação é de extrema importância devido a sua influência nas propriedades mecânicas. Uma estrutura apresentando grãos colunares é geralmente indesejável na maioria das aplicações de produtos fundidos e o refino de grão tem como objetivo suprimir a formação destes grãos e obter uma estrutura equiaxial de granulação fina que melhora as condições de alimentação do metal líquido e, as propriedades mecânicas, como limite de escoamento e limite de resistência a tração, bem como a tendência de formação de trincas a quente. O tipo e tamanho de grãos formados são determinados pela composição química, taxa de resfriamento e pelo uso de inoculadores para refino de grão. Titânio e Boro são os principais refinadores na indústria do alumínio e podem ser adicionados ao metal fundido sob a forma de ligas, tais como Al-Ti, Al-Ti-B ou Al-B.

Embora tenha havido um grande progresso na compreensão do mecanismo do refino de grão, ainda não há uma teoria que atenda as diferentes correntes que trabalha com o processo de refino por adição de nucleantes. No caso de ligas de alumínio, sabe-se que o  $TiAl_3$  constitui-se em um refinador eficiente de cristais de alumínio.

A análise da curva de resfriamento tem sido utilizada nos últimos anos para a determinação de propriedades termofísicas de ligas, por exemplo, calor latente de solidificação e fração sólida. O uso da derivada da curva de resfriamento melhora a precisão na determinação das características da curva de resfriamento.

No presente trabalho serão abordadas as informações obtidas das curvas de resfriamento e da primeira derivada da curva de resfriamento para a obtenção dos parâmetros térmicos que influenciam o processo de refino de grão da liga AA 356.

## 1.1. Apresentação do alumínio e sua obtenção

Segundo Associação Brasileira do Alumínio - ABAL (2007), o alumínio, por suas excelentes propriedades físico-químicas – entre elas baixo peso específico, resistência à corrosão, alta condutibilidade térmica e elétrica e infinita reciclagem fazem dele o metal não-ferroso mais consumido no mundo, seguindo o consumo de ferro/aço, que é o metal ferroso com maior consumo anual.

O alumínio é o elemento mais abundante na crosta terrestre, da ordem de 8,05% da crosta terrestre sólida (ZANGRANDI, 2008), devido a sua alta afinidade com o oxigênio o minério de alumínio encontra-se na natureza em forma de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ), sendo o minério mais importante a bauxita ( $Al_2O_3 \cdot nH_2O$ ), com teor aproximado de óxido de alumínio entre 35 a 45% (ABAL, 2007).

O processo industrialmente empregado na obtenção do alumínio foi desenvolvido pela primeira vez em 1886, por dois cientistas trabalhando independentemente, mas que inventaram o mesmo procedimento de reduzir alumina pura ( $Al_2O_3$ ) em alumínio denominado primário, Charles Martin Hall nos EUA e o francês Paul Louis Héroult, na França, sendo até hoje o processo empregado na indústria do alumínio e denominado como processo Hall-Héroult (ABAL, 2007).

Para a obtenção da alumina, usado no processo Hall-Héroult, a indústria do alumínio utiliza o processo químico denominado Bayer, em que a alumina é dissolvida em soda cáustica e, posteriormente é filtrada separando todo o material sólido para cristalização da alumina, onde os cristais são secados e calcinados retirando-se a água, e obtendo-se um pó branco, a alumina pura ( $Al_2O_3$ ), que é levado à redução pelo processo Hall-Héroult (ABAL, 2007).

A Figura 1 mostra o esquema de uma célula eletrolítica de redução da alumina em alumínio primário.

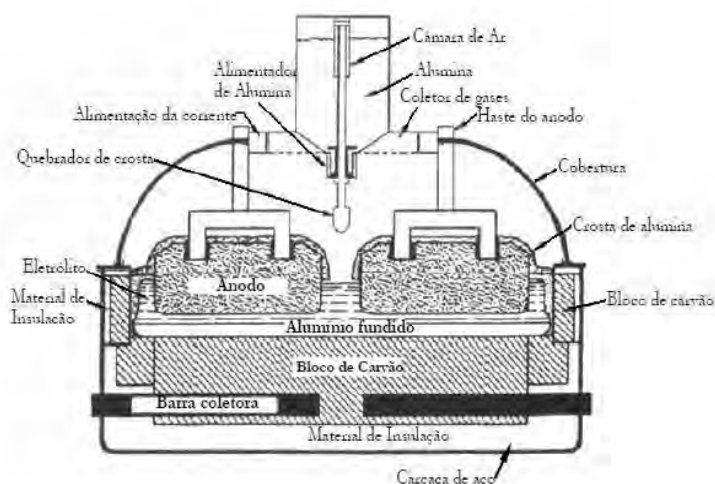


Figura 1 Representação de uma célula eletrolítica na redução da alumina em alumínio primário.

A Figura 2 ilustra esquematicamente o fluxograma da obtenção da alumina (ABAL, 2007) que depois é levada à cuba eletrolítica onde o processo de redução se realiza num forno elétrico a uma temperatura entre 940 a 980 °C (ZANGRANDI, 2008).

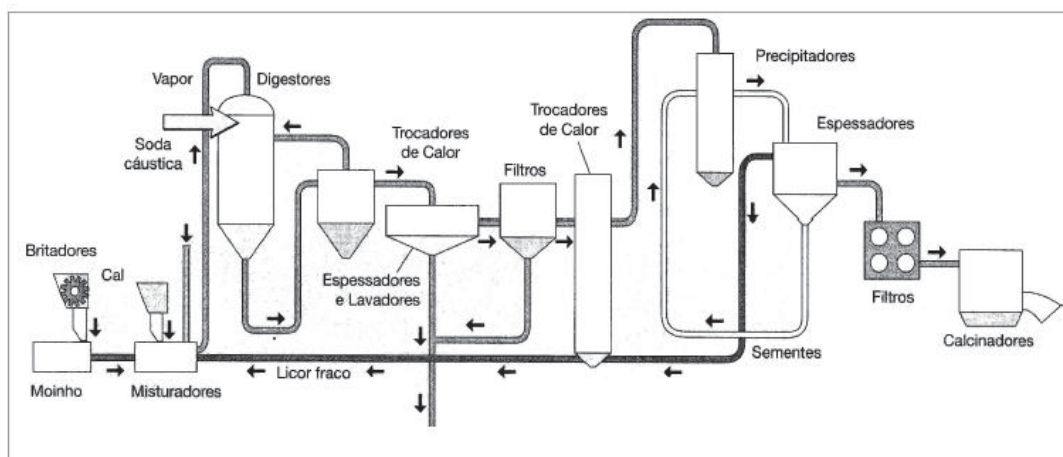


Figura 2 Fluxograma da obtenção da alumina que será usada no processo Hall-Héroult.

A alumina obtida no processo Bayer é levada para o processo de eletrólise dissolvida numa solução criolita, um fundente eletrolítico de fórmula  $\text{AlF}_3 \cdot 3\text{NaF}$  (fluoreto duplo de alumínio e sódio) (ZANGRANDI, 2008), com a passagem de corrente elétrica na célula eletrolítica ocorre a redução da alumina, decantando o alumínio metálico líquido no fundo da célula.



A Tabela 1 fornece os principais insumos e quantidades para a produção de alumínio primário durante o processo de Redução (ABAL, 2007).

Tabela 1 Insumos para a produção de alumínio primário.

Insumos	Quantidade
Alumina	1919 kg/t
Energia Elétrica	15,0 MWh <sub>cc</sub> /t Al
Criolita	8,0 kg/t
Fluoreto de Alumínio	19,7 kg/t
Coque de petróleo	0,384 kg/kg Al
Piche	0,117 kg/kg Al
Óleo combustível	44,2 kg/t

## 1.2. Algumas características do alumínio

O alumínio possui ponto de fusão de 660°C quando na pureza de 99,80%. Ligas de alumínio em geral possuem ponto de fusão mais abaixo do que o alumínio puro devido à presença de outros metais.

O peso específico é uma das principais características do alumínio, 2,70 g/cm<sup>3</sup> geralmente, que aliada ao aumento da resistência mecânica por adição de elementos de ligas e/ou tratamentos térmicos torna o alumínio o metal de escolha para a indústria de transportes em geral.

O alumínio puro comercialmente tem uma resistência a tração aproximadamente de 90 MPa, aumentos maiores na sua resistência podem ser obtidas com pequenas adições de outros metais como elementos de liga, por exemplo: silício, manganês, magnésio, cobre, etc., como por tratamentos térmicos, exemplo: solubilização/envelhecimento, homogeneização, etc., ou ainda por tratamentos por trabalho a frio.

A resistência à corrosão é a característica do alumínio que o faz adquirir maior durabilidade a ambientes agressivo, a formação de uma película protetora de óxido ainda quando o alumínio está na forma líquida em contato com a atmosfera, esta primeira camada de óxido protege o alumínio de oxidações posteriores. Apesar de ser uma característica marcante no alumínio a resistência à corrosão, algumas ligas de alumínio apresentam menor resistência à corrosão, particularmente ligas de elevada

resistência mecânica devendo essas ter sua superfície protegida contra a ação de ambientes oxidantes e corrosivos, o contato, também, direto do alumínio com alguns metais em presença de eletrólito, podem causar a corrosão galvânica do alumínio, devendo também ser protegidos, quando há necessidade de união do alumínio com esses metais, com pinturas betuminosas ou materiais isolantes (ABAL, 2007).

Outro importante atributo que o alumínio possui é a condutibilidade térmica, eficiente metal na transferência de calor, o alumínio é amplamente usado na confecção de trocadores de calor a utensílios domésticos, excelente refletor de energia radiante como raios ultravioletas e infravermelhos quanto ondas eletromagnéticas de radio e radar. O alumínio puro possui uma condutibilidade térmica 4,5 vezes maior que a do aço doce (ABAL, 2007).

A Tabela 2 abaixo compara algumas características do alumínio com o aço e o cobre (ABAL,2007).

Tabela 2 Comparativo das propriedades do alumínio com o aço e o cobre.

<b>Propriedades físicas típicas</b>	<b>Alumínio</b>	<b>Aço</b>	<b>Cobre</b>
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2,70	7,86	8,96
Temperatura de fusão (°C)	660	1500	1083
Módulo de elasticidade (MPa)	70000	205000	110000
Coefficiente de dilatação térmica (L/°C)	23.10 <sup>-6</sup>	11,7.10 <sup>-6</sup>	16,5.10 <sup>-6</sup>
Condutibilidade Térmica a 25°C (Cal/cm/°C)	0,53	0,12	0,94
Condutibilidade elétrica (%IACS)	61	14,5	100

### 1.3. Ligas de alumínio

O objetivo dos elementos de liga no alumínio é aumentar sua resistência mecânica, sem que haja detrimento com as outras propriedades, de forma que cada liga desenvolvida há uma propriedade adequada a uma aplicação específica.

Nas ligas de alumínio, o alumínio fundido dissolve os outros metais e substâncias metalóides<sup>1</sup>, o alumínio líquido quando se resfria e solidifica, alguns dos constituintes

<sup>1</sup> A diagonal de elementos, que se inicia no boro (grupo 13), passando pelo silício (grupo 14), germânio (grupo 14), arsênio (grupo 15), antimônio (grupo 15), telúrio (grupo 16) e polônio (grupo 16); separa os elementos a direita em não-metais, e a esquerda em os metálicos. Os elementos pertencente a diagonal são os metalóides, que apresentam propriedades de metais e de não-metais.

da liga podem ser retidos em solução sólida. Isto faz com que a estrutura atômica do metal se torne mais rígida. Os átomos podem ser visualizados num arranjo em forma de rede, uma rede cristalina regular, formando átomos de tamanhos diferentes daqueles do elemento de liga principal (ABAL, 2007). A Figura 3 ilustra o arranjo dos átomos de elementos liga na estrutura cristalina.

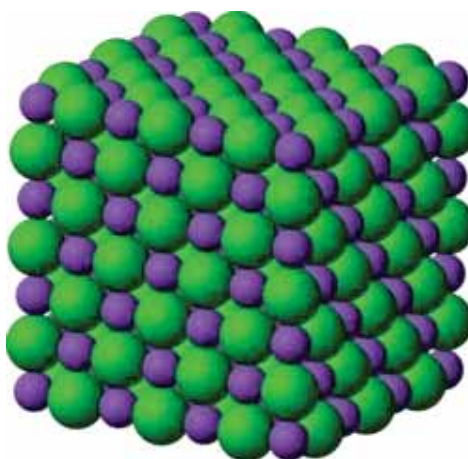


Figura 3 Ilustração do arranjo dos átomos de liga na rede cristalina.

O metal quente pode manter uma grande quantidade de elementos de liga em solução sólida do que quando frio. Conseqüentemente, quando do seu resfriamento, ele tende a precipitar o excesso dos elementos de liga da solução. Este precipitado pode ser na forma de partículas duras, consistindo de compostos intermetálicos, tais como:  $\text{CuAl}_2$  ou  $\text{MgSi}$ ; estes agregados de átomos metálicos tornam a rede cristalina mais rígida ainda e, conseqüentemente, endurecem a liga (ABAL, 2007).

Os principais elementos formadores das ligas de alumínio comercialmente utilizados na indústria e na engenharia são: o zinco, o manganês, o magnésio, o cobre e o silício. Além destes elementos, que são amplamente utilizados para compor as ligas de alumínio, outros elementos como níquel, cobalto, cromo, titânio e zircônio são, geralmente, empregados às ligas de alumínio com finalidades específicas, podendo ser resumidamente caracterizado a função de cada elemento adicionado à liga de alumínio segundo Zangrandi (2008), da seguinte forma:

- Zinco: aumenta a resistência mecânica do alumínio por endurecimento por precipitação natural e artificial;

- Cobre: aumenta a resistência mecânica por endurecimento por precipitação natural, mas diminui a resistência à corrosão, a ductilidade e a soldabilidade da liga;
- Magnésio: reduz a temperatura de fusão, aumenta a capacidade de endurecimento por deformação e a resistência à corrosão da liga;
- Silício: diminui a temperatura de fusão, aumenta a fluidez da liga, aumenta a resistência mecânica e melhora a ductilidade. O silício adicionado juntamente com o magnésio proporciona o endurecimento por precipitação na liga;
- Manganês: aumenta a resistência mecânica do alumínio comercialmente puro com pequena redução da ductilidade, e melhora a resistência à corrosão;
- Níquel: aumenta a resistência da liga em altas temperaturas;
- Titânio: diminui o tamanho do grão;
- Zircônio: é um elemento considerado estabilizador, que influencia os mecanismos de precipitação;
- Cromo: aumenta a resistência à corrosão sob tensão.

Num contexto geral, as ligas de alumínio são conhecidas como ligas leve devidas a sua baixa densidade, classificada como ligas não ferrosas, pertencente à mesma classe das ligas de magnésio e titânio.

#### 1.4. Classificação das ligas de alumínio

As ligas de alumínio são divididas em dois grandes grupos: As Ligas Trabalhadas e as Ligas Fundidas; as Ligas Trabalhadas são aquelas que sofrem deformações plásticas a quente e a frio, cuja composição e microestrutura diferem das Ligas Fundidas, o que caracteriza as diferenças de cada processo de fabricação (ZANGRANDI, 2008).

Dentro da classificação de cada grupo, Trabalhada e Fundidas, dos dois grandes grupos, ambos foram divididos em dois subgrupos: as Tratáveis Termicamente e as

Não tratáveis Termicamente. A Figura 4 mostra o esquema de classificação geral das ligas de alumínio.

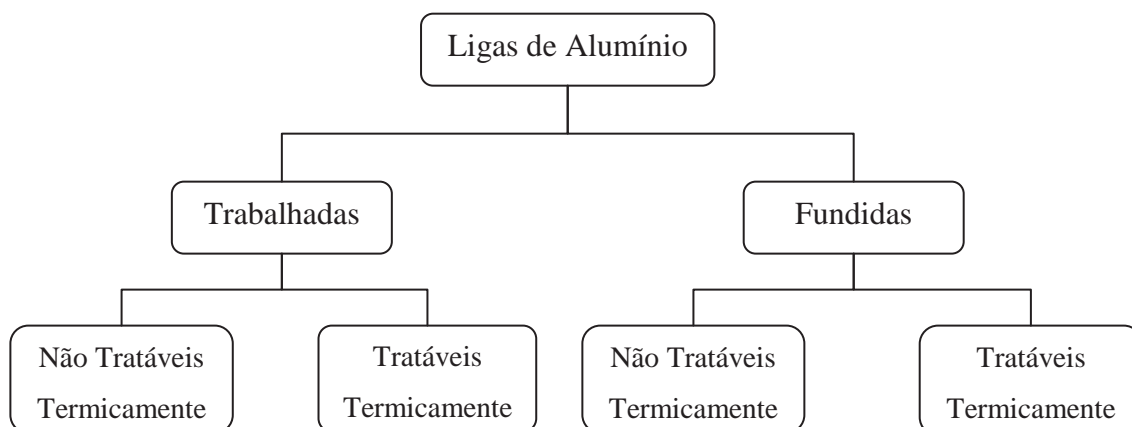


Figura 4 Classificação geral das Ligas de Alumínio.

O sistema de identificação das ligas de alumínio de alguns países da Europa utiliza o sistema alfa numérico, estabelecido pela International Organization for Standardization (ISO); outros países como Estados Unidos, Inglaterra e Brasil utilizam o sistema numérico estabelecido pela American National Standards Institute (ANSI) e a Aluminum Association (AA). No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), adotou pela norma NBR 6834, um sistema semelhante ao sistema de identificação numérico da Aluminium Association (AA).

### 1.5. Classificação das ligas trabalhadas

A classificação das ligas de alumínio trabalhada também foi agrupada em séries de quatro dígitos, mas sem o ponto decimal, onde na série 1XXX, o primeiro dígito indica alumínio comercialmente puro, e os dois últimos dígitos indica a porcentagem mínima de alumínio que excede 99,0%, já nas séries de 2 a 9 os dois últimos dígitos não tem significado especial e só servem para identificar diferentes ligas de uma mesma série. O segundo dígito se for 0 indica que a composição é a original da série, e se for diferente de zero, variando de 1 a 9, indica modificações da composição original da liga (ZANGRANDI, 2008).

O Quadro 2 mostra as séries das ligas trabalhadas com seu principais elementos de liga (ZANGRANDI, 2008).

Quadro 1 Série das ligas trabalhadas de alumínio e seus principais componente

<b>Série</b>	<b>Principais elementos constituintes da liga</b>
1XXX	Alumínio puro, composição controlada (% Al $\geq$ 99,0)
2XXX	Al-Cu
3XXX	Al-Mn
4XXX	Al-Si
5XXX	Al-Mg
6XXX	Al-Mg-Si
7XXX	Al-Zn
8XXX	Al-Sn, Al-Li, Al-Fe, etc.
9XXX	Série não utilizada

#### 1.6. Classificação das ligas fundidas

Para a identificação das ligas de alumínio fundidas, o sistema adotado foi o agrupamento em famílias ou séries, onde dentro de cada série um sistema de quatro dígitos é empregado, e o último dígito é separado dos três primeiros por um ponto decimal.

O Quadro 1 indica as série ou família das Ligas Fundidas, com seus principais elementos de liga (ZANGRANDI, 2008).

Quadro 2 Série de identificação das ligas fundidas

<b>Série</b>	<b>Principais elementos constituintes da liga</b>
1XX.X	Alumínio puro, composição controlada (% Al $\geq$ 99,0)
2XX.X	Al-Cu
3XX.X	Al-Si-Mg, Al-Si-Cu, Al-Si-Cu-Mg
4XX.X	Al-Si
5XX.X	Al-Mg
6XX.X	Série não usada
7XX.X	Al-Zn
8XX.X	Al-Sn

Assim na série 1XX.X, o primeiro dígito indica alumínio comercialmente puro, os dois dígitos seguintes (segundo e terceiro) mostram aproximadamente a porcentagem mínima de alumínio acima de 99%, o último dígito, após o ponto decimal indica a forma do produto, ou seja, dígito 0, produto fundido, dígito 1, produto em lingote.

Para as séries seguintes, 2 a 8, o primeiro dígito indica a série a qual a liga pertence e o seu principal elemento de liga, ou seja, aquele com maior porcentagem média, se a maior porcentagem média for comum a mais de um elemento, quem determinará à qual série a liga pertencerá é o primeiro elemento na seqüência de elementos, o segundo e terceiro dígitos não tem um significado especial, servem apenas para identificar diferentes ligas de uma mesma série, o quarto dígito se for 0, indica produto fundido e se for 1 ou 2, produto em lingote (ZANGRANDI, 2008).

Segundo Moreira e Fouco, as ligas de alumínio para a fundição são as mais versáteis e fáceis de trabalhar dentre todas as ligas empregadas na fundição, propriedades características, que as ligas de alumínio apresentam, como:

- Baixa viscosidade, o que facilita o preenchimento de seções finas;
- Baixa temperatura de fusão, possibilitando o emprego de moldes metálicos;
- Elevado coeficiente de transferência de calor, possibilitando a realização de ciclos de fundição curtos;
- Somente o hidrogênio apresenta solubilidade significativa em ligas de alumínio e seu teor pode ser controlado pelos processos de degaseificação;
- A maior parte das ligas de alumínio não apresenta tendências ao fenômeno de trinca a quente; e
- São ligas que não apresentam interações ou reações do tipo metal-molde e conseqüentemente, apresentam bom acabamento superficial após a fundição;

essas características tornam as ligas de alumínio para fundição um dos materiais mais atraentes para os mercados de peças fundidas, podendo obter-se com elas uma grande e variedade de formatos e formas de peças utilizadas na indústria em geral, desta

forma conseqüentemente as ligas de alumínio para fundição serem tão difundidas, apresentando uma infinidade de aplicações e uma grande participação em quase todos os segmentos e tipo de mercados, desde a fabricação de utensílios domésticos a peças fundidas para motores de combustão por exemplo.

O Quadro 3 mostra mais detalhes da composição das ligas de alumínio mais utilizadas no mercado (MOREIRA, FOUÇO).

Quadro 3 composição das ligas de alumínio fundidas

Designação AA	Composição química (%)				
	Cu	Mg	Mn	Si	Outros
201.0	4,6	0,35	0,35	-	0,7 Ag; 0,25 Ti
206.0	4,6	0,25	0,35	0,10	0,22 Ti; 0,15 Fe
A206.0	4,6	0,25	0,35	0,05	0,22 Ti; 0,10 Fe
208.0	4,0	-	-	3,0	-
242.0	4,0	1,5	-	-	2,0 Ni
295.0	4,5	-	-	0,8	-
296.0	4,5	-	-	2,5	-
308.0	4,5	-	-	5,5	-
319.0	3,5	-	-	6,0	-
336.0	1,0	1,0	-	12,0	2,5 Ni
354.0	1,8	0,50	-	9,0	-
355.0	1,2	0,50	0,50	5,0	0,6 Fe; 0,35 Zn
C355.0	1,2	0,50	0,10	5,0	0,20 Fe; 0,10 Zn
356.0	0,25 <sup>2</sup>	0,32	0,35	7,0	0,6 Fe; 0,35 Zn
A356.0	0,20	0,35	0,10	7,0	0,20 Fe; 0,10 Zn
357.0	-	0,50	-	7,0	-
A357.0	-	0,60	-	7,0	0,15 Ti; 0,005 Be
359.0	-	0,60	-	9,0	-
360.0	-	0,50	-	9,5	2,0 Fe
A360.0	-	0,50	-	9,5	1,3 Fe
380.0	3,5	-	-	8,5	2,0 Fe
A380.0	3,5	-	-	8,5	1,3 Fe
383.0	2,5	-	-	10,5	-
384.0	3,8	-	-	11,2	3,0 Zn
A384.0	3,8	-	-	11,2	1,0 Zn
390.0	4,5	0,6	-	17,0	1,3 Zn
A390.0	4,5	0,6	-	17,0	0,5 Zn
413.0	-	-	-	12,0	2,0 Zn

<sup>2</sup> Teor máximo permitido pela Aluminum Association - AA



Designação AA	Composição química (%)				
	Cu	Mg	Mn	Si	Outros
A413.0	-	-	-	12,0	1,3 Zn
443.0	0,6	-	-	5,2	-
A443.0	0,30	-	-	5,2	-
B443.0	0,15	-	-	5,2	-
C443.0	0,6	-	-	5,2	2,0 Fe
514.0	-	4,0	-	-	-
518.0	-	8,0	-	-	-
520.0	-	10,0	-	-	-
535.0	-	6,8	0,18	-	0,18 Ti
A535.0	-	7,0	0,18	-	-
B535.0	-	7,0	-	-	0,18 Ti
712.0	-	0,6	-	-	5,8 Zn; 0,5 Cr; 0,20 Ti
713.0	0,7	0,35	-	-	7,5 Zn; 0,7 Cu
771.0	-	0,90	-	-	7,0 Zn; 0,13 Cr; 0,15 Ti
850.0	1,0	-	-	-	6,2 Sn; 1,0 Ni

### 1.7. Descrição da liga de alumínio AA 356.0

A liga AA 356.0, de acordo com a classificação da Aluminum Association, pertence à série 3 (Al-Si) das ligas para fundição ou fundidos de alumínio, é um produto fundido (último dígito igual a zero). De acordo com Furlan (2008) a liga AA 356.0 possui um limite de ruptura aproximadamente de 283 MPa e um limite de escoamento de 207 MPa.

Ligas pertencentes a essa série como é o caso da liga AA 356.0, apresentam as melhores características para a fundição, sendo por esse motivo elas serem as mais usadas em peças fundidas de alumínio, cerca de 90% do total das peças fundidas em alumínio pertencem à série 3.

As ligas com menores teores de silício (5 a 7%), caso da liga AA 356.0 que contém 7% de silício, são geralmente empregadas na confecção de peças que utilizam moldes de areia, enquanto para ligas com maiores teores de silício (9 a 13%), os fundidos são normalmente vazados em moldes metálicos permanentes.

Ligas binárias de Al-Si têm elevada resistência à corrosão, boa soldabilidade, com difícil usinagem, mas que pode ser melhorada com adição de Cu, que além de melhorar sua usinabilidade proporciona um aumento na resistência mecânica, reduzindo a ductilidade das ligas Al-Si.

Aplicações da liga AA 356.0 envolvem peças de uso geral e de seções finas, válvulas, coletores de admissão, cabeçotes e blocos de motor, pistões e rodas automotivas, peças estruturais para a indústria aeroespacial, bombas, carcaças e componentes de suspensão.

O diagrama binário de fases das ligas de Al-Si é uma curva simples eutética. A Figura 5 ilustra um diagrama eutético das ligas de Al-Si contendo de 7 a 11% de Si.

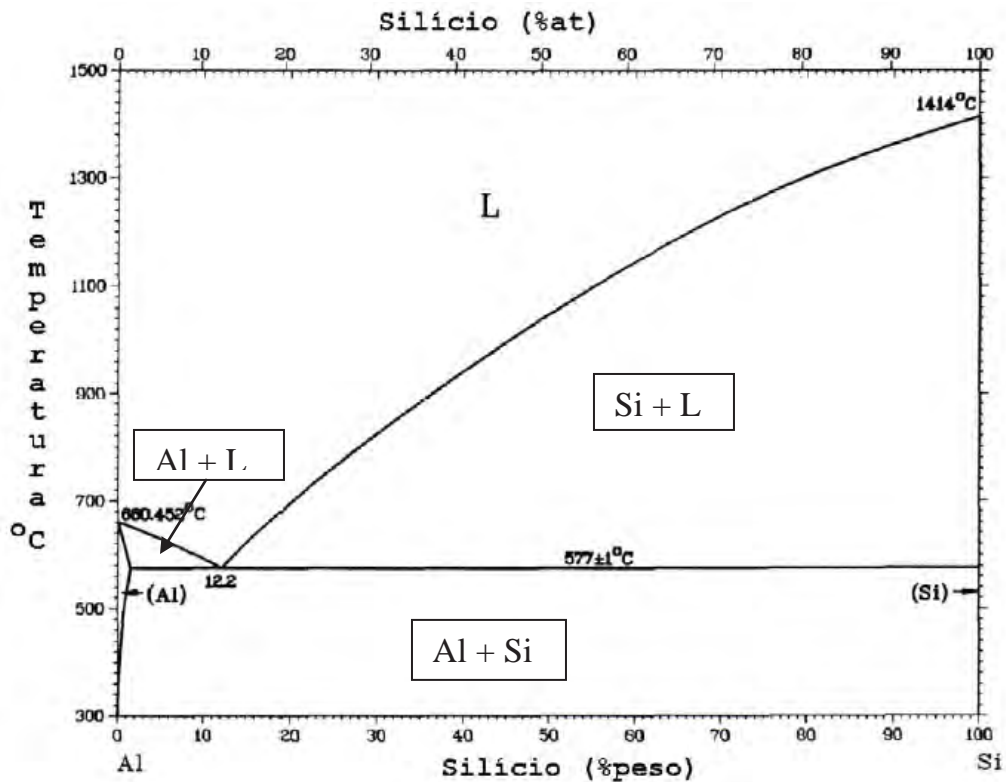


Figura 5 Diagrama de fases das Ligas de Al-Si.

Furlan (2008), comenta que na microestrutura das ligas de Al-Si, são formadas basicamente por dendritas de fase alfa e de eutético Al-Si. O controle da formação da microestrutura durante a solidificação tem se tornado cada vez mais importante para produtores de peças fundidas de alumínio, não só porque a microestrutura determina as

propriedades mecânicas do material, mas também a fatores de fundibilidade e susceptibilidade à formação de defeitos das peças fundidas.

## 2. ANÁLISE DA MACROESTRUTURA

### 2.1. Teoria da solidificação

A solidificação dos metais geralmente ocorre em duas etapas consecutivas, uma primeira nucleação e o surgimento e crescimento de uma fase sólida em meio o metal líquido. Quando o metal está no estado líquido, os átomos se movimentam aleatoriamente, a partir da diminuição da temperatura, estes átomos de movimentação aleatória, começam a adquirirem maior estabilidade termodinâmica e a criar pequenas regiões (embriões), formando estruturas de sólidos estáveis, resultando num processo conhecido como nucleação da fase sólida. Após o surgimento da fase sólida, o crescimento desta fase ocorrerá através da transferência dos átomos da fase líquida para a fase sólida, durante este processo, a interface sólido-líquido forma uma estrutura específica de crescimento, sendo este crescimento podendo ser classificado como não-facetado, típicos dos metais, ou facetados, encontrados geralmente em materiais não metálicos ou intermetálico (ARANGO, 2009).

### 2.2. Formação da macroestrutura

Segundo Arango (2009), a nucleação da fase sólida é a primeira etapa na formação da macroestrutura dos grãos brutos na solidificação. A etapa seguinte consiste no crescimento destes grãos, que podem ocorrer simultaneamente com a formação de novos núcleos de solidificação em outras partes do metal fundido. A competição entre a nucleação de novos grãos e o crescimento é o que determinará a macroestrutura final do material.

As três principais zonas de solidificação encontradas na macroestrutura dos metais fundidos são:

- Zona coquilhada;
- Zona colunar; e

- Zona equiaxial.

A Figura 6 apresenta esquematicamente as três principais zonas de solidificação encontradas na macroestrutura de um material metálico fundido (ARANGO, 2009).

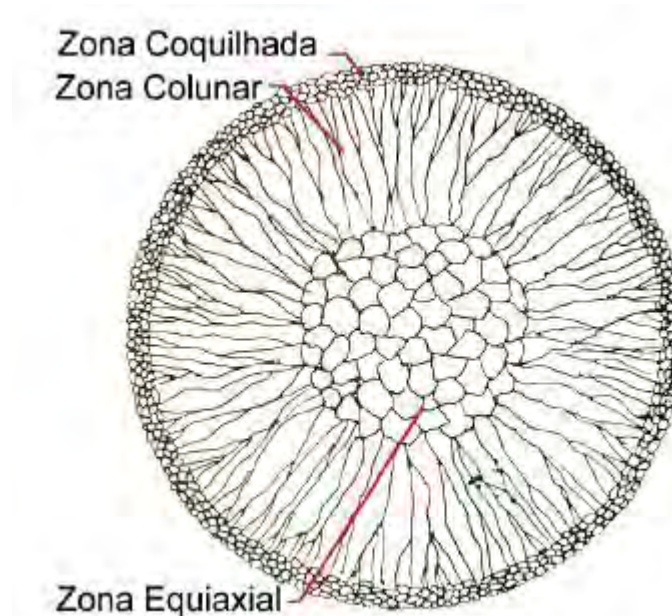


Figura 6 Representação das três zonas de solidificação presentes na macroestrutura do metal fundido.

Os grãos encontrados na zona coquilhada nucleiam e cresce próximo a parede do molde devido à taxa de resfriamento ser maior neste local, a nucleação ocorre com mais intensidade nesta parte e é influenciada por parâmetros como: coeficiente de transferência de calor na interface metal-molde, e pela intensidade da taxa de extração de calor (ARANGO,2009).

Na zona colunar os grãos originam-se a partir da zona coquilhada através de um crescimento competitivo e têm direção de crescimento preferencial paralelo ao fluxo de extração do calor e o crescimento se dá até a condição em que seja favorável ao surgimento e crescimento dos grãos equiaxiais. A Figura 7 ilustra a região de surgimento e crescimento dos grãos colunares (ARANGO,2009).

A zona equiaxial é uma das estruturas mais desejáveis na fundição de metais, por isso seu estudo é mais relevante na análise da macroestrutura dos materiais metálicos, diversas teorias são encontradas e formulada por diversos pesquisadores nesta área,

tentando explicar os mecanismos de formação desta região no metal fundido solidificado, não cabendo aqui neste trabalho seu estudo detalhado.

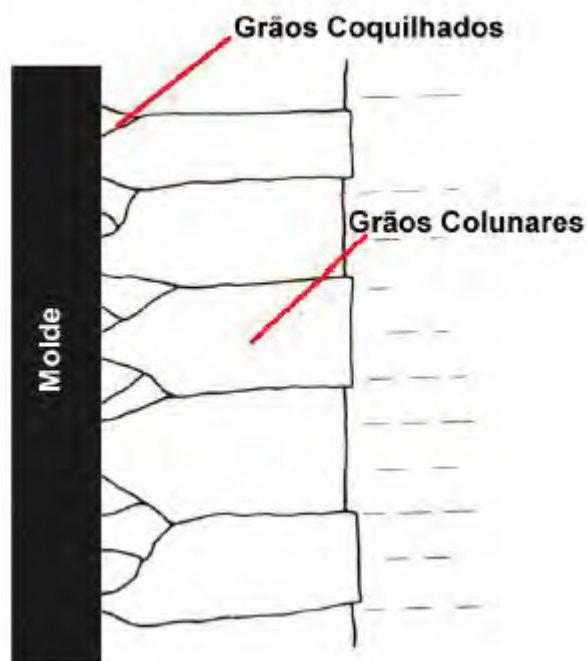


Figura 7 Zona de crescimento de grãos colunares.

Segundo Arango (2009), a transição dos grãos colunares para equiaxial tem despertado interesse de muitos pesquisadores, pois o seu entendimento pode permitir determinar os parâmetros que afetam direta ou indiretamente a formação da macroestrutura dos grãos. Alguns parâmetros de processamento que afetam essa macroestrutura são: a composição da liga; o superaquecimento inicial do metal líquido; a adição de inoculantes; a convecção natural do líquido e o tipo de molde empregado na fundição (areia, metálico).

### 2.3. Materiais e Métodos

Na visualização e análise da macroestrutura dos grãos da liga AA 356.0, foram realizados para efeito de análise e comparação, diversos ensaios com a liga em questão, descritos a seguir.

Para comparação da influência da ação do molde sobre a macroestrutura da liga fundida AA 356.0, foram realizados dois experimentos com a liga com quantidades iguais de material, em que consistia na variação do tipo do molde empregado na fundição: de areia e um metálico.

Para o estudo e obtenção dos dados para a análise da macroestrutura da liga AA 356.0 foram utilizados os seguintes materiais e ferramentas:

- 1 kg de liga Al-Si AA 356.0 fracionados para caber no cadinho;
- 1 cadinho de cerâmica, com capacidade de aproximadamente 500g de material;
- 1 máquina de serra de fita, para cortar o lingote de alumínio da liga AA 356.0, doado pela ALCOA, em pedaços e tamanhos suficientes para caber no cadinho;
- 1 serra hidráulica, utilizado para cortar o lingote em pedaços menores que pudessem, posteriormente, ser cortados na serra de fita;
- 1 forno de aquecimento;
- Tenaz, para a manipulação do cadinho após a retirada do forno;
- Lixas de grana 100, 220, 320, 400 e 600;
- 1 molde metálico de aço permanente;
- Areia de fundição preparada com resina e catalisador na proporção de 1 kg de areia de fundição, 5g de catalisador H -20 BB e 20g de resina para areia de fundição;
- Luvas e avental de couro, item obrigatório de segurança, para a realização da fundição da liga de alumínio;
- Reagente de ataque da superfície a ser estudada, solução de 75 ml de HCl (concentrado), 25 ml de HNO<sub>3</sub> (concentrado) e 5 ml de HF (48%); conforme norma ASTM E 340 ASTM E3 E 407;
- Algodão;
- Luvas de borracha;
- Pinça;
- Béquer;

- Balança de capacidade 1kg;
- Água corrente;
- Capela, sistema de exaustão dos gases da reação do ataque com a peça trabalhada;
- Câmera fotográfica;

A metodologia empregada na análise da macroestrutura se inicia com a fundição da liga AA 356.0 em um forno de aquecimento por resistência elétrica programado para uma temperatura de fundição final de 850°C em um cadinho com quantidade de 500g de material da liga cortada em pedaços suficientemente pequenos para caber no cadinho.

Depois de o fundido da liga atingir a temperatura programada do forno, utiliza-se da tenaz para retirar o cadinho contendo o fundido da liga do forno ao envasamento nos moldes de areia e metálico.

O molde das peças fundidas são no formato cilíndrico de aproximadamente 6 cm de diâmetro e 10 cm de altura. A figura 8 e 9 ilustra as ferramentas utilizadas para cortar o lingote da liga AA 356.0 em pedaços para caber no cadinho, a figura 8 ilustra a serra hidráulica para cortar os pedaços maior da liga do lingote e a figura 9 mostra a serra fita utilizada para cortar a liga nos pedaços suficientes para caber no cadinho.



Figura 8 Serra hidráulica.





Figura 9 Serra fita utilizado para cortar os pedaços da liga de alumínio AA 356.0.

As Figuras 10 e 11 ilustram a programação da temperatura de 850°C do forno de aquecimento para derreter a liga AA 356.0 e o forno utilizado para a fundição da liga, respectivamente.



Figura 10 Visor do forno de aquecimento programado para derreter a liga AA 356.0.



Figura 11 Forno utilizado para a fundição das peças no molde metálico e de areia.

Para a confecção dos moldes de areia e o fundo do molde metálico foi utilizado areia de fundição preparada na proporção de 1 kg de areia de fundição seca, para 20g de resina para preparação de areia de fundição e 5g de catalisador H-20 BB, misturados de forma homogênea num recipiente e compactadas no forma do molde, com tempo de espera da cura da resina de aproximadamente 30 minutos.

As Figuras 12 e 13 ilustram a preparação do molde metálico utilizado na fundição da amostra de alumínio AA 356.0 e o envasamento da liga AA 356.0 no molde metálico.



Figura 12 Preparação do molde metálico com fundo de areia de fundição.



Figura 13 Fundido da liga AA 356.0 sendo vazado no molde metálico.

As Figuras 14 e 15 ilustram, respectivamente, a preparação do molde de areia e a envasamento da liga AA 356.0, no molde de areia.



Figura 14 Configuração do molde de areia.



Figura 15 Fundição da liga AA 356.0 no molde de areia.

Depois de fundidas as peças no molde metálico e de areia, as peças fundidas com aproximadamente 6 cm de diâmetro e 10 cm de altura são desmoldadas cortadas no torno ou em serra de fita, na sua seção transversal.

Logo depois de cortadas, as peças fundidas em molde de areia e metálico, foram lixadas na sua superfície transversal no laboratório de metalografia do Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá FEG-UNESP, na seqüência de lixamento, utilizando as lixas de grana 100, 220, 320, 400 e 600 e em seguida foram atacadas as superfícies lixadas com um reagente de solução de ataque de 75 ml de HCl concentrado, 25 ml de HNO<sub>3</sub> concentrado e 5 ml de HF 48% aplicada a superfície lixada com algodão embebido na solução de ataque com pinça e luvas de borracha na mão, para evitar o contato com a pele da solução de ataque, e utilizando-se de uma capela para evitar a inalação dos gases provenientes do ataque da solução na peça.

#### 2.4. Resultados e discussão

A seguir são mostradas as Figuras 16 e 17 que revelam a macroestruturas encontradas depois do ataque com o reagente, nas peças fundidas da liga de alumínio fundido AA 356.0 em molde metálico e em molde de areia.

Uma análise mais detalhada e comparação feita entre a macroestrutura da liga AA 356.0 no molde metálico e a estrutura da liga feita no molde de areia, revela que há uma maior concentração e presença de poros formados na amostra fundida em molde de areia que o molde metálico, isso ocorre devido à presença de gases e umidade na areia no momento da fundição neste tipo de molde, sendo isso muito comum na indústria de fundição de alumínio em moldes de areia, para isso indústrias se utilizam de moldes de areia mais secos possíveis e de desgaseificadores que eliminam ou reduzem a dissolução de gases no fundido para se evitar este tipo de porosidade.



Figura 16 Macroestrutura obtida com a amostra de liga de alumínio AA 356.0 fundida em molde metálico.

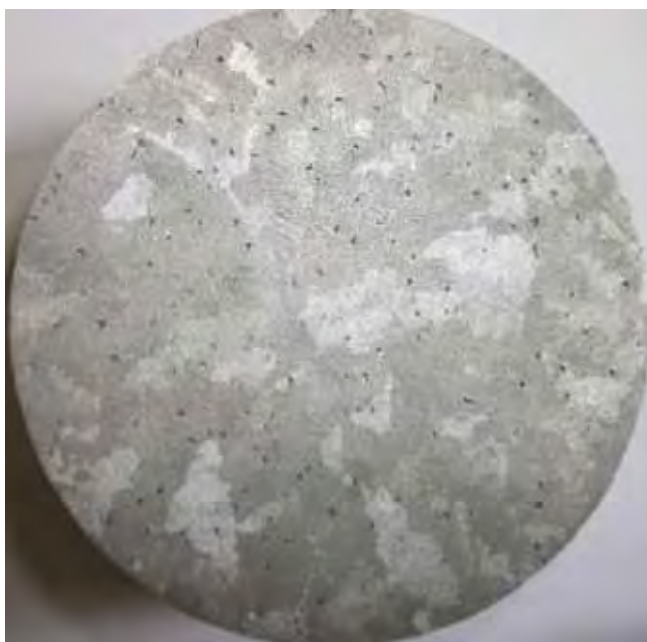


Figura 17 Macroestrutura obtida pelo ataque da solução reagente na liga AA 356.0.

De uma maneira geral, os metais no estado líquido tendem a absorver gases da atmosfera. As ligas de alumínio apresentam grande solubilidade de hidrogênio no estado líquido. Porém, quando na solidificação, essa solubilidade do hidrogênio tende a diminuir drasticamente, conforme mostrado na figura 18 (MOREIRA, FOUÇO).

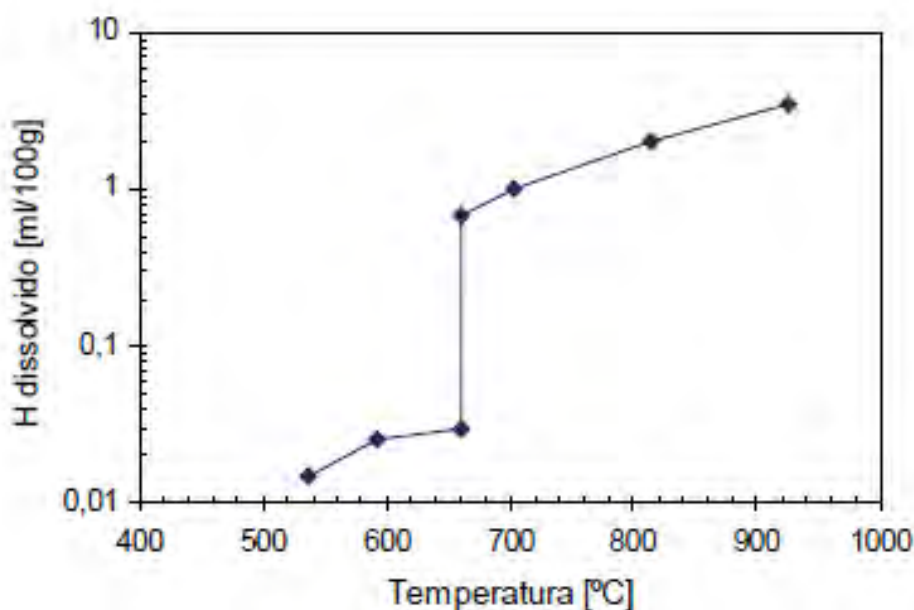


Figura 18 Gráfico de solubilidade do hidrogênio no metal fundido das ligas de alumínio em geral pela temperatura do fundido.

De acordo com Moreira e Fouco, elevados teores de hidrogênio dissolvidos no metal líquido fundido levam a formação de porosidade em regiões interdendríticas, e tais porosidade têm um efeito deletério sobre as propriedades mecânicas, notadamente sobre a ductilidade e a resistência à fadiga.

Ainda de acordo com Moreira e Fouco, a dissolução do hidrogênio no metal fundido se dá pela redução do vapor d'água, presente na umidade da areia, no caso de moldes de areia, e do ar atmosférico no momento da fundição da liga metálica.

Para promover a desgaseificação indústrias tradicionalmente se utilizam de desgaseificadores que realizam esse tipo de processo.

Um processo de desgaseificação das ligas de alumínio fundido consiste na injeção de gás inerte por meio de rotor de grafita no fundido. Neste processo, o gás é “fragmentado” pelo movimento rotativo do rotor, gerando um número elevado de bolhas. Como o processo depende, fundamentalmente, da área total das bolhas de gás, quanto maior a quantidade menor o tamanho das bolhas, e assim é a cinética da desgaseificação. As Figuras 19 e 20 mostram o esquema de desgaseificação mais utilizados pela indústria de fundição de alumínio (MOREIRA, FOUOCO).



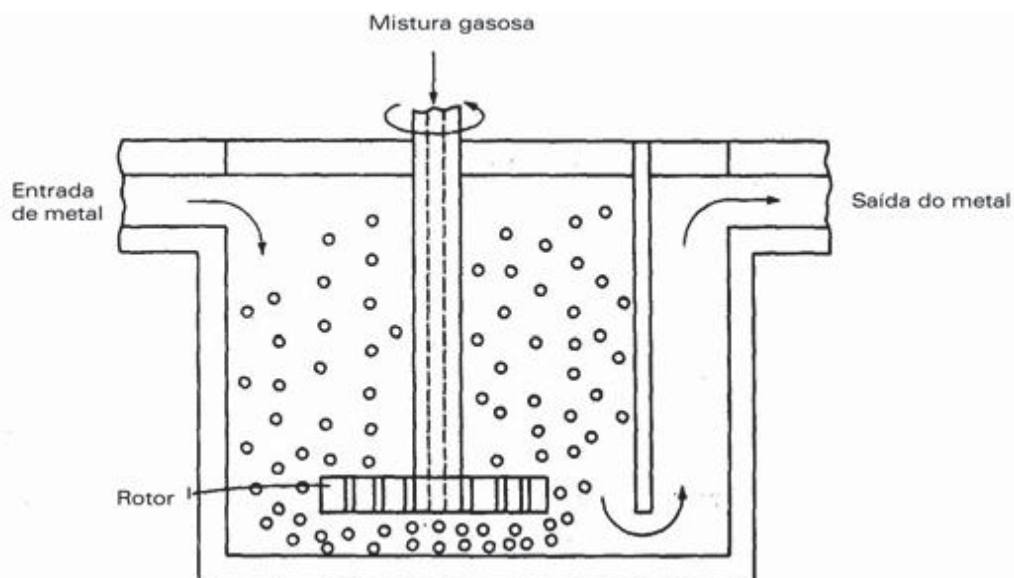


Figura 19 Esquema de uma unidade de desgaseificação contínua.

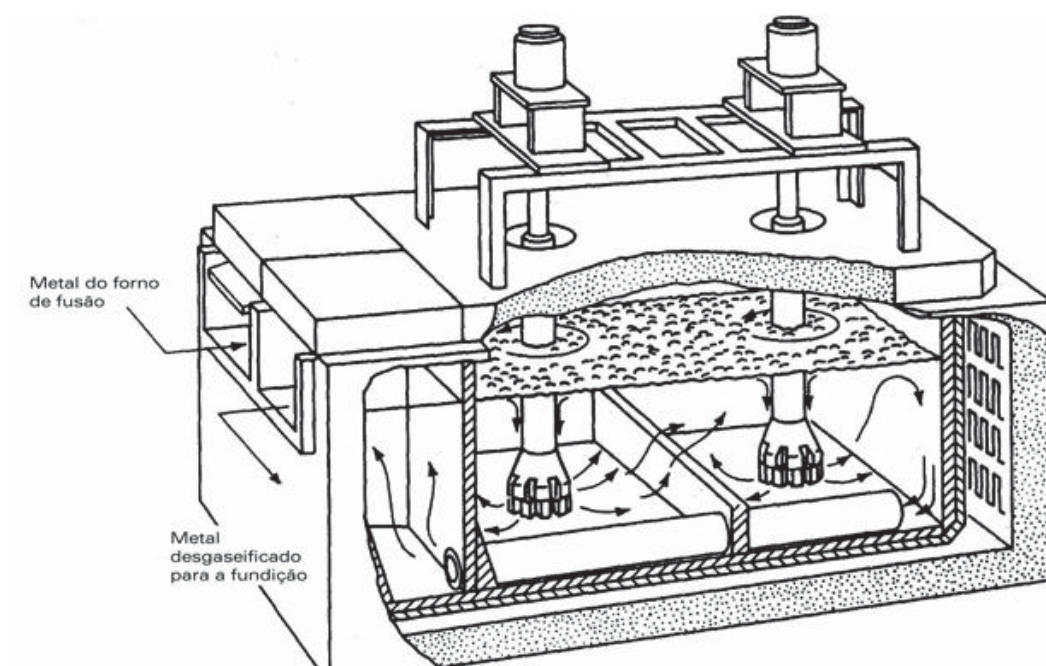


Figura 20 Esquema de um desgaseificador contínuo tipo SNIF (Spinnig nozzle inert flotation).

Outra conclusão que se pode identificar com a análise macroscópica de cada amostra é: formação, tamanho e distribuição dos grãos na macroestrutura da seção de da amostra. Observando a macroestrutura da liga de alumínio AA 356.0 onde foi utilizado o molde metálico e compará-la com a macroestrutura da amostra que foi obtida com o vazamento em molde de área, notamos que a primeira a distribuição dos grãos é maior e o tamanho deles é menor quando comparado com a amostra obtida em

molde de areia, também podemos observar que na amostra obtida no molde metálico o surgimento das três zonas de solidificação: a coquilhada, que é a zona de nucleação e próxima a parede do molde e o líquido fundido; a zona de grãos colunares, e a zona de grãos equiaxiais. Já na amostra do molde de areia essas regiões não aparecem ou não são nitidamente visualizadas, devido a taxa de solidificação e resfriamento ser menor na areia, assim ocasionando uma estrutura de grãos de tamanhos maiores com uma distribuição da zona de grãos equiaxiais maior, sem ou com tamanho de grãos colunares menores devida a taxa de perda de calor entre o fundido e a parede do molde serem menores do que no molde metálico.



### 3. CURVAS DE RESFRIAMENTO

Análises de curvas de resfriamento fornecem informações sobre a composição da liga, calor latente de solidificação, evolução da formação da fração sólida, quantidade e tipos de fase que se solidificam, e coesão dendrítica. Há também muitos outros usos para a análise de curvas de resfriamento, tais como determinar os espaçamentos dos braços dendríticos, grau de modificação e refino de grãos em ligas de alumínio. O uso de curvas de resfriamento para controles de processo de fundição é muito extensa e importante para os materiais de fundição, tanto para ligas de alumínio quanto para qualquer outro metal, como os ferros fundidos, por exemplo. (BARLOW, STEFANESCU, 1997)

#### 3.1 Estudo e interpretação da curva de resfriamento

A construção de curvas de resfriamento, em termos experimentais, tradicionalmente consiste na monitoração e aquisição de dados da temperatura em função do tempo, geralmente obtidos por termopares instalados em moldes de areia ou metálicos.

A Figura 21 mostra a disposição dos dois termopares utilizados para o levantamento dos dados para a construção das curvas de resfriamento das peças fundidas em molde de areia, um termopar na parede de interface do molde e a amostra fundida e o outro termopar no centro do molde para monitoração da temperatura de resfriamento da liga de alumínio silício.

A Figura 22 ilustra a disposição dos termopares no molde permanente metálico utilizado para a comparação das curvas de resfriamento da liga alumínio-silício AA 356.0 vazado em molde de areia e molde permanente metálico.

Observe que em ambos, os termopares são alocados na mesma disposição da para monitoração e aquisição dos dados, para comparação, um termopar na parede de interface do molde e a amostra fundida e o outro termopar no centro do molde para monitoração da temperatura de resfriamento da liga de alumínio silício AA 356.0.



Figura 21 Disposição dos termopares no molde de areia para a fundição da liga de Al-Si AA 356.0.



Figura 22 Disposição dos termopares no molde permanente metálico usado na fundição da liga AA 356.0.

De acordo com Chen, Geng e Li (2005), a forma de uma curva de análise térmica de resfriamento reflete o processo de solidificação das ligas de alumínio-silício fundido sob uma dada condição de solidificação. Fatores que influenciam no processo de solidificação como composição química, refinamentos de grãos e modificações de silício no eutético, etc., influenciam na forma da curva de resfriamento, com exceção, somente a zona de congelamento que é o segmento da curva de análise térmica de resfriamento, do líquido fundido até o fim da solidificação.

Este trabalho consiste na análise da curva de resfriamento típica para e sua derivada no tempo para uma liga de Al-Si. A forma da curva de resfriamento é o resultado do calor perdido pelo metal fundido para o ambiente e o calor perdido do metal para o molde durante a transformação de fase. Os vários eventos que podem ser observados na curva de resfriamento podem estar associados a varias transformações que ocorrem durante o processo de resfriamento. O que os termopares indicam na

verdade, as temperaturas médias ao longo de um determinado volume, sendo assim o que é registrado na curva de resfriamento, pode não ser o que necessariamente esteja acontecendo na transformação real. Dessa forma, o fundidor deve ter o cuidado quanto ao uso da curva de resfriamento para identificar a ocorrência de uma transformação de fase e amplitude (BARLOW, STEFANESCU, 1997).

A Figura 23 ilustra uma curva de resfriamento típica de uma liga de Al-Si (BARLOW, STEFANESCU, 1997).

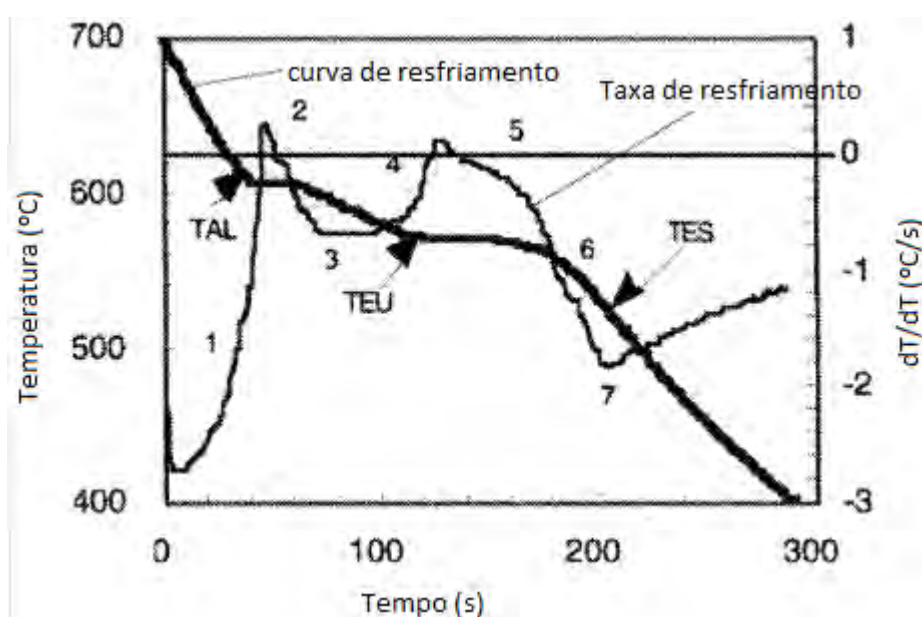


Figura 23 Curva de resfriamento típica de uma liga de Al-Si.

O ponto TAL (Temperature of Líquidus Arrest), temperatura em que os dendritos primários ( $\alpha$ -Al para ligas de Al-Si) começam a se solidificar a partir do líquido, a mudança na inclinação da curva de resfriamento no ponto TAL resulta do calor de solidificação da fase  $\alpha$ -Al, formação dos dendritos primários. O ponto TEU (Temperature of Eutectic Undercooling), temperatura de subresfriamento eutético, é onde ocorre o crescimento significativo do eutético, e a mudança na inclinação da curva de resfriamento, neste ponto ocorre devido ao surgimento do calor latente de solidificação do eutético do alumínio. TES (Temperature of the End Solidification), temperatura de solidificação total, corresponde a inflexão na curva de resfriamento, é o mínimo da derivada da temperatura pelo tempo, que fica perto da solidificação, não

precisando, necessariamente o fim da solidificação, sendo melhor determinada a partir da primeira derivada da curva de resfriamento (BARLOW, STEFANESCU, 1997).

No início da solidificação de qualquer fase, as derivadas nas regiões 1, 4 e 6 da curva de resfriamento, Figura 23, aumentam de valor, enquanto no final da solidificação a taxa de resfriamento (primeira derivada) diminui, devido ao gradiente de temperatura menor nas regiões 2 e 5, ver Figura 23.

Na solidificação dendrítica, deve-se distinguir entre o crescimento dendrítico livre, onde os dendritos não se tocam e tem um crescimento livre, e o espessamento dendrítico que ocorre após a ocorrência da coesão dendrítica (Dendrite Coherency), que é uma fração do sólido em que pontas do dendrítico formado entram em contato, resultando num esqueleto dendrítico. As regiões 1 e 2 da curva da taxa de resfriamento, representa o crescimento dendrítico livre, enquanto que a região 3 corresponde ao espessamento dendrítico. A região 6 corresponde ao crescimento e nucleação da fase de  $Mg_2Si$  na liga AA 356.0, o qual foi construído o gráfico da Figura 23 (BARLOW, STEFANESCU, 1997).

### 3.2 Curva Zero

Segundo Barlow e Stefanescu (1997), a curva zero representa a derivada temporal da curva de resfriamento de uma liga, no qual supõe que o metal fundido não sofre nenhuma e qualquer transformação de fase. É uma curva teórica imaginária no qual a área, na região entre a curva zero e a curva da taxa de resfriamento do metal, representa o calor de solidificação. A curva zero pode ser calculada por diversos modos e análises, sendo que a escolha de cada método para a construção da curva interfere de forma significativa na obtenção da curva zero. Abaixo são apresentadas as seguintes análises para a obtenção da curva zero:

- Análise Newtoniana;
- Análise empírica, com um coeficiente de transferência de calor;
- Análise empírica, com três coeficientes de transferência de calor;
- Análise de Fourier.

Neste trabalho serão focados dois métodos de análise e construção da curva zero que nos interessam: análise Newtoniana e a análise de Fourier.

Pela análise Newtoniana, assume-se que a mostra sofre resfriamento newtoniano, isso significa que o gradiente térmico em toda amostra é considerado zero e que a transferência de calor se dá, entre o fundido e o molde por convecção, assim a curva zero pode ser obtida igualando a taxa de perda de calor para o ambiente com a taxa de calor cedida pela amostra de metal fundido.

Pela Equação 1 da análise newtoniana, podemos obter a curva zero.

$$hA(T - T_0) = V\rho C_p \left( \frac{dT}{dt} \right) \quad (1)$$

onde:  $h$  é o coeficiente de transferência de calor,  $A$  é a área da superfície no qual o calor é perdido,  $T$  é a temperatura instantânea da amostra,  $T_0$  a temperatura do ambiente,  $V$  é o volume específico da amostra,  $C_p$  é o calor específico da amostra, e  $dT/dt$  é a taxa de resfriamento. Resolvendo para  $dT/dt$ , a curva zero é encontrada.

A análise de Fourier, admite que a transferência de calor ocorra somente por condução, e a curva zero é obtida pela seguinte Equação 2.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \frac{1}{c_v} \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (2)$$

onde  $C_v$  é o calor específico volumétrico, e  $Q$  é o calor envolvido durante a solidificação, rearranjando a Equação 2 e admitindo que para a Equação 3, temos:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = c_v \left( \frac{\partial T}{\partial t} - Z_F \right) \quad (3)$$

A equação 4:

$$Z_F = \alpha \nabla^2 T \quad (4)$$

onde,  $Z_F$  é a curva zero de Fourier. Para o Cálculo desta curva o campo de temperatura deve ser conhecido. Para um molde cilíndrico este campo pode ser calculado pela Equação 5:

$$\nabla^2 T = \frac{4(T_2 - T_1)}{R_2^2 - R_1^2} \quad (5)$$

onde,  $T_2$  e  $T_1$  são as temperaturas radiais, e necessitam estar pertos umas das outra.

A diferença entre a análise da curva de resfriamento pelo método de Fourier e o método Newtoniano está no fato de que os parâmetros termofísicos são considerados variáveis na análise de Fourier, calculados pela Equação 6 mostrada abaixo:

$$\alpha = \frac{\partial T / \partial t}{\nabla^2 T} \quad (6)$$

Então, em outros a iteração começa, assumindo a fração de sólido na curva como sendo linear, e é obtida pela Equação 7:

$$f_S = \frac{T - T_s}{T_e - T_s} = \frac{t - t_s}{t_e - t_s} \quad (7)$$

onde,  $f_s$  é a fração de sólido, e os subscrito “s” e “e” dizem respeito ao início da solidificação ao fim da solidificação. Com a Equação 8 é possível determinar as propriedades termofísicas por interação, como mostrado nas Equações 8 e 9.

$$\alpha(t) = \alpha_s [1 - f_S(t)] + \alpha_e f_S(t) \quad (8)$$

$$c_v(t) = c_v [1 - f_S(t)] + c_v f_S(t) \quad (9)$$

O calor latente e a fração de sólido são calculados através das Equações 10 e 11, mostradas a seguir:

$$L = \int_{t_s}^{t_e} \left( \frac{\partial Q}{\partial t} \right) (t) dt \quad (10)$$

$$f_S(t) = \frac{1}{L} \int_{t_s}^t \left( \frac{\partial Q}{\partial t} \right)_{it} (t) dt \quad (11)$$

A Equação 2 e as Equações de 8 a 11 são usadas para calcular iterativamente a curva de zero de Fourier. A Figura 24 mostra curva zero calculado pelas equações de Fourier. O fim da solidificação do metal fundido é observado na curva de resfriamento, quando a primeira derivada da curva de resfriamento em função do tempo coincide com a curva zero calculado pela análise de Fourier, isto pode ser observado na Figura 24 e no ponto 7 da Figura 23 onde a primeira derivada da curva de resfriamento em função do tempo assume o mínimo valor (BARLOW, STEFANESCU, 1997).

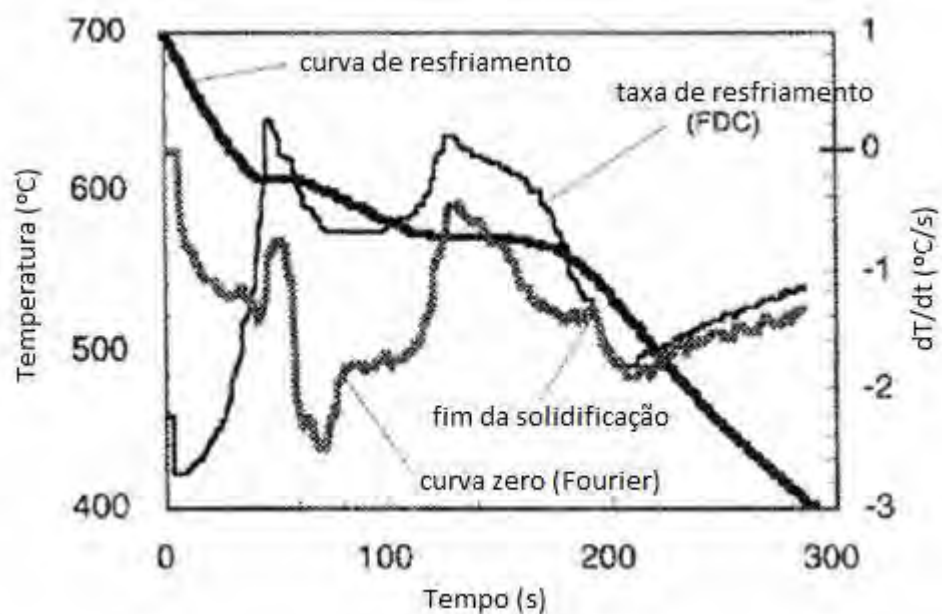


Figura 24 Curva de resfriamento com sua primeira derivada e o cálculo da curva zero pela análise de Fourier (BARLOW, STEFANESCU, 1997).

### 3.3 Determinação da coesão dendrítica.

A ocorrência da coesão dendrítica (Dendrite Coherency), representa uma fração do sólido em que pontas do dendrítico formado entram em contato, resultando num esqueleto dendrítico.

E para a determinação da coesão dendrítica na curva de resfriamento, o método que permite visualizar esse evento é a inserção de dois termopares no metal fundido, um no centro da solidificação do metal e o outro na parede, entre o molde e o metal fundido. Na curva de resfriamento mostrado na Figura 25 é identificada como o mínimo da curva, representado pelo número 3 sobre a curva, quando a coesão dos dendritos termina no centro, começa o espessamento dos dendritos e quando o delta T começa retornar para o estado estacionário, com os dendritos já espessos em todo o material fundido, ao invés de retornar para o valor de estado estacionário após a região 3, a curva de diferença de temperatura indica um outro evento na região 3a. Esta é a precipitação da fase do ferro na liga AA 356.0 (BARLOW, STEFANESCU, 1997).

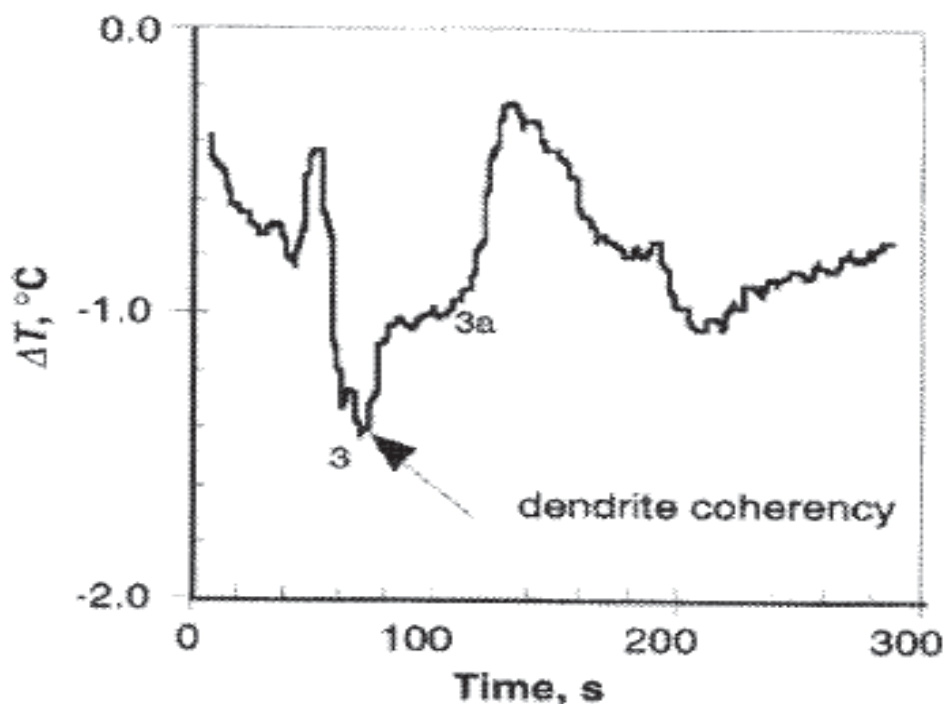


Figura 25 Curva da diferença de temperatura entre o centro e a parede da liga Al-7%Si (BARLOW, STEFANESCU, 1997).



### 3.4 Materiais e Métodos

O método utilizado para a confecção, análise e comparação das curvas de resfriamento da liga AA 356.0, neste trabalho, consistiu na obtenção e monitoramento da temperatura ao longo do tempo através de termopares instalados no centro e na interface da parede e do metal fundido, dos moldes de areia e metálico.

Os materiais utilizados para a aquisição das amostras e dos dados para o levantamento das curvas de resfriamento, são além dos mencionados anteriormente no subitem 2.3. para a fundição das amostras, foram utilizadas as ferramentas a listadas a seguir para a aquisição dos dados de levantamento das curvas e resfriamento:

- 1 par de termopares para cada amostra fundida em molde metálico e molde de areia;
- Um sistema de armazenamento das temperaturas de solidificação, termômetro da marca “*Minipa T-600*”;
- Um computador para levantamento e trabalho dos dados obtidos pelo termômetro “*Minipa T-600*”;

A figura 26 ilustra a configuração montada dos termopares e do sistema de aquisição e armazenamento dos dados da temperatura de solidificação por segundo, para o molde metálico

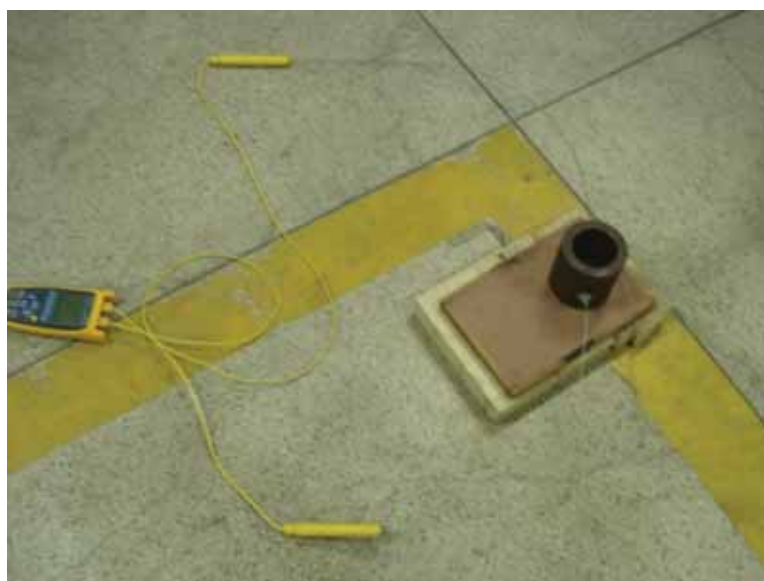


Figura 26 Montagem do experimento utilizado para o levantamento da curva de resfriamento da liga AA 356.0 no molde metálico.

### 3.5 Resultados

Para o molde de areia foi realizado a mesma configuração com a utilização das mesmas ferramentas e metodologia empregada para o molde metálico. A Figura 27 a seguir mostra a curva de resfriamento obtida para a fundição da liga AA 356.0 utilizando molde metálico.

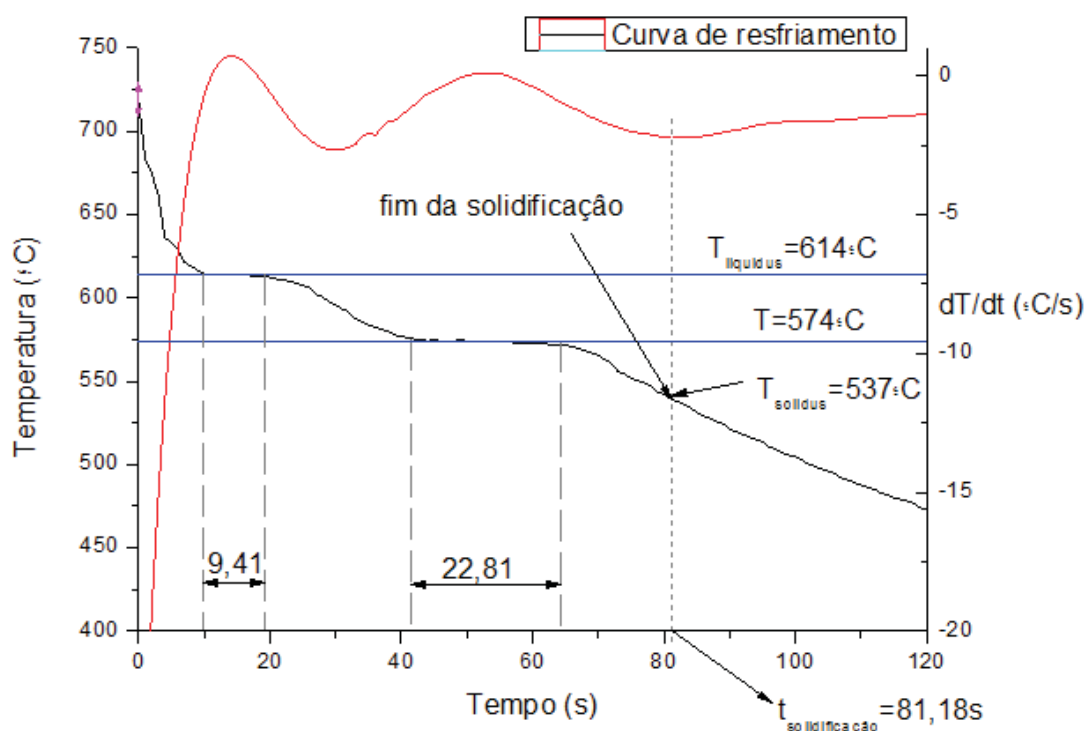


Figura 27 Curva de resfriamento da liga AA 356.0 em molde metálico.

A Figura 28 ilustra a curva de resfriamento obtida para a fundição da liga AA 356.0 utilizando molde areia.

Observando as curvas de resfriamento, Figuras 27 e 28, obtidas com a fundição da liga AA 356 em molde metálico e em molde de areia, nota-se que o tempo de resfriamento da liga em molde metálico é menor do que em molde de areia, mas que as temperaturas do patamar de solidificação da fase  $\alpha$ -Al (formação dos dendritos primário),  $616^{\circ}\text{C}$  (metálico) e  $615^{\circ}\text{C}$  (areia), e as temperaturas do patamar da formação do eutético da liga,  $574^{\circ}\text{C}$  (metálico e areia), se mantêm praticamente iguais de um

para o outro, alterando-se, de um para outro, apenas no tempo de resfriamento na curva de resfriamento.

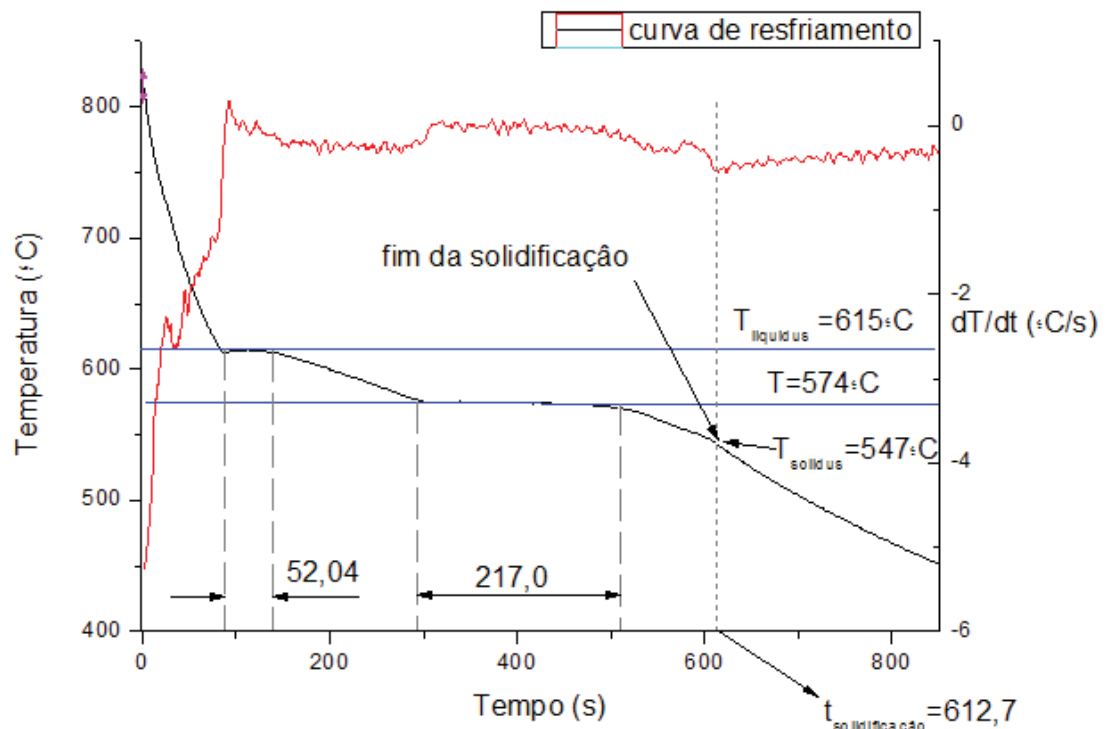


Figura 28 Curva de resfriamento da liga AA 356 em molde de areia.

Também podemos notar que a solidificação da liga AA 356 nos dois moldes, metálico e de areia, ocorre praticamente na mesma temperatura. Sendo possível concluir que o tipo de molde não interfere significativamente nas características da curva de resfriamento da liga AA 356.

## 4. REFINAMENTO DE GRÃOS

A prática de refinamento de grãos em ligas de alumínio é um método muito utilizado pelas indústrias com o objetivo de se obter uma melhora nas propriedades mecânicas do alumínio, tais melhoramentos podem ser observados com essa técnica, como: aumento da resistência mecânica, acabamento superficial uniforme, reduções de tensões residuais internas, diminui a tendência a trincas de solidificação, entre outras (ARANGO, MARTORANO, 2011).

### 4.1 Refinadores de grãos

Comumente usado para se obter estruturas de grãos equiaxiais relativamente refinadas e de grãos uniformes, os refinadores mais conhecidos e utilizados para as ligas de alumínio são: Ti-Al, Al-Ti-C, Al-B e Al-Ti-B. Neste trabalho foi escolhido para análise o refinador Al-Ti-B.

O refinador Al-Ti-B, quando utilizado na fundição da liga de Al- Si, apresenta a formação de dois tipos diferentes de partículas: o diboreto de titânio ( $TiB_2$ ) e alumineto de titânio ( $TiAl_3$ ). O diboreto de titânio ( $TiB_2$ ) é um material cerâmico muito estável e inerte, que não é dissolvido no alumínio líquido, dessa forma um grande número dessas partículas ficam disperso no alumínio fundido funcionando como centros ativos de nucleação durante a solidificação (nucleação heterogênea). O alumineto de titânio ( $TiAl_3$ ), diferentemente do diboreto de titânio ( $TiB_2$ ), se dissolve rapidamente no alumínio fundido. O mecanismo do refino de grãos pode ser observado na análise da curva de resfriamento, quando na fase da nucleação, crescimento dos primeiros núcleos de sólido, um calor latente de transformação do líquido para o sólido é liberado, fazendo com que haja o resfriamento do metal, diminuindo sua taxa de resfriamento (ABM, 2011).

O uso de refinadores da fase alfa do alumínio, que é o caso de estudo deste trabalho, é uma prática comum, o refino dos grãos com este refinador melhora a capacidade de alimentação interdendrítica e melhora a distribuição de segundas fases.

De acordo com Furlan (2008), o mecanismo de funcionamento dos refinadores à base de titânio, seja a formação de partículas de  $TiAl_3$  que nucleia o alumínio pela Reação Peritética (12) mostrada a seguir:



A Figura 29 ilustra o esquema de nucleação do alumínio pela Reação Peritética 12, onde aluminetos de titânio estão dispersos no metal líquido de alumínio na fase alfa (FURLAN, 2008).

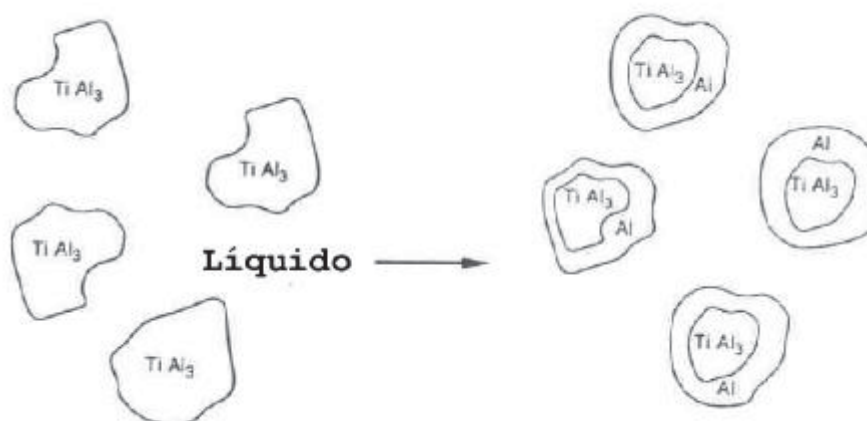


Figura 29 Esquema da nucleação do alumínio pela reação peritética.

No caso do refino de grão pelo efeito do diboreto de titânio ( $TiB_2$ ), existem muitas discussões e teorias controversas sobre os mecanismos de atuação desta partícula no efeito da nucleação do alumínio líquido, muitos pesquisadores realizaram trabalhos para explicar melhor os mecanismos de refinamento de grãos em ligas de alumínio.

Aparentemente o mecanismo de refinamento é muito simples: um grande número de potentes sítios para nucleação heterogênea é disperso no metal líquido; uma quantidade destes sítios converte-se em centros ativos durante a solidificação para promover nucleação do sólido. Porém não existe um consenso entre os pesquisadores

desta área, e os detalhes do mecanismo de refino de grão não estão bem esclarecidos. A seguir, iremos discutir algumas das teorias mais aceitas no meio científico.

#### 4.1.1 Teoria do diagrama de fases

De acordo com Arango (2009), a teoria sugere que o refinamento dos grãos acontece porque partículas de alumineto de titânio ( $\text{Al}_3\text{Ti}$ ) estão presentes no alumínio fundido acima da temperatura de fusão, e funciona como nucleantes ativos da solidificação do alumínio na fase alfa de acordo com a reação peritética 1 apresentado anteriormente. A figura 30 mostra o diagrama de fases peritético do sistema Al-Ti em que este evento acontece.

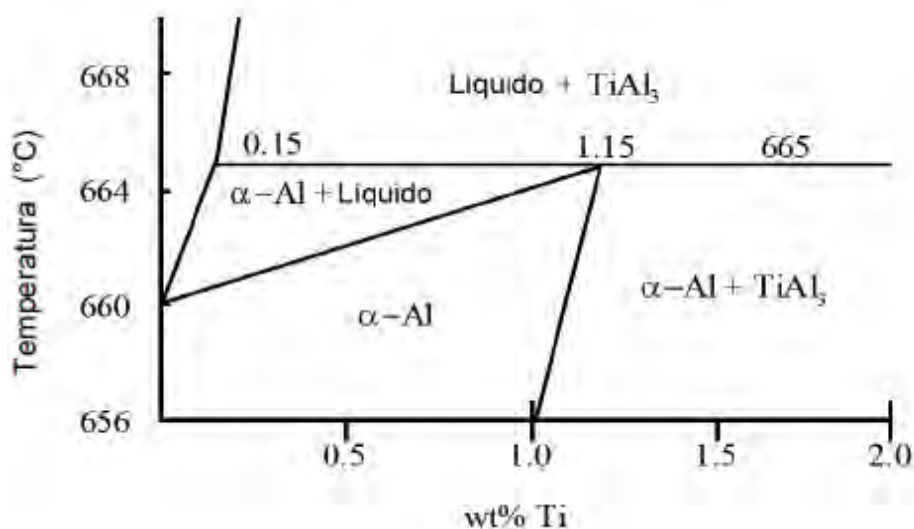


Figura 30 Diagrama de fase peritético do sistema Al-Ti.

#### 4.1.2 Teoria dos Carbonetos-Boretos

Nesta teoria, acredita-se que adições de Al-Ti promovem a formação de partículas de  $\text{TiC}$ , por partículas residuais, eventualmente, presentes de carbono no fundido de alumínio. E por outro lado a adição de um inoculante do tipo Al-Ti-B há a

formação de partículas de  $TiB_2$  dispersos no metal líquido, e diz que tanto as partículas de  $TiB_2$  quanto  $TiC$  são consideradas insolúveis no metal líquido e podendo assim atuarem como sítios de nucleação heterogênea na solidificação do alumínio na fase alfa (ARANGO, 2009).

#### 4.1.3 Teoria do envoltório peritético

Trata de explicar o efeito da presença de boro no metal líquido, juntamente com presença de partículas de  $Al_3Ti$ , desacelerando a dissolução desta partícula e auxiliando no efeito nucleador dela no metal, pela existência de um envoltório de partículas de  $TiB_2$  nas partículas de  $Al_3Ti$ . Por outro lado, evidências experimentais em microscópio eletrônico identificaram presença de  $TiB_2$  no centro das partículas de  $Al_3Ti$ , com ausência do envoltório de  $TiB_2$  (ARANGO, 2009).

#### 4.1.4 Teoria da nucleação dúplex

É a mais aceita atualmente e se baseia em estudos de adição de partículas de  $TiB_2$  diretamente no alumínio líquido. Este estudo mostra, que com a ausência de Ti no alumínio, as partículas de  $TiB_2$  aparecem no contorno de grão, evidenciando que estas partículas não agiram como sítios de nucleação heterogênea. Com a adição de titânio acima de 0,01%, as partículas de  $TiB_2$  agiram como centros nucleadores. E com adições de  $Ti < 0.15\%$  como para  $Ti > 0.15\%$ , as partículas de  $TiB_2$  foram recobertas por uma camada de  $Al_3Ti$  rodeadas por  $\alpha-Al$ , sendo essas partículas chamadas de partículas duplex (ARANGO, 2009). A figura 31 ilustra uma partícula duplex encontrada num sistema de inoculação Al-Ti-B, percebe-se, a partícula maior de  $TiAl_3$  sendo rodeada pelas partículas menores de  $(Al, Ti)B_2$  agregadas a superfície (FURLAN, 2008).

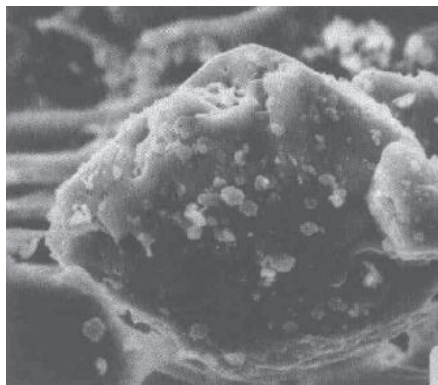


Figura 31 Partícula duplex no sistema Al-Ti-B aumentada 1870 vezes.

## 4.2 Resultados

### 4.2.1 Análise da curva de resfriamento

Para a obtenção da amostra da liga AA 356 com refinamento de grãos, foi utilizado a adição de 5g do refinador Al-5%Ti-1%B. Neste trabalho utilizou-se para comparação do efeito da inoculação do refinador de grão do tipo Al-5%Ti-1%B sobre a liga AA 356, a fundição da liga AA 356 em molde de areia. Em todo o tempo a monitoração e aquisição da temperatura foram feitas, termopares instalados no centro e na interface da parede/fundido do molde de areia e um sistema de aquisição garantiram o levantamento da curva de resfriamento da solidificação da liga AA 356 com refinador de grão tipo Al-5%Ti-1%B.

A Figura 31 apresenta a curva de resfriamento obtido pela amostra com adição do refinador de grão Al-5%Ti-1%B.

Para a inoculação do refinador sobre a liga AA 356, a fundição ocorreu da seguinte forma: a primeira etapa ocorreu com a fundição da liga no forno a 850°C, depois de um tempo quando o material já no seu estado líquido adicionou-se o refinador do tipo Al-5%Ti-1%B na quantidade de 5g para 500g da liga AA 356, agitando-se o metal fundido no cadinho com uma haste metálica com o cuidado para se conseguir uma adição do inoculador à liga mais homogeneia possível, logo em seguida retorna-se o fundido do cadinho, com o inoculante Al-Ti-B, para o forno, até que atinja a temperatura de envasamento de 850°C novamente.



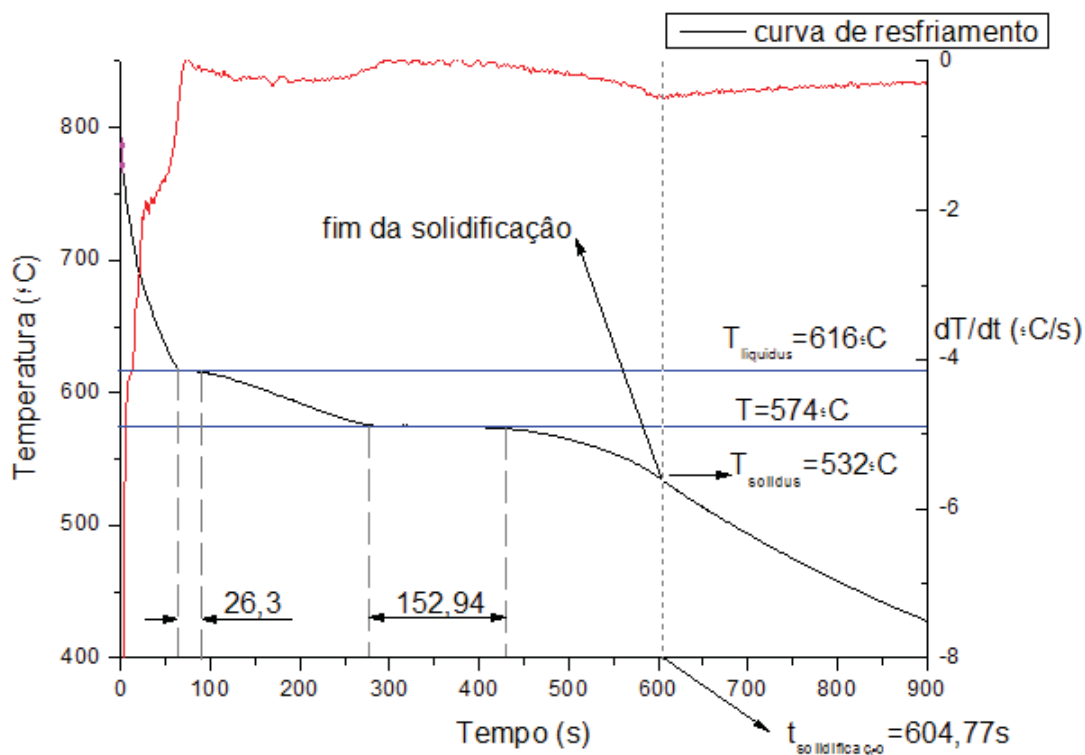


Figura 32 Curva de resfriamento para a liga AA 356 com a inoculação do refinador Al-Ti-B em molde de areia.

A análise da curva de resfriamento para a liga AA 356 com adição de 5g do inoculante tipo Al-5%Ti-1%B, em molde de areia demonstrou, que a adição de Ti na forma da liga-mãe Al-5%Ti-1%B resultou em uma redução significativa dos patamares e no seu tempo, observado nas curvas de resfriamento das Figuras 28 e 31.

A adição de inoculante não altera significativamente a curva de resfriamento, obtendo-se valores de temperatura dos patamares de solidificação do Al- $\alpha$  e de formação da estrutura eutética muito próximas ou iguais a da liga sem a adição do refinador Al-5%Ti-1%B, observa-se também que o tempo do fim da solidificação e da temperatura ocorre muito parecido com a liga sem adição de inoculante no esmo tipo de molde, neste caso o de areia.

#### 4.2.2 Análise da macroestrutura

A macroestrutura obtida pela inoculação do refinador de Al-5%Ti-1%B pode ser observada na Figura 33, percebe-se que os tamanhos dos grãos formados na

macroestrutura são bem menores, se comparado com os grãos da macroestrutura da amostra, da mesma liga, sem adição do refinador, ver Figura 17, que se utilizou do mesmo tipo de molde em areia.

A macroestrutura obtida com o refinador obteve uma região equiaxial bem mais fina e distribuída dos grãos, do que a liga sem o inoculante de Al-5%Ti-1%B, observa-se que a presença de poros ainda permanece na amostra com o refinador, devido à presença de hidrogênio dissolvido no metal líquido, mas percebe-se, visualmente, que os poros obtidos com na amostra apresenta um tamanho de menor em relação a amostra da liga, sem inoculante, vazada em molde de areia, onde, visualmente o tamanho dos poros presente e maior.



Figura 33 Macroestrutura da liga AA 356 com adição do refinador de Al-Ti-B.

Observando mais detalhadamente a macroestrutura da amostra com inoculante, percebe-se a estrutura dendrítica refinada, reduzindo drasticamente o tamanho dos grãos, e a inexistência dos indesejáveis grãos colunares, obtendo-se grãos equiaxiais em toda macroestrutura da amostra.

## 5. CONCLUSÃO

Os resultados do presente trabalho possibilitaram concluir:

1) A utilização de dois tipos de molde interferem significativamente na macroestrutura da liga AA 356, onde a utilização do molde metálico é possível observar o aparecimento das três zonas de solidificação na macroestrutura do material (coquilhada, colunar e equiaxial) devido a taxa e velocidade de resfriamento, neste tipo de molde, ser maior do que o de areia aglomerada com resina, e tamanho do grãos menores do que no molde de areia, onde observa-se uma estrutura grosseira dos grãos e a ausência de grão colunares na macroestrutura.

2) A utilização de diferentes tipos de molde, areia e metálico, não interfere, significativamente, nas características da curva de resfriamento da liga de alumínio AA 356.0, apenas diferenciando uma curva da outra no tempo de solidificação e formação dos patamares, da formação dos dendritos primários (fase  $\alpha$ -Al) e do eutético da liga, onde para a solidificação da liga no molde metálico ocorre num tempo menor devido a sua alta taxa de perda de calor do molde para o ambiente.

3) A utilização do molde de areia para a vazamento da liga AA 356.0, gera na amostra quantidades significativas de poros, devido este conter maior presença de umidade de vapor d'água na areia e no próprio gás atmosférico, no momento da fundição. A presença de vapor d'água na fundição do alumínio gera dissolução de hidrogênio no fundido pela reação de redução do vapor d'água, ocasionando o aparecimento de poros no metal e assim comprometendo suas propriedades mecânicas e resistência a fadiga da liga fundida, métodos de desgaseificação são muito utilizados na indústria para resolver este problema.

4) A utilização do refinador de grão do tipo Al-5%Ti-1%B, na refusão da liga AA 356.0, na quantidade de 5g para 500g da liga, ocasionou uma diminuição significativa no tamanho dos grãos, podendo ser observado na amostra a inexistência dos grãos colunares, tão indesejáveis na maioria dos casos de fundição de metais, e o aparecimento de uma zona, totalmente, de grão equiaxiais na amostra, melhorando

assim as propriedades mecânicas do material, a fluidez e a capacidade de alimentação, dentre outras.

5) A utilização do refinador á liga de alumínio AA 356.0, não alterou, significativamente, as características da curva de resfriamento da liga, cabendo apenas notar uma ligeira redução do tempo de nucleação da fase  $\alpha$ -Al, e do eutético, observados na extensão dos patamares, no eixo da abscissa na curva de resfriamento, onde comparando-se a curva de resfriamento para a liga sem inoculante (Figura 28) do tipo Al-5%Ti-1%B e com o inoculante (Figura 33), verá a redução dos tempos nesses dois patamares.

## REFERÊNCIAS

ARANGO, Juan Marcelo Rojas. **Análise Térmica de Ligas Al-Si com adição de inoculante**. 2009. 128 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO. **ABAL: Fundamentos e Aplicações do Alumínio**. São Paulo: ABAL, 2007. 68 p.

BARLOW, O.;STEFANESCU, D. M.. **Computer-AIDED Cooling Curve Analysis Revisited**. In: TRANSACTION OF THE AMERICAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY. 1997. Alabama – Estados Unidos. University of Alabama Tuscaloosa, Alabama, 1997. v. 105 p. 349-354.

CHEN, Xiang; GENG, Huiyuan; LI, Yanxiang. **Study on the eutectic modification level of Al-7Si Alloy by computer aided recognition of thermal analysis cooling curves**. 2005. Beijing –China. Tsinghua University. Beijing, 2005. p. 283-289.

CONGRESSO ABM-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALÚRGIA, 66, **Estudo de Refino de Grão das Ligas Al-Si através de Inoculantes do sistema Al-Ti-B**. São Paulo: ABM, 2011. p 520-532.

DIVISÃO DE BIBLIOTECAS E DOCUMENTAÇÃO, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio. Disponível em: [www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/.../0511123\\_07\\_cap\\_01.pdf](http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/.../0511123_07_cap_01.pdf). Acesso em 08 novembro 2011.

FURLAN, Tarita Shiraishi. **Influência do Teor de estrôncio na modificação da liga A 356**. 2008. 215 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MOREIRA, Marcelo F.; FOUCO, Ricardo. **Ligas de Alumínio**. Disponível em:  
<http://www.dalmolim.com.br/EDUCACAO/MATERIAIS/Bibliomat/aluminiofund.pdf>.

Acesso em 06 dezembro 2011.

ZANGRANDI, Aelcio. **Alumínio e suas Ligas: Fundamentos metalúrgicos e tecnológicos**. 1ª.ed. Lorena: Instituto Santa Teresa, 2008. 104 p.