

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

**LUCAS MASSAHARU MATSUMOTO**

**ESTUDO DO EFEITO DO MODIFICADOR Al-Sr NO TRATAMENTO  
DE MODIFICAÇÃO DO EUTÉTICO DA LIGA AA356.**

Guaratinguetá  
2012

LUCAS MASSAHARU MATSUMOTO

ESTUDO DO EFEITO DO MODIFICADOR Al-Sr NO TRATAMENTO DE  
MODIFICAÇÃO DO EUTÉTICO DA LIGA 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  
2012

Matsumoto, Lucas Massaharu  
M434e Estudo do efeito do modificador Al-Sr no tratamento de modificação  
do eutético da liga AA356 / Lucas Massaharu Matsumoto – Guaratinguetá  
: [s.n], 2012.  
42 f : il.  
Bibliografia: f. 42

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade  
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012.  
Orientador: Prof. Dr. Carlos Kiyan

1. Microestrutura I. Título

CDU 620.18



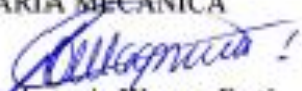
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

ESTUDO DO EFEITO MODIFICADOR DA LIGA Al-Sr NO  
TRATAMENTO DE MODIFICAÇÃO DO EUTÉTICO DA LIGA AA356.

LUCAS MASSAHARU MATSUMOTO

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. Antonio Wagner Forti  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**



Prof. Dr. Carlos Kiyam  
Orientador/UNESP-FEG



Cássia Cavalcanti da Silva  
UNESP-FEG



Prof. Dr. Marcelino P. Nascimento  
UNESP-FEG

## DADOS CURRICULARES

### **LUCAS MASSAHARU MATSUMOTO**

NASCIMENTO 06.02.1986 – CARAGUATATUBA/SP

FILIAÇÃO Tamiko Yamauchi Matsumoto  
Massaru Matsumoto

2008/2012 Curso de Graduação  
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá  
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

aos meus amigos de república e todos que ficaram do meu lado, à minha família, em especial aos meus pais, pelo apoio e incentivo em toda a minha vida acadêmica.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todas as pessoas que estiveram do meu lado nos momentos ruins e bons, em toda a minha vida acadêmica.

A toda a minha família, em especial meus pais e meu irmão, pelo apoio, carinho, incentivo e compreensão em todos os momentos.

Agradeço à todos os meus amigos, principalmente a minha “família” de Guaratinguetá que são os meus amigos da república NÓS S/A pelo companheirismo, irmandade e amizade ao longo dos anos de faculdade, pelos estudos, dificuldades, alegrias e todos os momentos compartilhados.

Agradeço ao meu orientador o Prof. Carlos Kiyam e minha amiga Cássia Cavalcanti da Silva, pelo apoio e direcionamento para realização desse trabalho.

*“Quem já passou por essa vida e não viveu, pode ser mais, mas sabe menos do que eu...”*

(Vinicius de Moraes).

MATSUMOTO, L. M., **Estudo do efeito do modificador Al-Sr no tratamento da modificação do eutético da liga AA356**. 2012. 43f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Câmpus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá 2012.

## RESUMO

A liga AA356 é uma liga muito utilizada na indústria automobilística e aeronáutica devido às suas excelentes propriedades mecânicas. O refino da estrutura eutética de ligas de alumínio silício é uma prática bastante comum na fundição, através do tratamento conhecido como modificação. Pode-se conseguir a modificação pela adição de agentes químicos como os contidos nos grupos I e IIa da Tabela Periódica e as terras raras (europio, cério, praseodímio, neodímio, etc.), têm a capacidade de modificar a estrutura do eutético, mas somente o sódio e o estrôncio produzem uma ação modificadora forte quando utilizada em baixas concentrações. O efeito modificador transforma os veios do silício em uma forma fibrosa e ramificada envolvida pela matriz metálica na forma de uma estrutura composta que apresenta maior limite de resistência à tração, ductilidade e usinabilidade. No presente trabalho serão obtidos lingotes sem e com o agente modificador do tipo Al-10%Sr (90% de alumínio e 10% de estrôncio), feitos em moldes de areia e serão geradas e analisadas as curvas de resfriamento e também o estudo da macroestrutura e da microestrutura dos materiais solidificados. Constatou-se que com a adição do Al-Sr fez com que diminua o tempo de solidificação e diminua o tamanho dos grãos.

**Palavras-chave:** Agente modificador, Macroestrutura, Microestrutura, Liga AA356.

MATSUMOTO, L. M., **Study of the effect of Al-Sr modifier in the treatment of modification of eutectic alloy AA356.** 2012. 43f. Graduate Work (Graduate in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Câmpus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá 2012.

## **ABSTRACT**

The AA356 alloy is an alloy widely used in the automotive industry and aerospace due to its excellent mechanical properties. Refining the structure of eutectic silicon aluminum alloys is a fairly common practice in the foundry through treatment known as modification. This can be achieved by modifying agent adding chemicals such as contained in groups I and IIA of the periodic table and rare earths (europium, céreioi, praseodymium, neodymium, etc.). Has the ability to modify the structure of the eutectic, but only sodium and strontium produce an action modifier strong when used in low concentrations. The modifying effect of the shafts turn silicon into a fibrous form and branched surrounded by metallic matrix in the form of a composite structure that has the highest limit of tensile strength, ductility and machinability. In this work will be obtained ingots with and without the modifier type Al-10% Sr, made in sand molds and are generated and analyzed cooling curves and also the study of the macrostructure and microstructure of the solidified material. It was found that by adding the Al-Sr made shorten the solidification time and lower the grain size.

**KEYWORDS:** Modifier agent, Macrostructure, Microstructure, Alloy AA356.

## LISTA DE FIGUAS

Figura 1 - Etapas para o processo de reciclagem do alumínio (ABAL,2007).....	17
Figura 2 - Principais elementos de liga e classificação das ligas de alumínio.....	22
Figura 3 - Serra hidráulica.....	23
Figura 4 - Corte na seção transversal.....	23
Figura 5 - Serra de fita.....	24
Figura 6 – Cadinho de fundição.....	24
Figura 7 - Forno utilizado para a fundição da liga de alumínio AA356.....	25
Figura 8 - Equipamentos de segurança.....	25
Figura 9 - pinças e bastão para a remoção da coque.....	26
Figura 10 - 60g de resina.....	26
Figura 11 - 30g de catalisador.....	26
Figura 12 - 1500g de areia.....	27
Figura 13 - Material do molde pronto.....	27
Figura 14 - Modelo de madeira.....	27
Figura 15 - Molde pronto.....	28
Figura 16 - Montagem para a leitura da curva de resfriamento.....	28
Figura 17 - Curva de resfriamento da liga AA356 puro.....	31
Figura 18 - Curva de resfriamento da liga AA356 com a adição do Al-Sr.....	32
Figura 19 - macroestrutura sem o agente modificador.....	33
Figura 20 - Macroestrutura com o agente modificador.....	33
Figura 21 - Região transversal sem a adição da liga Al-Sr com aumento de 125X.....	34
Figura 22 - Região transversal sem a adição da liga Al-Sr com aumento de 400X.....	35
Figura 23 - Região transversal com a adição da liga Al-Sr com aumento de 125X.....	35
Figura 24 - Região transversal com a adição da liga Al-Sr com aumento de 400X.....	36
Figura 25 - Região longitudinal sem a adição da liga Al-Sr com aumento de 125X.....	36
Figura 26 - Região longitudinal sem a adição da liga Al-Sr com aumento de 400X.....	37
Figura 27 - Região longitudinal com a adição da liga Al-Sr com aumento de 125X.....	37
Figura 28 - Região longitudinal com a adição da liga Al-Sr com aumento de 400X.....	38
Figura 29 - a) região transversal sem a adição da liga Al-Sr, b) região transversal.....	39
com a adição da liga Al-Sr, c) região longitudinal sem a adição da liga Al-Sr e	
d) região longitudinal com a adição da liga Al-Sr.	

## LISTA DE TABELA

**Tabela 1** - Propriedade do alumínio e algumas propriedades físicas e mecânicas.....19  
do alumínio puro, com grau de pureza 99,996% (LYMAN, 1961)

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>1.1 Objetivos.....</b>	<b>15</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 Considerações Gerais.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2 Características e aplicações do alumínio.....</b>	<b>17</b>
<b>2.3 Ligas de Alumínio.....</b>	<b>19</b>
<b>3.MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>23</b>
<b>3.1.Montagem do molde de areia.....</b>	<b>26</b>
<b>3.2.Curva de resfriamento.....</b>	<b>28</b>
<b>3.3.Procedimento para análise macroscópica.....</b>	<b>29</b>
<b>3.4.Procedimento para análise microscópica.....</b>	<b>30</b>
<b>4. RESULTADOS E DICUSSÕES.....</b>	<b>31</b>
<b>4.1.Análise da curva de resfriamento.....</b>	<b>31</b>
<b>4.2. Análise macroscópica.....</b>	<b>33</b>
<b>4.3. Análise microscópica.....</b>	<b>34</b>
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>41</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>42</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O alumínio AA356, também chamada de liga de alumínio A356 é uma liga muito utilizada na fundição. Ela é largamente utilizada também na engenharia em geral, principalmente no setor aeroespacial e na automobilística para a construção de acessórios de aeronaves, peças fundidas de seção fina, válvulas, coletores de admissão, cabeçotes e blocos de motores, pistão e rodas automotivas, peças estruturais para a indústria aeroespacial, bombas, carcaças, e entre outros. Essa liga tem uma boa combinação de propriedades, como resistência à corrosão, e um bom desempenho em condições de alta pressão e alta temperatura, tornando ideal seu uso para várias aplicações de alto desgaste.

Através das análises macrográficas e das análises micrográficas é possível a determinação de diversas características do material, inclusive a determinação das causas de fraturas, desgastes prematuros e outros tipos de falhas. O refino da estrutura eutética de ligas de alumínio silício é uma prática bastante comum na fundição, através do tratamento conhecido como modificação. O efeito modificador transforma os veios do silício em uma forma fibrosa e ramificada envolvida pela matriz metálica na forma de uma estrutura composta que apresenta maior limite de resistência à tração, ductilidade e usinabilidade. Mas somente o sódio e o estrôncio produzem uma ação modificadora forte quando utilizadas em baixas concentrações.

As propriedades mecânicas de qualquer liga são fortemente dependentes de sua microestrutura, daí a importância de se fazer a análise da microestrutura dessa liga.

A curva de resfriamento é muito importante para a determinação de propriedades termofísicas das ligas e o uso da primeira derivada da curva de resfriamento melhora a precisão na determinação das características da curva.

## 1.1. Objetivos

Este trabalho de graduação tem como objetivos:

- Análise das curvas de resfriamento da liga AA356 sem e com o agente modificador Al-Sr;
- Análise da macroestrutura da liga AA356 sem e com o agente modificador Al-Sr;
- Análise da microestrutura da liga AA356 sem e com o agente modificador Al-Sr.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Considerações Gerais

Descoberto em 1825, o alumínio é o elemento metálico mais abundante na crosta terrestre (cerca de 8,13%) e o terceiro elemento químico mais abundante. Devido à elevada afinidade com o oxigênio, não é costume encontrá-lo como substância elementar mas, sim, em formas combinadas tais como óxidos ou silicatos.

Segundo a Associação Brasileira do Alumínio (ABAL,2007), o alumínio é obtido a partir da bauxita, um minério que deve apresentar no mínimo 30% de alumina para que a produção de alumínio seja economicamente viável. O processo de obtenção do alumínio primário é dividido em três etapas: mineração, refinaria e redução:

- A mineração é uma etapa onde o minério é retirado da natureza na forma de bauxita;
- A refinaria é a parte do processo onde a bauxita se transforma em alumina calcinada, ou seja, essa é a primeira etapa para se chegar ao alumínio metálico;
- A redução é o processo onde a alumina se transforma em alumínio metálico.

O alumínio começou a ser produzido há cerca de 150 anos, sendo assim o metal mais jovem a ser usado em escala industrial. A sua produção atual supera a soma de todos os outros metais não ferrosos.

O alumínio é o material mais lembrado quando se fala em reciclagem devido, principalmente, às suas propriedades que permitem que ele seja reutilizado inúmeras vezes sem perder suas características físico-químicas, pelo valor econômico atrativo e pela boa disponibilidade. O material pode ser reciclado a partir de sucatas de produtos que não possuem mais vida útil ou de sobras do processo produtivo. Latas de refrigerante, utensílios domésticos, esquadrias de portas e janelas, componentes de fabricação automotiva e muitos outros podem ser reutilizados e empregados na obtenção de produtos novos, sem que o reaproveitamento implique perda de qualidade do metal.

O processo de reaproveitamento da sucata do alumínio obedece às seguintes etapas ilustradas na FIGURA 1(ABAL, 2007).

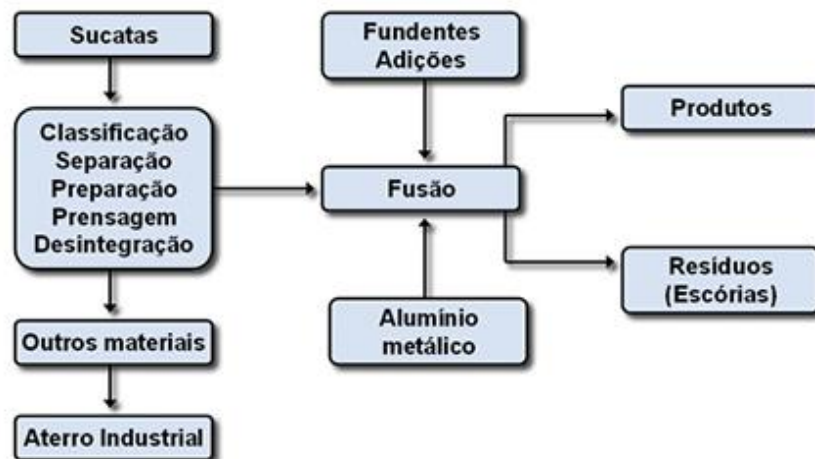


Figura 1: Etapas para o processo de reciclagem do alumínio (ABAL,2007).

## 2.2. Características e aplicações do alumínio

É um metal leve, macio e resistente. Possui um aspecto cinza prateado e fosco, devido à fina camada de óxido que se forma rapidamente quando exposto ao ar. O alumínio puro possui tensão aproximada de 19 MPa e 400 MPa se inserido dentro de uma liga. Sua densidade é de aproximadamente  $2,7 \text{ g/cm}^3$ . É muito maleável, muito dúctil, apto para a mecanização e fundição, além de ter uma excelente resistência à corrosão e durabilidade devido à camada protetora de óxido. É o segundo metal mais maleável, perdendo apenas para o ouro, e o sexto mais dúctil.

O alumínio é um dos metais mais utilizados no mundo todo devido às suas características que abrangem um leque muito grande de aplicações. Ele mostra uma excelente performance e propriedades superiores na maioria das aplicações.

Por ser um metal muito leve, ele é muito bom nas indústrias de transportes, devido ao baixo consumo de combustível, menor desgaste, mais eficiência e capacidade de carga.

O metal é um excelente meio de transmissão de energia, seja elétrica ou térmica. A condução elétrica do alumínio pode-se equiparar com a do cobre, que é duas vezes mais pesado e, conseqüentemente, mais caro. Por isso, o alumínio é muito utilizado pelo setor de fios e cabos. Também oferece um bom ambiente de aquecimento e resfriamento. Trocadores e dissipadores de calor em alumínio são utilizados em larga

escala nas indústrias alimentícia, automobilística, química, aeronáutica, petrolífera, etc. Para as embalagens e utensílios domésticos, essa característica confere ao alumínio a condição de melhor condutor térmico, o que na cozinha é extremamente importante (ABAL, 2007).

O alumínio oferece uma excepcional resistência a agentes externos, intempéries, raios ultravioleta, abrasão e riscos, proporcionando elevada durabilidade, inclusive quando usado em ambientes agressivos (ABAL, 2007).

Por ser um metal muito maleável e dúctil o alumínio permite à indústria utilizá-lo de diversas formas. Suas propriedades mecânicas facilitam sua conformação e possibilitam a construção de formas adequadas aos mais variados projetos (ABAL, 2007).

O alumínio tem uma alta proteção natural que só é destruída por uma condição agressiva ou por determinada substância que dissipe sua película de óxido. Essa propriedade facilita a conservação e a manutenção das obras, em produtos como portas, janelas, forros, telhas e revestimentos usados na construção civil, bem como em equipamentos, partes e estruturas de veículos de qualquer porte. Nas embalagens é fator decisivo quanto à higienização e barreira à contaminação (ABAL, 2007).

Ao mesmo tempo em que o alumínio possui um alto grau de maleabilidade, ele também pode ser trabalhado de forma a aumentar sua propriedade mecânica natural. Com uma resistência à tração de 90 MPa, por meio do trabalho a frio, essa propriedade pode ser praticamente dobrada, permitindo seu uso em estruturas, com excelente comportamento mecânico, aprovado em aplicações como aviões e trens (ABAL, 2007).

Seja pela oxidação superficial ou pela pintura, o alumínio assume a aparência adequada para aplicações em construção civil, por exemplo, com acabamentos que reforçam ainda mais a resistência natural do material à corrosão (ABAL, 2007).

A Tabela 1 apresenta algumas propriedades do alumínio (elemento químico) e do alumínio super puro (99,996% de pureza)

**Tabela 1.** Propriedade do alumínio e algumas propriedades físicas e mecânicas do alumínio puro, com grau de pureza 99,996% (CHIAVERINI, 1978)

Propriedades do elemento químico alumínio		
Número atômico	13	
Massa atômica	26,98	g/mol
Estrutura cristalina (CFC)	$a = 4,049 \times 10^{-8}$	cm
cor	Branca Azulada	
Ocorrência	Minérios (bauxita)	
Propriedades do alumínio com 99,996% de pureza		
Densidade (20°C)	2,6989	g/cm <sup>3</sup>
Temperatura de fusão	660,2	°C
Calor latente de fusão	395,6	kJ/Kg
Condutividade elétrica	64,94	%IACS (a)
Condutividade térmica (25°C)	237,0	W/m.C
Resistência elétrica (20°C)	2,65	μΩ.cm
Coefficiente de dilatação térmica (20°C á 100°C)	$2,36 \times 10^{-5}$	°C <sup>-1</sup>
Tensão de escoamento (recozido)	11,7	MPa
Resistência à tração (recozido)	46,9	MPa
Alongamento (recozido)	60	%
Módulo de elasticidade (recozido)	62,1	GPa
(a) IACS – International Annealed Copper Standard (Padrão Internacional de Cobre Recozido). 100% IACS corresponde a uma resistência elétrica de 1,724 Ω.cm		

### 2.3. Ligas de Alumínio

Historicamente, as ligas de alumínio foram desenvolvidas com a finalidade de aumentar a resistência mecânica do alumínio puro, que apesar da elevada ductilidade e boa resistência à corrosão, apresentam baixas propriedades mecânicas (MAZZOLANI, 1995).

As ligas de alumínio, com base no processo de fabricação, são divididas em dois grandes grupos: os grupos das ligas trabalhadas ou dúcteis e o grupo das ligas para fundição ou fundidas. Dentro de cada grupo há dois subgrupos, os tratáveis termicamente e os não tratáveis termicamente. O subgrupo das ligas não tratáveis termicamente tem as suas propriedades alteradas apenas por trabalho a frio ou encruamento (ZANGRANDI, 2008).

O principal tratamento térmico consiste em “solubilização” seguida de “endurecimento por precipitação”. O princípio consiste em promover-se a solução de fases duras e posteriormente precipitá-las (CHIAVERINI, 1978).

Quando o alumínio fundido se solidifica, alguns dos materiais dissolvidos podem ser retidos em solução sólida, fazendo com que a estrutura atômica do metal se torne mais rígida.

Um dos aspectos que tornam as ligas de alumínio tão importante aos materiais de construção mecânica é o fato de o alumínio poder combinar-se com a maioria dos metais de engenharia, chamados de elementos de liga. Com essas associações, é possível obter características tecnológicas ajustadas de acordo com a aplicação do produto final. Mas para isso é preciso conhecer bem as vantagens e limitações de cada elemento para fazer a melhor seleção (ABAL, 2007).

A função de cada elemento da liga se altera de acordo com a quantidade dos elementos presentes na liga e com a sua interação com outros elementos. Em geral, podemos dividir os elementos entre (ABAL, 2007):

- Elementos que conferem à liga a sua característica principal (resistência mecânica, resistência à corrosão, fluidez no preenchimento de moldes, etc.) (ABAL, 2007);

- Elementos que têm função acessória, como o controle de microestrutura, de impurezas e traços que prejudicam a fabricação ou a aplicação do produto, os quais devem ser controlados no seu teor máximo (ABAL, 2007).

A composição química do alumínio e suas ligas são expressas em percentagem, obedecendo a Norma NBR 6834 da ABNT. Esta norma abrange sistemas de classificação das ligas trabalháveis, das ligas para fundição, peças, lingotes e de alumínio primário, além de densidade nominal das ligas trabalháveis de alumínio (ABAL, 2007).

**- Ligas da série 3XXX:**

Uma das mais utilizadas. Sua conformabilidade e a resistência à corrosão são similares às do alumínio comercialmente puro (ligas da série 1XXX), com propriedades mecânicas um pouco maiores, particularmente quando deformadas a frio (ABAL, 2007).

**- Ligas da série 5XXX:**

São as mais resistentes. Estão disponíveis em vários formatos, como lâminas, chapas, perfis, tubos, arames, etc. Elas também possuem elevada resistência à corrosão e são facilmente produzidas e soldadas (ABAL, 2007).

**- Ligas tratadas termicamente de média resistência:**

Contêm magnésio e silício (ligas da série 6XXX) e possuem elevada resistência à corrosão, mas perdem um pouco da sua capacidade de serem trabalhadas (o que, em seções estruturais retas, muito difundidas em aplicações estruturais, é irrelevante) (ABAL, 2007).

**- Ligas tratadas termicamente de elevada resistência:**

Têm no cobre (série 2XXX) ou zinco (série 7XXX) o principal elemento de liga. São tão resistentes quanto o aço estrutural, mas necessitam de proteção superficial. Estas ligas são utilizadas quando o fator resistência/peso for o principal, como na aviação (ABAL, 2007).

Diferentemente dos materiais trabalháveis, que estão sujeitos a uma variação dos processos de aquecimento e de resfriamento, as ligas de fundição adquirem suas propriedades na condição de fundida (em alguns casos, com tratamento térmico) e, conseqüentemente, um grupo diferente de ligas tem sido formulado para a produção de peças fundidas (ABAL, 2007).

As ligas empregadas nas aplicações gerais de engenharia frequentemente contêm silício para melhorar suas características de fundição, tais como fluidez (no vazamento) e resistência a trincas de contração (quando o metal quente se solidifica e se contrai) (ABAL, 2007).

O cobre também é frequentemente utilizado como um elemento de liga, para proporcionar às propriedades mecânicas, maior dureza e resistência exigidas em serviço. As ligas alumínio-magnésio apresentam maiores problemas na fundição, mas possuem

boa resistência e ductilidade. Elas são amplamente utilizadas, particularmente, em ambientes agressivos, como em peças e acessórios de navios. Uma pequena proporção de magnésio também está presente em algumas ligas em conjunto com silício, para tornar a liga mais suscetível a tratamentos térmicos.

A principal função das ligas de alumínio é aumentar a resistência mecânica sem prejudicar as outras propriedades. Assim, novas combinações de ligas de alumínio são feitas de modo a ser aplicada em diferentes tipos de funções.

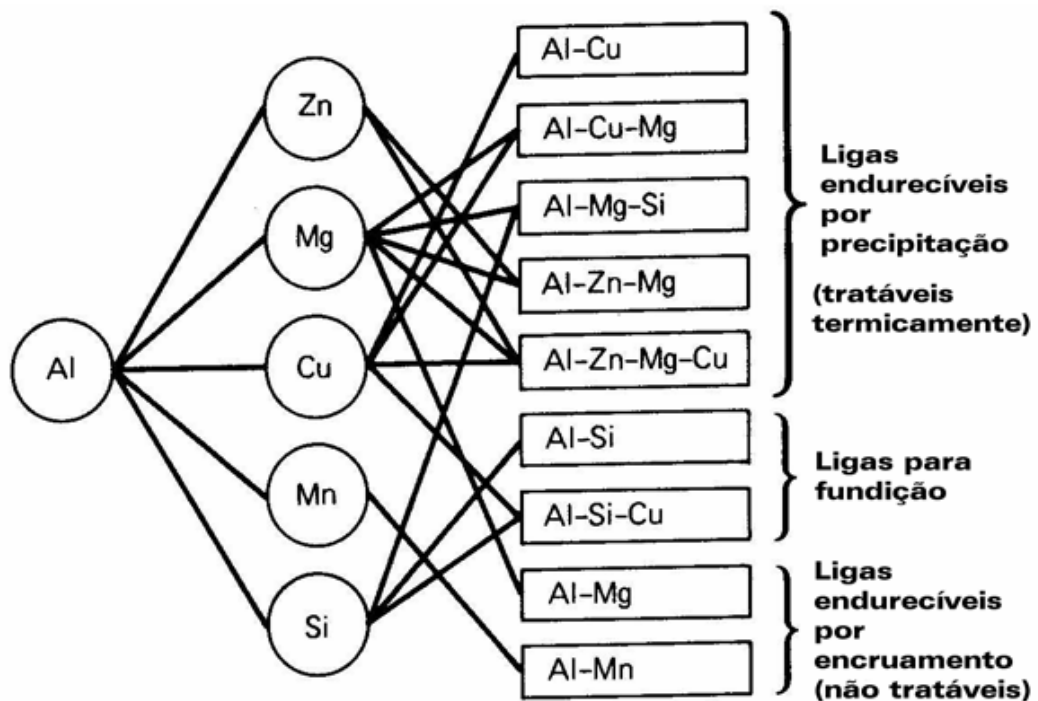


Figura 2: Principais elementos de liga e classificação das ligas de alumínio (DEAN, 1990).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado nesse trabalho foi a liga de alumínio AA356 que foi doado pela Alcoa, na forma de lingote-padrão de 22,5 kg por unidade, com comprimento de 760mm, largura de 160mm e altura de 100mm.

O lingote-padrão foi cortado em pedaços menores. Primeiramente com uma serra hidráulica (Figura 3), cortando-a na região transversal de aproximadamente 2 cm de espessura como ilustrado na Figura 4.



Figura 3: Serra hidráulica



Figura 4: Corte na seção transversal

Em seguida o material foi cortado em pedaços ainda menores de aproximadamente  $8 \text{ cm}^3$  ( $2 \times 2 \times 2 \text{ cm}$ ), utilizando uma máquina que utiliza uma serra de fita como instrumento de corte, ilustrado na Figura 5. Esses pedaços de  $8 \text{ cm}^3$  foram feitos para ser colocados em um cadinho de fundição de aproximadamente 300ml de capacidade volumétrica (Figura 6).



Figura 5: Serra de fita



Figura 6: Cadinho de fundição

Na sequência, com o cadinho já com as peças devidamente cortadas, ele foi levado ao forno (Figura 7), com os equipamentos de segurança adequados, como óculos

de segurança, luvas de couro e roupas adequadas de couro, ilustradas na Figura 8, e ainda pinça para a colocação e a retirada do cadinho do forno, pinça para segurar o cadinho no momento do derramamento do material fundido no molde de areia e um bastão para a retirada da escória ou óxido da superfície da liga de alumínio fundido (Figura 9). O cadinho foi mantido no forno onde a temperatura é aumentada gradativamente até a retirada a 900°C, fazendo com que houvesse a fundição da liga de alumínio dentro do cadinho.



Figura 7: Forno utilizado para a fundição da liga de alumínio AA356 (UNESP/FEG).



Figura 8: Equipamentos de segurança (UNESP/FEG).



Figura 9: pinças e bastão para a remoção da escória.

### 3.1. Montagem do molde de areia

O molde utilizado para a solidificação da liga fundida foi o molde de areia. Para ser feito esse molde foi usado 1500g de areia, 60g de resina (4% da massa da areia) e 30g do catalisador (50% da massa da resina).



Figura 10: 60g de resina.



Figura 11: 30g de catalisador.



Figura 12: 1500g de areia.



Figura 13: Material do molde pronto.

E ainda foi utilizado um modelo para dar a forma à liga fundida que será solidificada no molde, feita de madeira no formato de tronco de cone e com um volume de aproximadamente de  $225\text{cm}^3$  como ilustrado na figura 14 abaixo.



Figura 14: Modelo de madeira.

A figura 15 abaixo ilustra no molde já pronto com todos os seus componentes.



Figura 15: Molde pronto.

### 3.2. Curva de resfriamento

Para a medição da curva de resfriamento da liga AA356, foi colocado um termopar no molde e registrado por um termômetro que grava as temperaturas a cada segundo.



Figura 16: Montagem para a leitura da curva de resfriamento.

O cadinho com a liga AA356 já líquido, foi tirado do forno e derramada no molde e seguida tampada com um bloco de areia feita com mesmo material que o molde.

A medição do resfriamento é feita a partir do derramamento do material fundido até a uma temperatura de aproximadamente 250°C, que é bem abaixo da temperatura de solidificação da liga de alumínio (aproximadamente 450°C).

O mesmo procedimento foi feito para a adição do agente modificador Al-Sr na fundição da liga AA356.

### **3.3. Procedimento para análise macroscópica**

Após as medições das curvas de resfriamento, o material solidificado foi retirado do molde de areia e em seguida cortado no meio, na seção transversal, com a utilização da máquina com a serra de fita. Esse procedimento foi feito tanto para a liga AA356 sólida sem a adição de agente modificador quanto para o material sólido com a adição do agente modificador.

Em seguida, com uma das metades do material cortado, foi feito o lixamento na seção transversal (região cortado). Utilizou-se a sequência de lixas de 100, 220, 320, 400 e 600. Para o lixamento, a máquina utilizada foi a lixadeira rotativa, sempre mantendo o sentido do lixamento para cada tipo de lixa. Na troca da lixa é necessário que a peça gire 90°C do sentido de lixamento anterior, fazendo com que as marcas dos riscos da lixa anterior sejam apagadas.

Para a análise macroscópica a peça devidamente lixada até a lixa 600, foi atacada na região lixada com um agente químico composto de 45 ml de HCl concentrado, 15 ml de HNO<sub>3</sub> concentrado, 15 ml de HF 48% e 25 ml de água destilada. Esse ataque químico tem como finalidade o destaque dos contornos de grão do material.

O procedimento para o ataque, foi à aplicação da substância na superfície lixada, com uma pinça segurando um algodão encharcado com o agente químico na ponta e luvas de borracha, para evitar o contato direto com a substância na pele, e utilizando-se de uma capela para que não haja a inalação dos gases provenientes do ataque na peça.

### **3.4. Procedimento para análise microscópica**

Para a análise microscópica, as peças que foram utilizadas na obtenção das imagens macroscópicas, foram cortadas com uma dimensão de aproximadamente 1x1x1cm (1cm<sup>3</sup>) do centro da peça. Foram retiradas duas amostras, uma para a análise transversal e outra para análise longitudinal. Feito esses cortes, as peças foram embutidas para facilitar o lixamento e o polimento que serão feitos posteriormente.

Com a peça já embutida, utilizou-se uma sequência de lixas de 320, 400, 600, 1000 até 1200, seguindo o mesmo procedimento usado para o lixamento da macrografia. Em seguida o processo de polimento foi iniciado usando a alumina como material de polimento, fazendo com que a superfície da amostra ficasse com uma aparência espelhada, foi preciso o auxílio de um microscópio com um aumento de 10X para a visualização de riscos profundos na superfície polida.

Para a análise microscópica foi utilizado uma solução aquosa de 0,5 % de HF para a visualização dos grãos no microscópio óptico com um aumento de 125X e 400X.

## 4. RESULTADOS E DICUSSÕES

### 4.1. Análise da curva de resfriamento

São ilustradas nas Figuras 17 e 18, as curvas de resfriamento. As curvas são traçadas a partir dos dados coletados do termopar localizado no centro do molde de areia. E são identificadas as temperaturas de início e fim da solidificação e a solidificação da fase eutética.

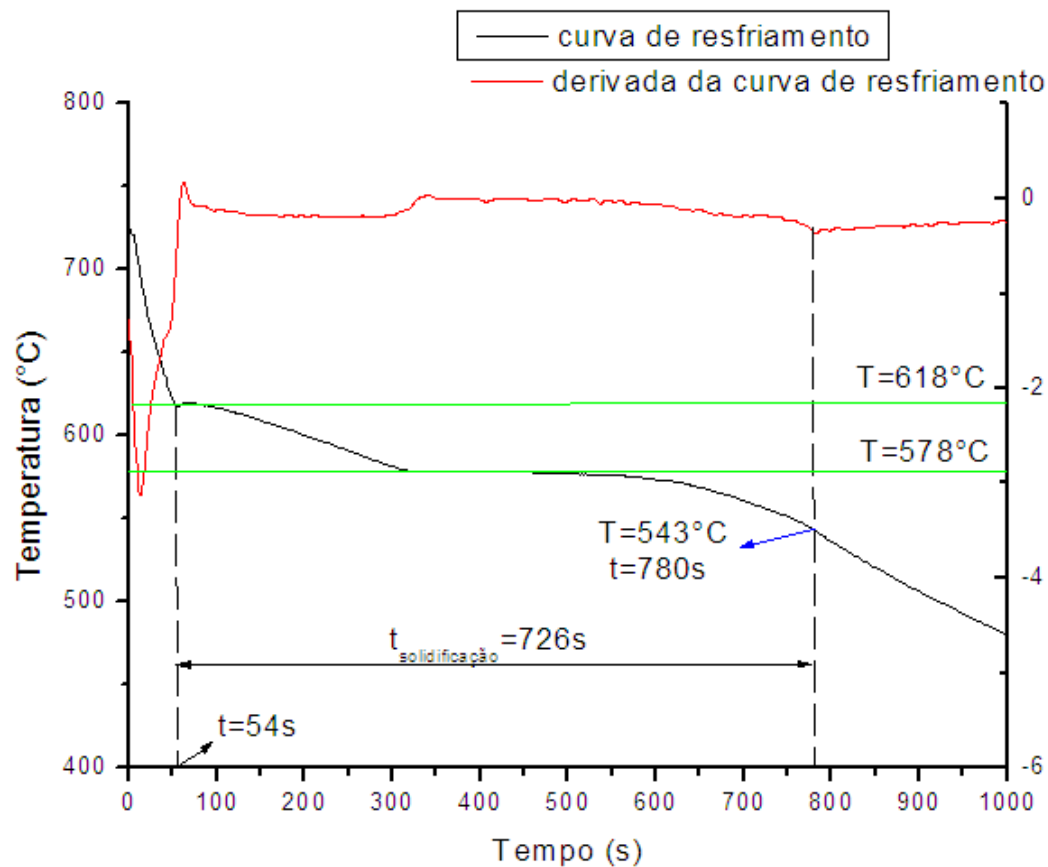


Figura 17: Curva de resfriamento da liga AA356 puro.

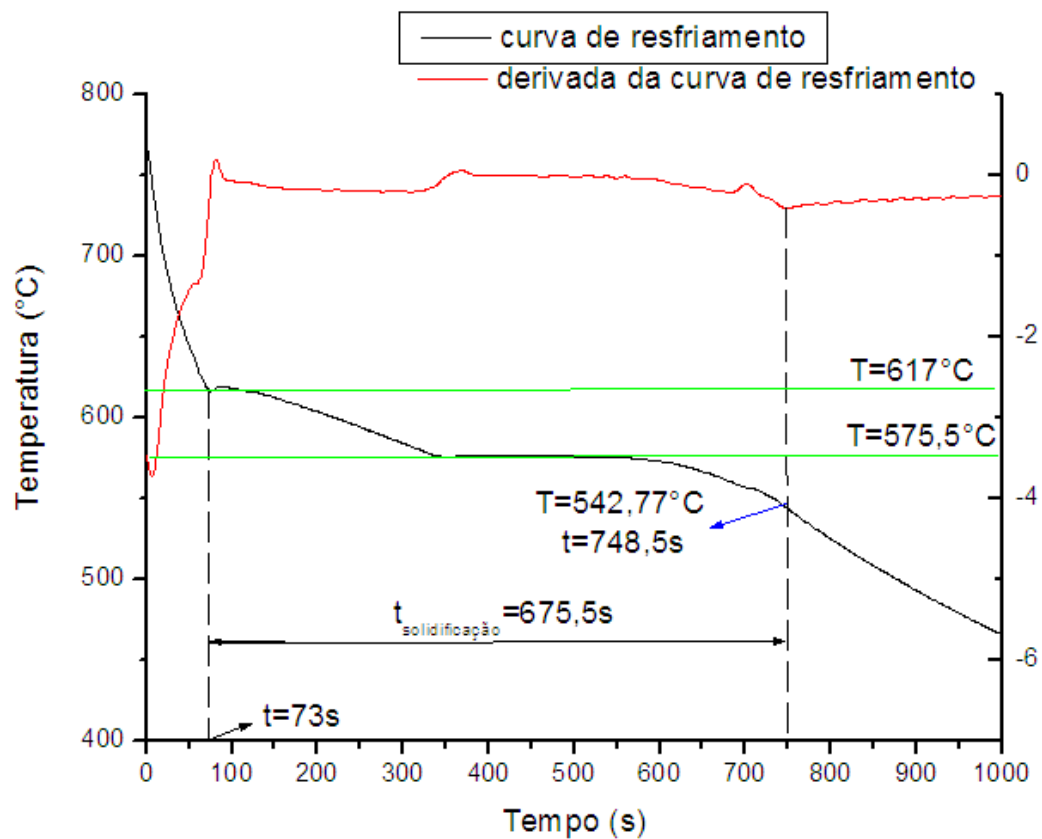


Figura 18: Curva de resfriamento da liga AA356 com a adição do agente modificador Al-Sr.

A análise da curva de resfriamento para a liga AA356 com a adição de 1,2g do agente modificador do tipo Al-10%Sr mostrou, que a adição de Sr resultou na diminuição considerável do tempo de solidificação.

A adição do agente modificador não altera significativamente a curva de resfriamento, obtendo-se valores das temperaturas e de formação da estrutura eutética muito próximas ou até mesmo iguais da liga sem a adição do agente modificador.

## 4.2. Análise macroscópica

As Figuras 19 e 20 ilustram as diferenças dos contornos de grãos com a adição de agente modificador e sem o agente modificador.

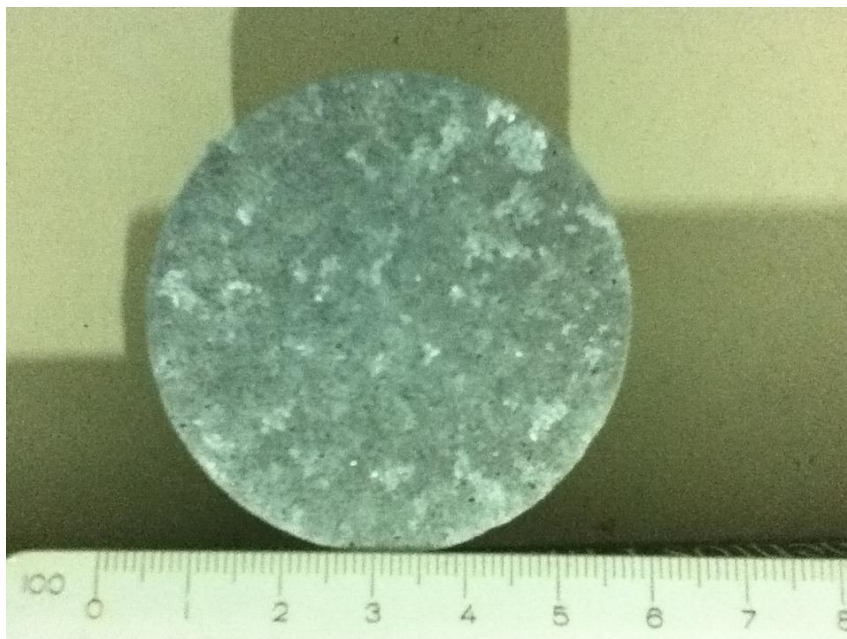


Figura 19: macroestrutura sem o agente modificador.

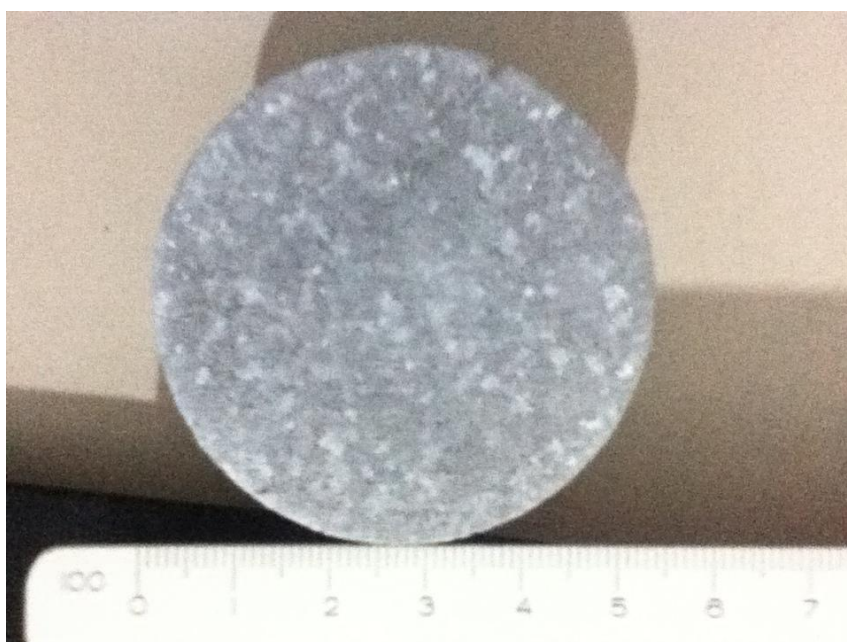


Figura 20: Macroestrutura com o agente modificador.

Foi observado que os contornos de grãos são maiores na macroestrutura sem o agente modificador . Pode-se notar também que a presença de poros na amostra com a adição da liga Al-Sr é maior que a amostra sem a adição.

### 4.3. Análise microscópica

As Figuras de 21 a 28 são fotos tiradas de um microscópio óptico com aumento de 125X e 400X, para analisar a região longitudinal e transversal da parte central do lingote, obtido pelo derramamento da liga AA356 fundido no molde de areia.

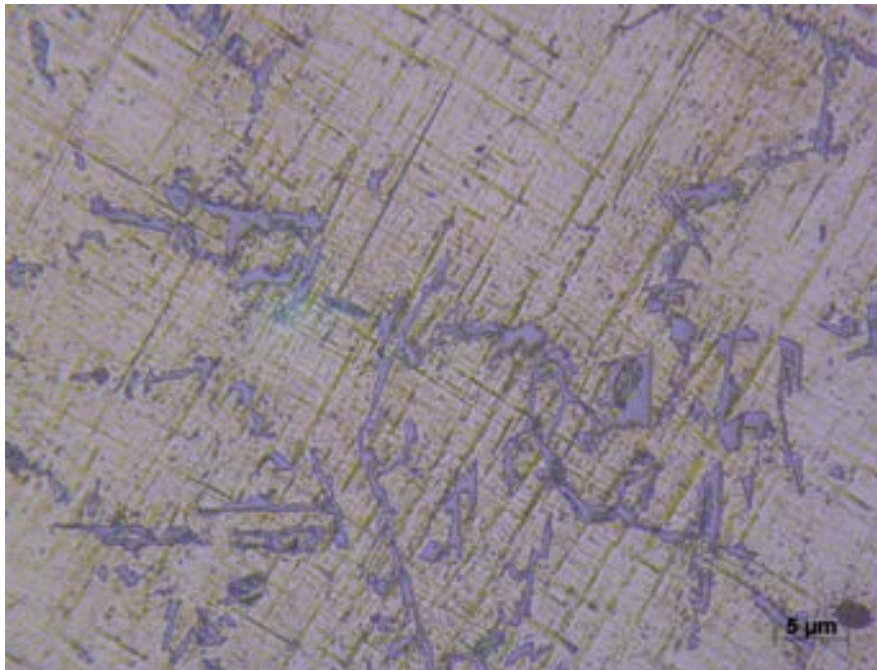


Figura 21: Região transversal sem a adição da liga Al-Sr com aumento de 125X.

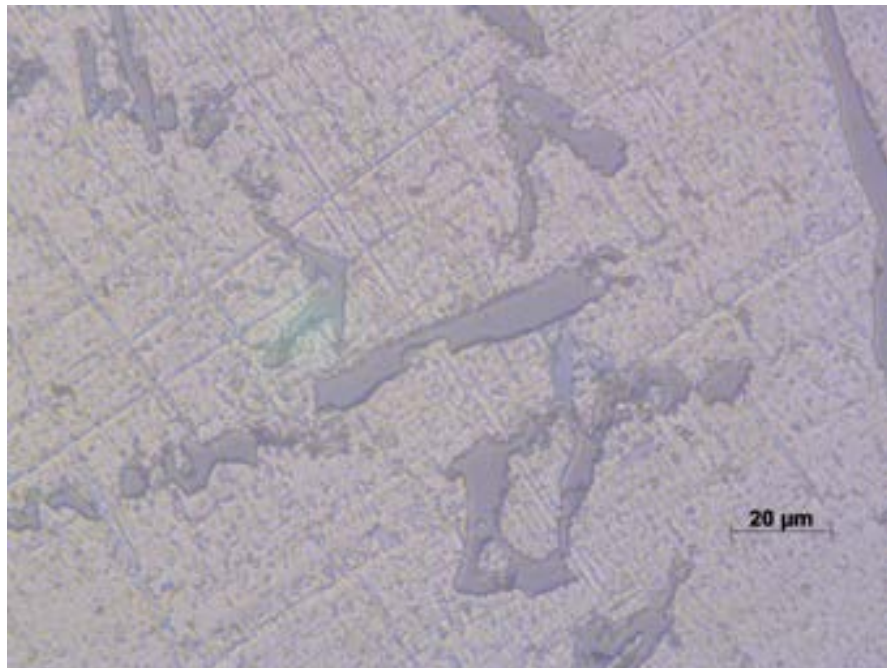


Figura 22: Região transversal sem a adição da liga Al-Sr com aumento de 400X.

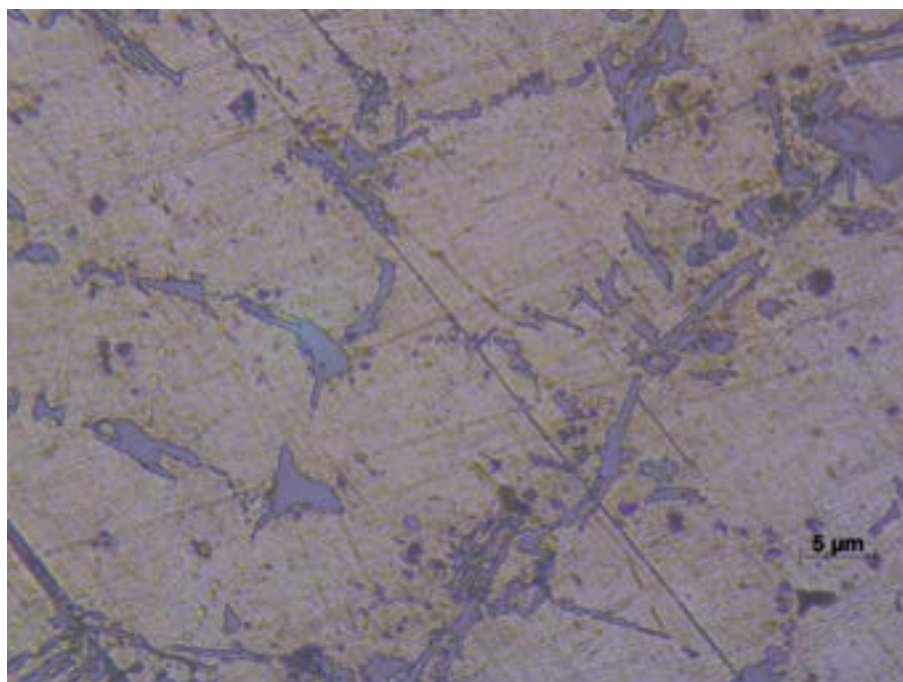


Figura 23: Região transversal com a adição da liga Al-Sr com aumento de 125X.

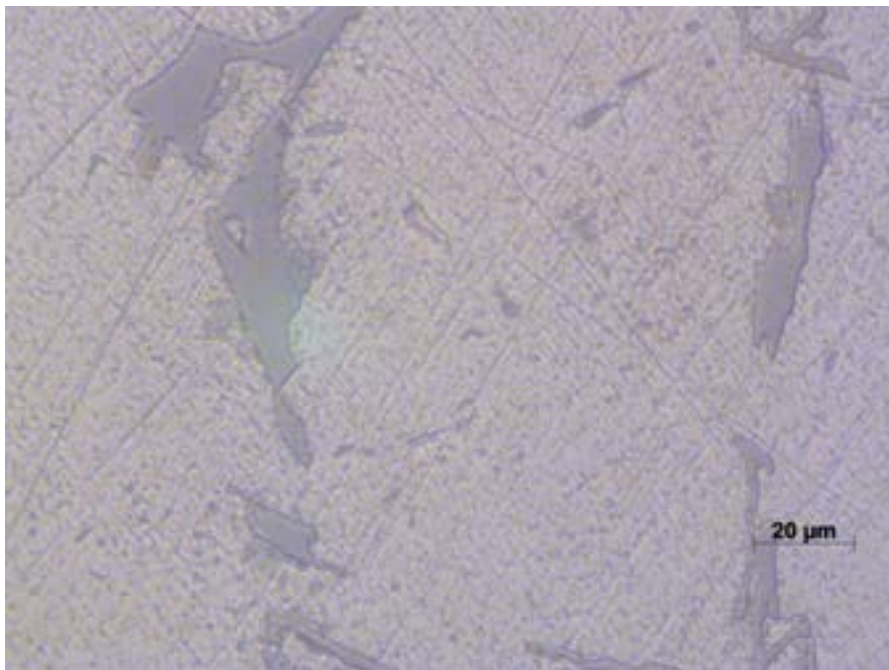


Figura 24: Região transversal com a adição da liga Al-Sr com aumento de 400X.

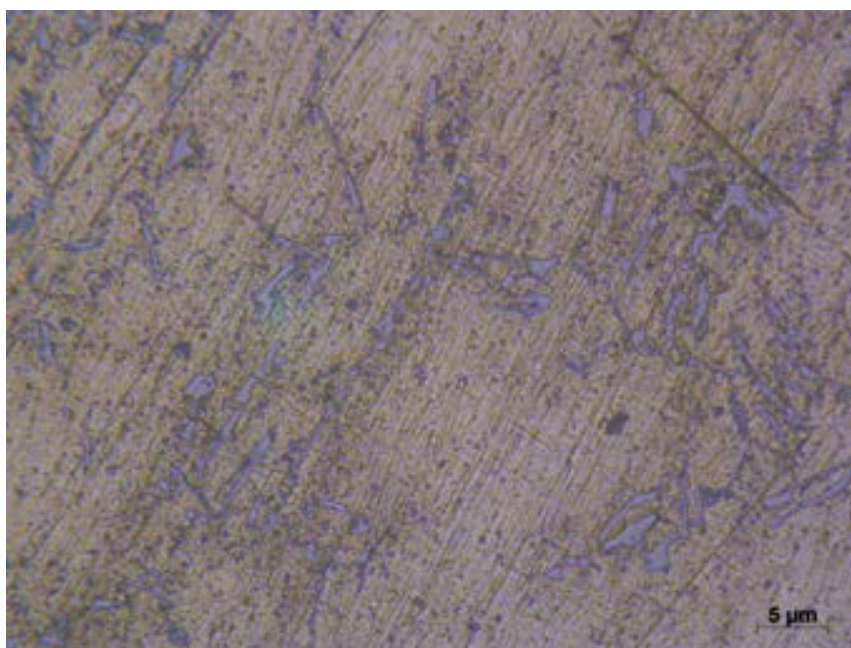


Figura 25: Região longitudinal sem a adição da liga Al-Sr com aumento de 125X.

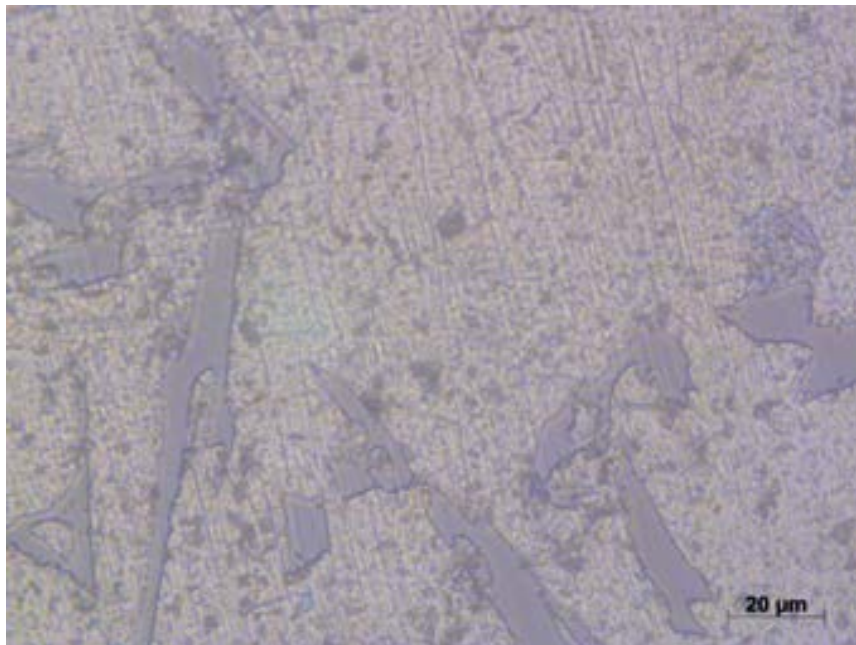


Figura 26: Região longitudinal sem a adição da liga Al-Sr com aumento de 400X.

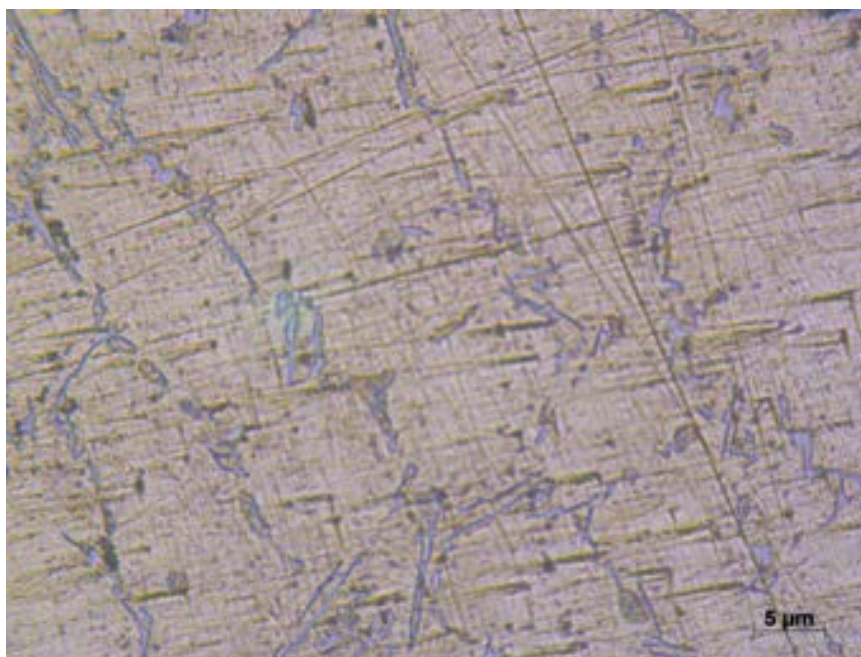


Figura 27: Região longitudinal com a adição da liga Al-Sr com aumento de 125X.

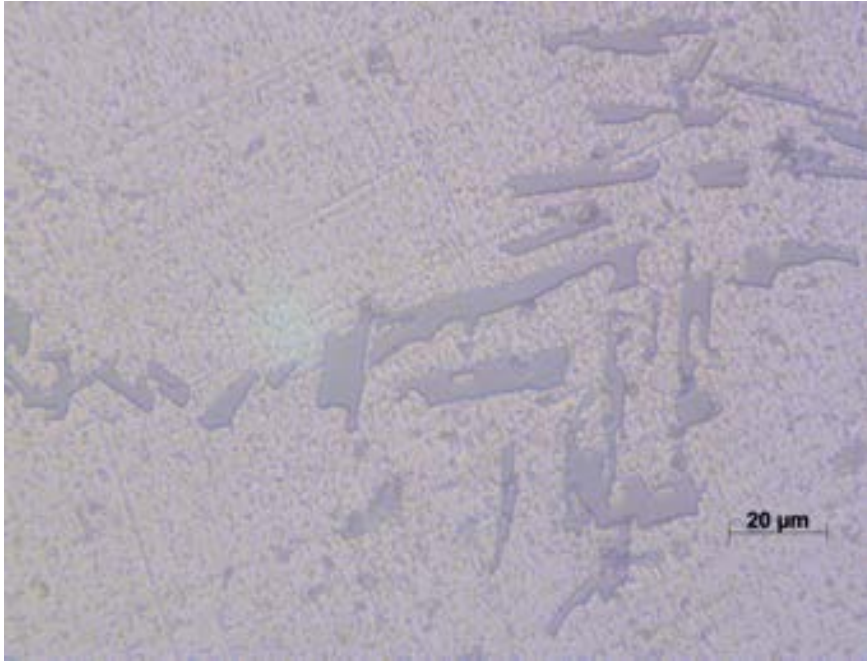


Figura 28: Região longitudinal com a adição da liga Al-Sr com aumento de 400X.

Para uma fácil comparação entre as imagens, as fotos foram dispostas como ilustrado abaixo. As fotos da coluna da esquerda são imagens com o aumento de 125X e as fotos da coluna da direita um aumento de 400X

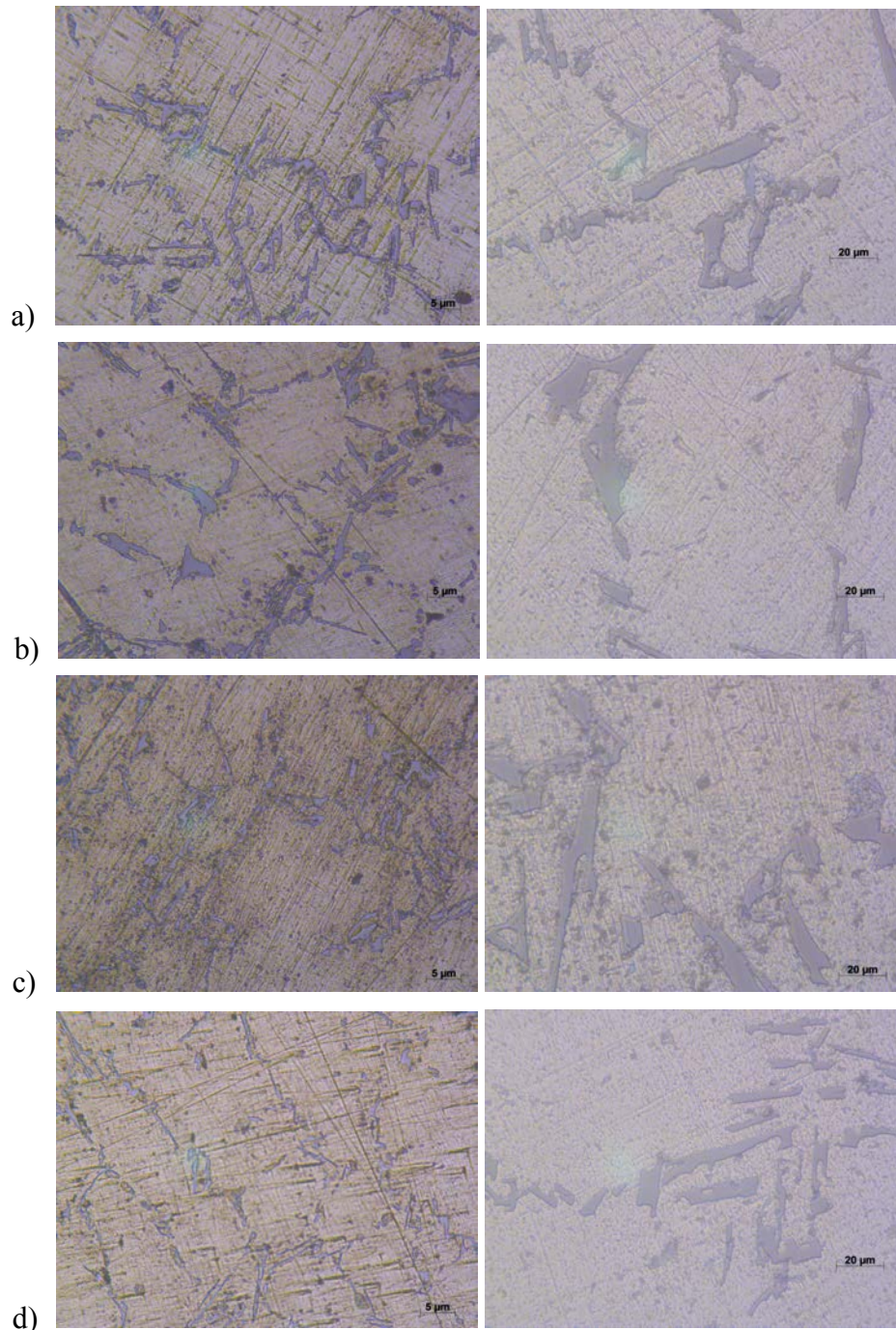


Figura 29: a) região transversal sem a adição da liga Al-Sr, b) região transversal com a adição da liga Al-Sr, c) região longitudinal sem a adição da liga Al-Sr e d) região longitudinal com a adição da liga Al-Sr.

Analisando as microestruturas das amostras sem e com o agente modificador, observa-se que os grãos nas amostras com a adição da liga Al-Sr são menores em comparação com a amostra sem o agente modificador.

## 5. CONCLUSÃO

A análise da curva de resfriamento é uma ferramenta importante na determinação de parâmetros importantes do processo de solidificação tais como temperatura líquidus, temperatura solidus e tempo total de solidificação dos lingotes.

Com a análise da curva de resfriamento podemos concluir que o agente modificador não interfere muito nos valores de temperatura de solidificação, porém, o tempo de solidificação diminui consideravelmente.

Na macrografia, o resultado das amostras com e sem a adição da liga Al-Sr foi bem visível. A amostra sem o agente modificador tem grãos maiores em relação à amostra com o agente modificador.

Para a análise micrográfica, pode-se notar que os grãos diminuem com adição da liga mãe Al-Sr. Das micrografias obtidas também se pode concluir que as dendritas, que ficam nas regiões mais claras, são a fase rica em alumínio, e a fase eutética (região mais escura), que é uma mistura da fase rica em alumínio e da fase rica em silício, se localiza na região interdendrítica.

## REFERÊNCIAS

ALCOA. Categorias de produtos. Disponível em:  
[http://www.alcoa.com/brazil/pt/product\\_category.asp?cat\\_id=1741](http://www.alcoa.com/brazil/pt/product_category.asp?cat_id=1741) .

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

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica**: Materiais de Construção Mecânica. Vol. II, 1978. 360 p.

KYIAN, Carlos. Material sobre solidificação. Disponível em:  
<http://intranet.feg.unesp.br/aa/material/kiyan/solidificacao.php> : .

KYIAN, Carlos. Material sobre fundição. Disponível em:  
<http://intranet.feg.unesp.br/aa/material/kiyan/fundicao.php>

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

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