

UNESP
FACULDADE DE ENGENHARIA DO CAMPUS GUARATINGUETÁ

FELIPE PINTO PÊCEGO

**EFEITO DO ESTRÔNCIO (Sr) NO TRATAMENTO DE MODIFICAÇÃO DO EUTÉTICO
DA LIGA Al-1%Si**

Guaratinguetá
2013

FELIPE PINTO PÊCEGO

EFEITO DO ESTRÔNCIO (Sr) NO TRATAMENTO DE MODIFICAÇÃO DO EUTÉTICO DA
LIGA Al-1%Si

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

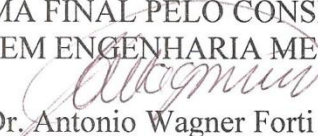
Guaratinguetá
2013

P365e	Pêcego, Felipe Pinto Efeito do Estrôncio (Sr) no tratamento de modificação do eutético da liga Al-1%Si / Felipe Pinto Pêcego – Guaratinguetá : [s.n], 2013 39 f : il. Bibliografia: f. 38-39 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013. Orientador: Prof. Dr. Carlos Kyan 1. Ligas de alumínio 2. Resfriamento 3. Microestrutura I. Título CDU 669.715
-------	--

FELIPE PINTO PÊCEGO

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

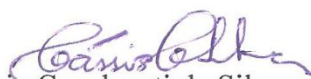
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Dr. Antonio Wagner Forti
Coordenador

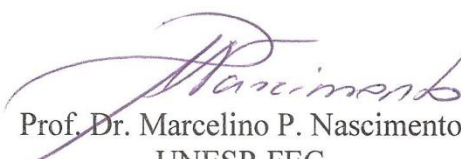
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Carlos Kyan
Orientador/UNESP-FEG



Cássia Cavalcanti da Silva
UNESP-FEG


Prof. Dr. Marcelino P. Nascimento
UNESP-FEG

Dezembro 2013

DADOS CURRICULARES

FELIPE PINTO PÊCEGO

NASCIMENTO 22.04.1986 – TAUBATÉ/SP

FILIAÇÃO Otto Moacir Melro Pêcego

Maria Helena de Andrade Pinto Pêcego

2006/2013 Curso de Graduação

Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

Dedico esse trabalho aos meus pais

AGRADECIMENTOS

Agradeço à FEG pela oportunidade de realização deste trabalho e pelos ensinamentos a mim proporcionados;

Um agradecimento especial a todos os técnicos do Departamento de Materiais que me auxiliaram nos experimentos realizados;

Ao meu orientador Prof. Dr Carlos Kyan pela paciência e dedicação em transmitir os conhecimentos necessários durante a concepção desse estudo;

À amiga Cássia Cavalcante da Silva pela ajuda na análise dos dados;

Aos meus pais e minha tia Dorinha que sempre acreditaram em mim e me apoiaram em todos os momentos da minha vida;

À minha namorada pela compreensão dos finais de semana gastos com esse trabalho.

“A adversidade desperta em nós capacidades que, em circunstâncias favoráveis, teriam ficado adormecidas”.

Horácio

PÊCEGO, F. P., EFEITO DO ESTRÔNCIO (Sr) NO TRATAMENTO DE MODIFICAÇÃO DO EUTÉTICO DA LIGA Al-1%Si. 2013. 39f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá 2013.

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo analisar as curvas de resfriamento, micro e macrografia da liga Al-1%Si sem e com adição do modificador Estrôncio. Uma das maneiras de melhorar propriedades mecânicas das ligas de Al-Si é através do processo de modificação. Para realização dos experimentos foram fundidos dois tarugos da liga Al-1%Si em molde de ferro fundido, um tarugo com adição de 0,02% de Estrôncio em peso e o outro tarugo sem a adição do modificador. No processo de solidificação dos tarugos a temperatura foi monitorada e registrada a cada segundo, para posteriormente analisar as curvas de resfriamento obtidas. Os tarugos foram cortados e passaram por lixamento e polimento para a realização das macrografia e micrografias. Os resultados referentes à macrografia indicaram que no tarugo sem a adição do estrôncio a granulometria obtida era mais refinada do que no tarugo onde foi adicionado o modificador estrôncio. Quanto à micrografia, as fotos providas do microscópio óptico mostraram que não houve o efeito de modificação esperado com a adição do estrôncio. Isto sugere que à baixa quantidade de Silício (1%) presente na liga utilizada nesse estudo interferiu no processo de modificação, pois de acordo com revisão de literatura, 0,022% de estrôncio em peso é suficiente para modificar integralmente uma liga com 7% de Silício. Os resultados provenientes da curva de resfriamento mostraram que tanto a temperatura eutética quanto o tempo de solidificação permaneceram inalterados com a adição do estrôncio.

PALAVRAS-CHAVE: Liga Al-1%Si, Processo de modificação, Curva de resfriamento, Microestrutura.

PÊCEGO, F. P., **EFFECT OF STRONTIUM (Sr) IN THE TREATMENT OF MODIFICATION OF EUTECTIC LEAGUE Al-1% Si**. 2013. 39f . Graduate Work (Graduate Mechanical Engineering) - College of Engineering Campus Guaratinguetá , Universidade Estadual Paulista , Guaratinguetá 2013.

ABSTRACT

This study aimed to analyze the cooling curves, micro and macrograph alloy Al-1 %Si without the addition of strontium modifier and with the addition of the same. One of the ways of improving mechanical properties of alloy Al -Si is through the modification process. For the experiments two billets of the alloy Al-1%Si cast iron mold in a billet with addition of 0.02% strontium by weight, and the other billet without the addition of modifier were fused. In the solidification process of billet temperature was monitored and recorded every second for later plotting in Origin 8 program and analyzes the cooling curves obtained. The billets were cut and passed by grinding and polishing to perform the macrograph and micrographs. The results concerning the macrograph indicated that billet without the addition of Strontium particle size obtained was more refined than the billet where the strontium modifier was added. Regarding the micrograph, photos stemmed from the optical microscope didn't show the expected modification effect by the addition of Strontium. This suggests that the low amount of silicon (1 %) present in the alloy used in this study interfered in the change process, because according to the literature review, Strontium 0.022 % by weight is sufficient to fully modify an alloy with 7% Silicon. The results from the cooling curve showed that both the eutectic temperature and the solidification time remained unchanged with the addition of strontium.

KEYWORDS: Alloy Al-1% Si, Modified Process, Cooling Curve, Microstructure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração com os principais elementos de liga para o alumínio. Fonte: Dean (1990).	18
Figura 2 - Diagrama de fases do sistema Al-Si. Fonte: Metals Handbook N°8 – 8ª edição.	20
Figura 3 - Diferença entre uma liga Al-Si modificada e uma liga não modificada; (a) sem agente modificador; (b) com agente modificador. Fonte: Moreira	21
Figura 4 - Ilustração das zonas que ocorrem na solidificação. Fonte: Apostila do curso técnico em mecânica do CEFET/SC, 2002.	23
Figura 5 - Curva de resfriamento típica e sua derivada de uma liga Al-3%Si. Fonte: Arango; Martorano, 2011.	24
Figura 6 - Ilustração da construção do molde de fundição. Fonte: Autor.	27
Figura 7 - Bancada experimental. Fonte: Autor.	27
Figura 8 - Retirada do cadinho do forno com o auxílio da tenar. Fonte: do autor.	28
Figura 9 - Vazamento do fundido para o molde. Fonte: Autor.	29
Figura 10 - Auxílio da escumadeira para retirada da escória. Fonte: Autor.	29
Figura 11 - Amostra lixada, antes do ataque químico. Fonte: Autor.	30
Figura 12 - Amostra do alumínio inserido no baquelite. Fonte: Autor.	31
Figura 13 - Curva de resfriamento sem adição do modificador de eutético. Fonte: Autor.	32
Figura 14 - Curva de resfriamento com adição do modificador do eutético. Fonte: Autor.	33
Figura 15 - Figura 15 (a) mostra o resultado da macrografia realizada na amostra sem modificador; Figura 15 (b) mostra o resultado da macrografia com modificador.	34
Figura 16 - (a) Região transversal sem modificador; (b) região transversal com modificador com o aumento de 50x para as ambas as figuras. Fonte: Autor.	34
Figura 17 - (a) Região transversal sem modificador; (b) região transversal com modificador com o aumento de 100x para as ambas as figuras. Fonte: Autor.	35
Figura 18 - (a) Região transversal sem modificador; (b) região transversal com modificador com o aumento de 200x para as ambas as figuras. Fonte: Autor.	35
Figura 19 - (a) Região transversal sem modificador; (b) região transversal com modificador com o aumento de 500x para as ambas as figuras. Fonte: Autor.	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físicas do elemento alumínio.....	16
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	ALUMÍNIO	16
2.2	ESTRÔNCIO	17
2.3	LIGAS DE ALUMÍNIO	18
2.3.1	LIGAS DE ALUMÍNIO SILÍCIO	19
2.4	PROCESSO DE MODIFICAÇÃO DO EUTÉTICO	20
2.5	SOLIDIFICAÇÃO	22
2.6	CURVA DE RESFRIAMENTO	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1	LIGA	26
3.2	MOLDE	26
3.3	FUNDIÇÃO	28
3.4	PROCEDIMENTOS PARA MACROSCOPIA	30
3.5	PROCEDIMENTOS PARA MICROSCOPIA	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4.1	ANÁLISE DA CURVA DE RESFRIAMENTO	32
4.2	ANÁLISE MACROSCÓPICA	33
4.3	MICROSCOPIA	34
5	CONCLUSÃO	37
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

1 INTRODUÇÃO

O alumínio é um metal consumido em grande escala no mundo e o mais importante dos metais não ferrosos. Entre suas maiores vantagens estão: baixo peso específico, boa resistência à corrosão e alta condutibilidade elétrica e térmica. O alumínio interage com muitos metais e metalóides, por isso suas ligas atendem a diversas propriedades mecânicas, o que resulta em grande variedade de materiais para engenharia.

O Silício, como elemento de liga no alumínio, provê características importantes para fundição, entre elas a fluidez, que auxilia o preenchimento das cavidades dos moldes. Além disso, o silício tem densidade menor que a do alumínio, portanto não diminui a sua vantagem de baixo peso. Assim, as ligas Al-Si correspondem a 90% das ligas utilizadas para fundição.

Uma das maneiras de melhorar as propriedades mecânicas das ligas de Al-Si é através do processo de modificação. Esse processo consiste em modificar sua microestrutura na forma de placas e agulhas de silício dentro de uma matriz de alumínio, para uma forma mais fibrosa e fina. O estrôncio é o agente modificador mais utilizado na indústria, por ser de fácil manuseio, atóxico, boa eficácia na modificação com pequenos percentuais adicionados.

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

Uma das maneiras mais efetivas de se obter propriedades termofísicas das ligas é através da análise de sua curva de resfriamento, e o uso da primeira derivada da curva, pois essa determina eventos importantes do processo de solidificação.

Sendo assim, este estudo pretendeu analisar a ação do elemento modificador estrôncio em uma liga Al-1%Si; para isso, fez-se o levantamento das curvas de resfriamento, micro e macrografia de amostras com e sem o modificador estrôncio.

1.1 OBJETIVOS

Este estudo teve por objetivos as seguintes análises:

- Analisar as curvas de resfriamento sem e com a adição do agente modificador estrôncio;
- Analisar as macrografias sem e com a adição do agente modificador estrôncio;
- Analisar as micrografias sem e com a adição do agente modificador estrôncio.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ALUMÍNIO

As duas propriedades do alumínio, que o tornam muito utilizado, são: baixa densidade, que conduz a uma relação peso da estrutura/resistência do material muito favorável; e elevada resistência à corrosão nos meios líquidos e aquosos e em alguns produtos químicos orgânicos e inorgânicos. De acordo com Bresciani (1997), a resistência mecânica do alumínio não é elevada, entretanto, quando adicionados elementos de liga associado a tratamento térmico, obtém-se um material de importante utilização nas estruturas resistentes. Ainda, segundo o autor, a resistência à corrosão do alumínio advém da formação de uma película de óxido na superfície do material de natureza quimicamente estável; essa película protetora de pequena espessura (50 a 100 Å) é de elevada dureza e, além disso, é transparente e aderente à superfície do metal.

Outras características que ampliam consideravelmente o campo de aplicação do alumínio são: comportamento não-ferromagnético, antifascente e não tóxico, além da aparência brilhante; e, ainda, elevada condutibilidade elétrica e térmica, e capacidade de reflexão de energia radiante (BRESCIANI, 1997). A Tabela 1 mostra as propriedades físicas do elemento alumínio.

Tabela 1- Propriedades físicas do elemento alumínio.

Número atômico	13	-
Massa atômica	26,98	-
Densidade	2,7	Mg/m ³ (20°C)
Ponto de fusão	660	°C
Calor específico	400	J/Kg. K (25°C)
Calor latente de fusão	397	KJ/Kg
Condutibilidade térmica	247	W/m. K (25°C)
Resistividade elétrica	26,55	nΩ. m (20°C)
Condutibilidade (volumétrica)	elétrica 64,94	%IACS
Estrutura cristalina	Cúbica de faces centradas	

Fonte: (BRESCIANI, 1997)

2.2 ESTRÔNCIO

O estrôncio é um metal de coloração prateada brilhante, pouco maleável, que rapidamente se oxida em presença do ar adquirindo uma tonalidade amarelada devido à formação do óxido, por isso deve ser conservado imerso em querosene. Devido à sua elevada reatividade, o metal se encontra na natureza combinado com outros elementos formando compostos. Reage rapidamente com a água libertando hidrogênio para formar o hidróxido. O metal arde em presença do ar - espontaneamente quando se encontra na forma de pó finamente dividido - com chama vermelha rosada formando óxido e nitreto; como o nitrogênio não reage abaixo da temperatura de 380 °C forma-se unicamente óxido quando arde a temperatura ambiente. Os sais voláteis de estrôncio produzem uma chama coloração carmim, por isso usado em pirotecnia. Apresenta três estados alotrópicos com pontos de transição a 235 °C e 540 °C.

Atualmente a principal aplicação do estrôncio é em cristais para tubos de raios catódicos de televisores em cores. Existem regulamentações que exigem a utilização deste metal para filtrar os raios X, evitando que incidam sobre o telespectador. Outros usos:

- Pirotecnia: É usado o seu nitrato.
- Produção de ímãs de ferrita
- O carbonato é usado na refinação do zinco porque remove o chumbo durante a eletrólise.
- O metal é usado na dessulfurização do aço e na produção de diversas ligas metálicas
- Titanato de estrôncio tem um índice de refração extremamente alto e uma dispersão óptica maior que a do diamante, propriedades de interesse em diversas aplicações ópticas. Por isso, também é usado ocasionalmente como pedra preciosa.
- Outros compostos de estrôncio são utilizados na fabricação de cerâmicas, produtos de vidro, pigmentos para pintura (cromato) , lâmpadas fluorescentes (fosfato) , e medicamentos na forma de cloreto e peróxido.
- O isótopo radioativo Sr-89 é usado na terapia do câncer , o Sr-85 se tem usado em radiologia e o Sr-90 em geradores de energia autônomos.

2.3 LIGAS DE ALUMÍNIO

O alumínio fundido dissolve outros metais e substâncias metalóides, como o silício, que atua neste aspecto como metal. Quando o alumínio se resfria e se solidifica, alguns dos constituintes da liga podem ser retidos em solução sólida. Isto faz com que a estrutura atômica do metal se torne mais rígida (ABAL, 2007).

Com base no processo de fabricação, as ligas de alumínio podem ser divididas em dois grupos: (1) grupos das ligas trabalhadas; (2) grupo das ligas para fundição. Entretanto, nesses dois grupos, têm-se as ligas tratáveis termicamente e ligas não tratáveis termicamente. Em relação às ligas não tratáveis termicamente tem as propriedades são alteradas apenas por trabalho a frio ou encruamento (ZANGRANDI, 2008). A Figura 1 mostra os principais elementos de liga para o alumínio.

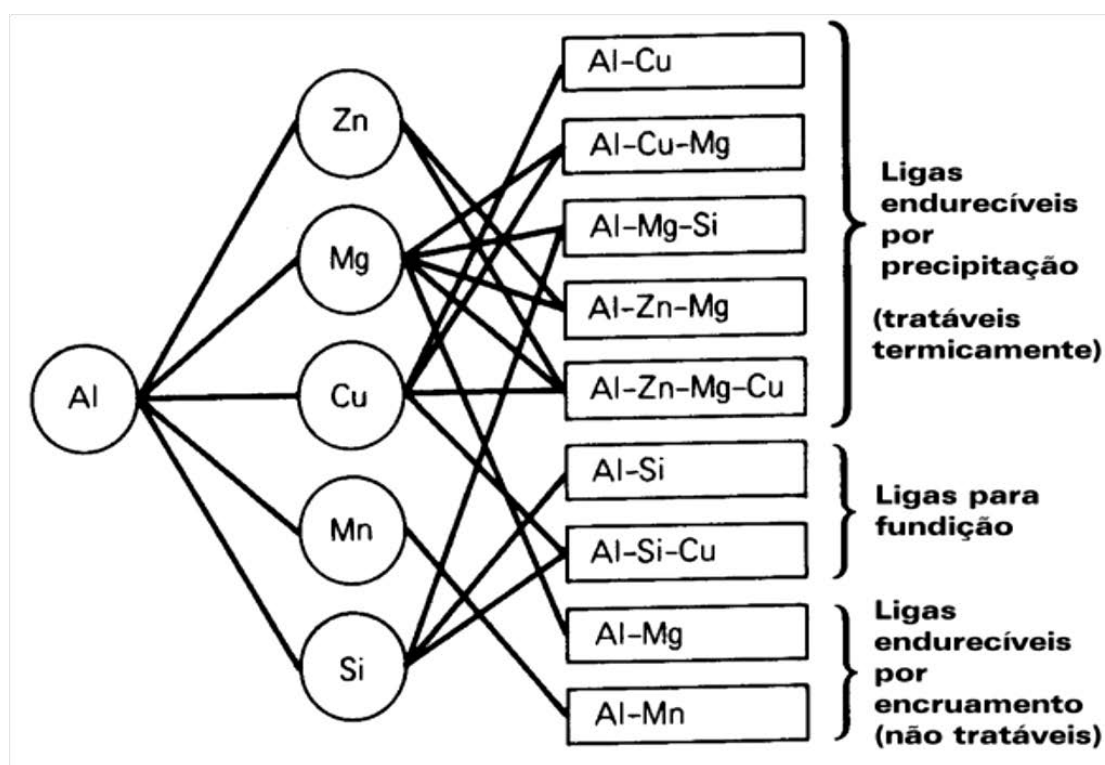


Figura 1 - Ilustração com os principais elementos de liga para o alumínio. Fonte: Dean (1990).

Um dos aspectos que tornam as ligas de alumínio tão atraentes como materiais de construção mecânica é o fato de o alumínio poder combinar-se com a maioria dos metais de engenharia, formando ligas e, a partir dessa combinação ser possível obter características tecnológicas ajustadas

de acordo com a aplicação do produto final (ABAL, 2007). Por exemplo, quando o silício é utilizado nas ligas de alumínio observa-se uma melhora nas características para fundição, tais como fluidez (para o vazamento) e resistência a trincas de contração (quando o metal quente se solidifica e se contrai) (ABAL, 2007).

2.3.1 Ligas de alumínio silício

As ligas Al-Si correspondem a aproximadamente 90% de todos os produtos fundidos de alumínio. A razão para a ampla utilização desta série deve-se à atrativa combinação de propriedades mecânicas, resistência à corrosão e excelente fundibilidade. Para processos de fundição sob baixas taxas de resfriamento (moldes de areia, gesso), a faixa de composições usuais vai de 5 a 7% em peso de Si, para moldes permanentes de 7 a 9% Si e para fundição sob pressão de 8 a 12% (PERES, 2004).

Um dos principais atributos desta classe de ligas é sua fluidez, ou seja, a habilidade para preencher uma cavidade de molde. Fluidez é uma característica complexa que é influenciada pela tensão superficial, viscosidade, faixa de solidificação da liga, superaquecimento do líquido antes do vazamento. O silício, além de oferecer excelentes características para fundição, tem densidade de $2,3 \text{ g/cm}^3$, inferior ao do alumínio ($2,7 \text{ g/cm}^3$). Portanto, o silício é um dos poucos elementos de liga que adicionados ao alumínio não diminui sua vantagem de baixo peso. O sistema Al-Si forma um eutético simples, no qual as fases em equilíbrio são Al- α e Si, na forma de lâminas ou partículas finamente dispersas. A Figura 2 mostra o diagrama de fases do sistema Al-Si (PERES, 2004).

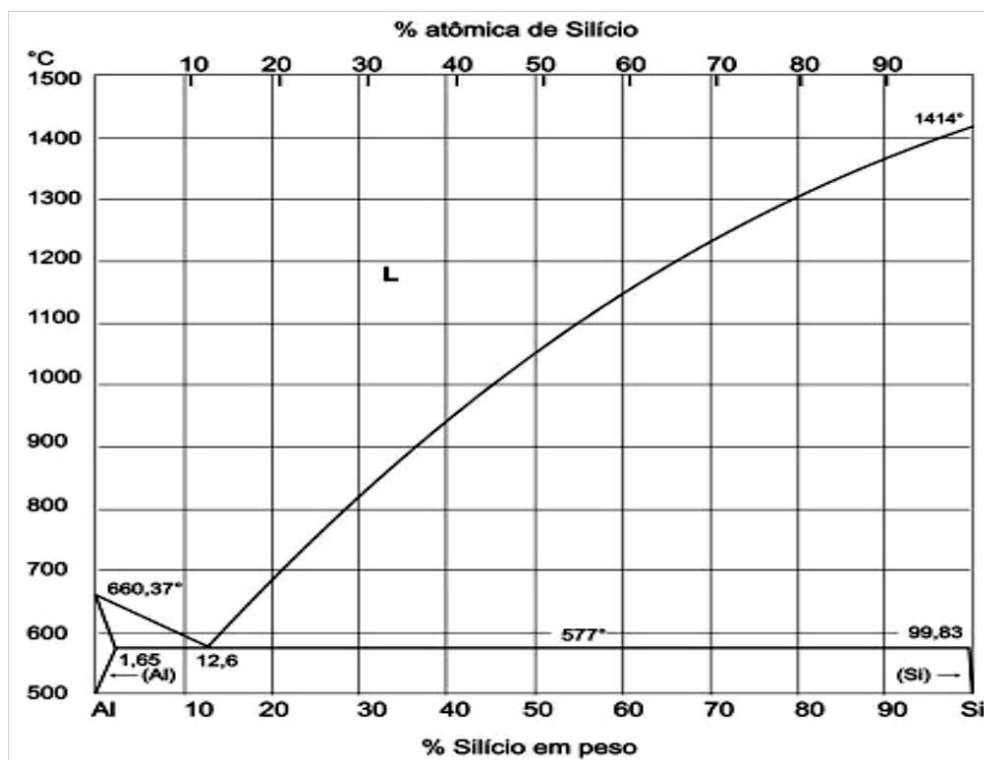


Figura 2 - Diagrama de fases do sistema Al-Si. Fonte: Metals Handbook N°8 – 8ª edição.

Conforme Araújo (2012) dependendo da quantidade de Si, as ligas podem ser divididas em três categorias. As ligas hipereutéticas encontram-se na faixa de 13-20% em peso de Si; a liga eutética com 12,6% em peso de Si e, finalmente, as ligas hipoeutéticas com teor de Si menor que da liga eutética. O silício tem uma solubilidade muito baixa em alumínio, portanto, precipita-se como praticamente silício puro, conseqüentemente, melhora a resistência à abrasão.

As propriedades das ligas alumínio-silício são fortemente dependentes do processo de fundição usado, das eventuais adições químicas para modificação do eutético, da estrutura granulométrica, da morfologia do silício primário e do tratamento do metal líquido (para remoção de hidrogênio e para remover inclusões) (GOULART, 2005).

2.4 PROCESSO DE MODIFICAÇÃO DO EUTÉTICO

Quando as ligas Al-Si são fundidas em areia ou em molde permanente, uma forma de melhorar suas propriedades de resistência mecânica, ductilidade, estanqueidade e usinabilidade é através da modificação do eutético (LIANG, et al, 2009).

Em solidificações lentas destas ligas, forma-se uma microestrutura com morfologia grosseira, onde o eutético aparece na forma de placas ou agulhas de silício dentro de uma matriz de alumínio. De acordo com Liang et al. 2009, essas grosseiras agulhas são quebradiças, ocasionando estruturas eutéticas com baixa ductilidade e baixa resistência mecânica.

A utilização de modificadores químicos, como o estrôncio, resulta na modificação do silício do eutético, mudando sua morfologia de grosseira e na forma de agulha para uma mais fina e na forma fibrosa (SATHYAPAL; PRABHU, 2008). A Figura 3 mostra a diferença entre uma liga Al-Si modificada e uma liga não modificada.

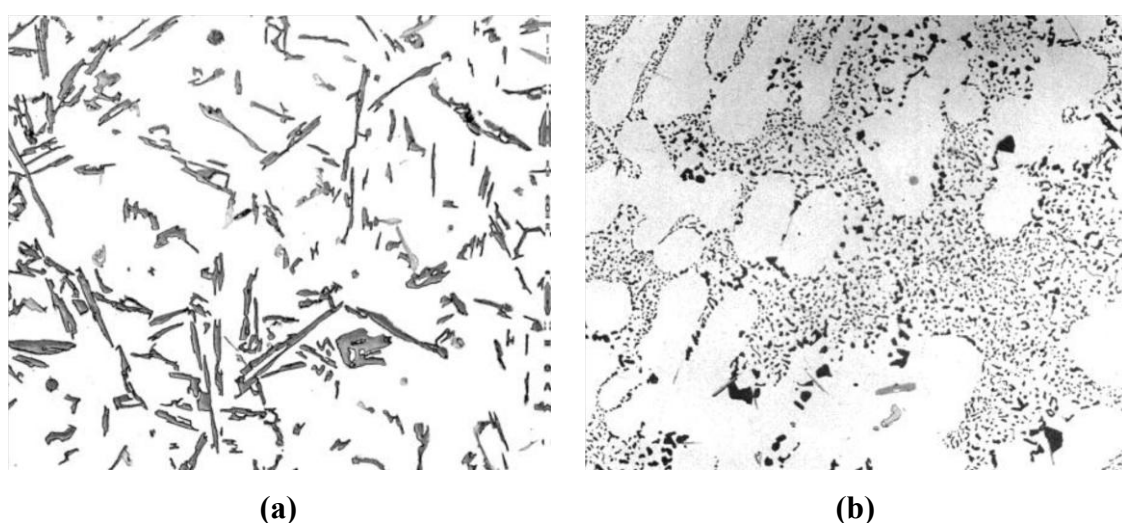


Figura 3 - Diferença entre uma liga Al-Si modificada e uma liga não modificada; (a) sem agente modificador; (b) com agente modificador. Fonte: Moreira

O estrôncio é o modificador mais utilizado na indústria, por ser de fácil manuseio, atóxico, boa eficácia na modificação com pequenos percentuais adicionados e por ter bom tempo de atuação no banho (ZHANG; POIRIER; CHEN, 2004).

Segundo Furlan (2008), ligas com teores de estrôncio menores que os necessários para a modificação ideal tendem a apresentar uma microestrutura parcialmente modificada, e teores superiores ao necessário provocam o fenômeno denominado supermodificação.

Nos estudo realizado por Araujo; Vilella; Verran (s.d.) foram feitas análises de amostras da liga 356 sem a adição de modificador e modificada usando diferentes percentuais de estrôncio. Os autores concluíram que houve a ocorrência de modificação total para a liga com 0,022% Sr em peso, evidenciada pela presença de partículas de Si do eutético com uma morfologia mais homogênea e predominantemente fibrosa. Ainda segundo os autores, para menores percentuais deste elemento modificador observou-se a ocorrência de modificação parcial, enquanto que a

utilização de percentuais de Sr superiores a 0,022 % em peso resultou em alterações na morfologia das partículas de Sr que sugerem a ocorrência de supermodificação.

2.5 SOLIDIFICAÇÃO

A solidificação é um fenômeno de transformação de fases bastante familiar e associado à nossa rotina diária, desde a simples produção de cubos de gelo até o manuseio de utensílios e componentes, os quais, quase que invariavelmente, passaram por um estágio de solidificação durante a sua fabricação (GARCIA, 2001).

Com a fusão dos metais há uma queda abrupta na viscosidade, de tal maneira que se pode acomodar o metal líquido em um molde de geometria específica para proporcionar o formato de uma peça semiacabada. A estrutura que se forma imediatamente após a solidificação determina as propriedades do produto final. As características mecânicas desse produto dependem do tamanho de grão, espaçamento dendríticos, espaçamentos lamelares ou fibrosos, das heterogeneidades químicas, do tamanho e forma e distribuição das inclusões, das porosidades formadas, etc. Todos esses aspectos dependem fortemente do processo de solidificação, desde a temperatura de vazamento até o tipo de molde, que influencia na taxa de resfriamento (GARCIA, 2001).

Quando um metal líquido é vazado em um molde, a peça começa a se resfriar de fora para dentro, a partir de todas as superfícies limitantes, porque o calor só pode ser transferido para o exterior através do molde. Sob condições usuais, a estrutura externa do produto tem granulação mais fina, enquanto o centro tem granulação mais grosseira devido à taxa de resfriamento nas paredes ser mais rápida. A partir desse mesmo conceito, seções mais finas resfriam mais rápida por isso costumam ter granulação mais fina do que seções mais grossas (DOYLE, 1978). Dessa forma, na zona referente ao resfriamento rápido, perto das superfícies do molde, cria-se nessa região a zona coquilhada, devido à nucleação mais intensa. Essa camada tem pequenos grãos finamente dispersos e localizados na superfície do produto. Passado o resfriamento rápido que ocorre nas paredes, ocorre a formação da zona colunar. A ocorrência da mesma se deve ao fato de no centro do molde haver líquido e o calor latente de solidificação ser transferido do centro para as paredes numa velocidade mais lenta, favorecendo um crescimento de grão mais acentuado. O crescimento de cristais colunares em direção ao centro do lingote continua enquanto o calor latente é progressivamente retirado por condução através do sólido e conduzido ao molde. Por outro lado, o

líquido na região central pode tornar-se super-resfriado e com isso aparecer um embrião sólido, que poderá crescer aleatoriamente na forma de cristais. O crescimento desses cristais é bloqueado pelos grãos colunares, criando assim a zona de grão equiaxiais (GARCIA, 2001). A Figura 4 mostra as zonas coquilhada, colunar e a equiaxial.

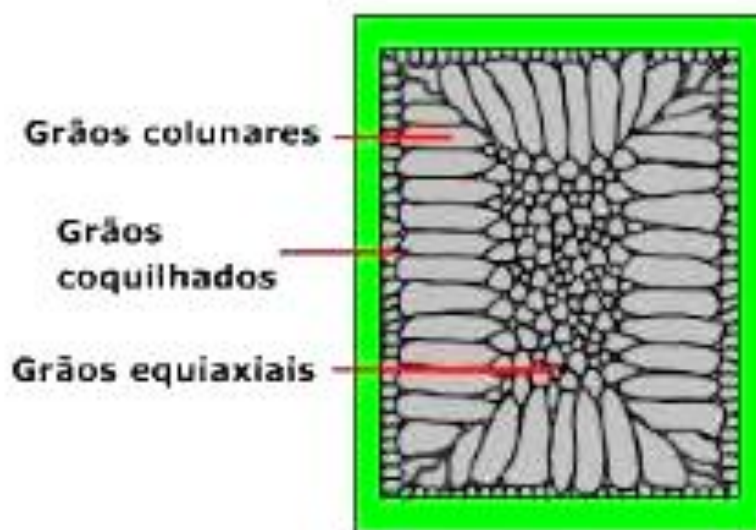


Figura 4 - Ilustração das zonas que ocorrem na solidificação. Fonte: Apostila do curso técnico em mecânica do CEFET/SC, 2002.

2.6 CURVA DE RESFRIAMENTO

Durante a nucleação e crescimento dos primeiros núcleos de sólido, um calor latente da transformação líquido-sólido é liberado. A quantidade de energia liberada depende do tipo e da quantidade de cristais em formação em função do tempo. A quantidade de energia emitida pode ser suficiente para deter o resfriamento do metal, diminuindo a sua taxa de resfriamento (SPARKMAN; KEARNEY, 1994).

Estes eventos energéticos associados à solidificação podem ser analisados a partir das curvas de resfriamento obtidas experimentalmente a partir da medição de campos de temperatura no metal líquido. Esta técnica, conhecida como análise térmica, utiliza conceitos matemáticos como as derivadas ou inflexões nas curvas de resfriamento para interpretar os diferentes fenômenos que ocorrem durante a solidificação (BARLOW; STEFANESCU, 1997 apud Arango; Martorano, 2011). A Figura 5 representa uma curva de resfriamento típica e a derivada de uma liga Al-3%Si.

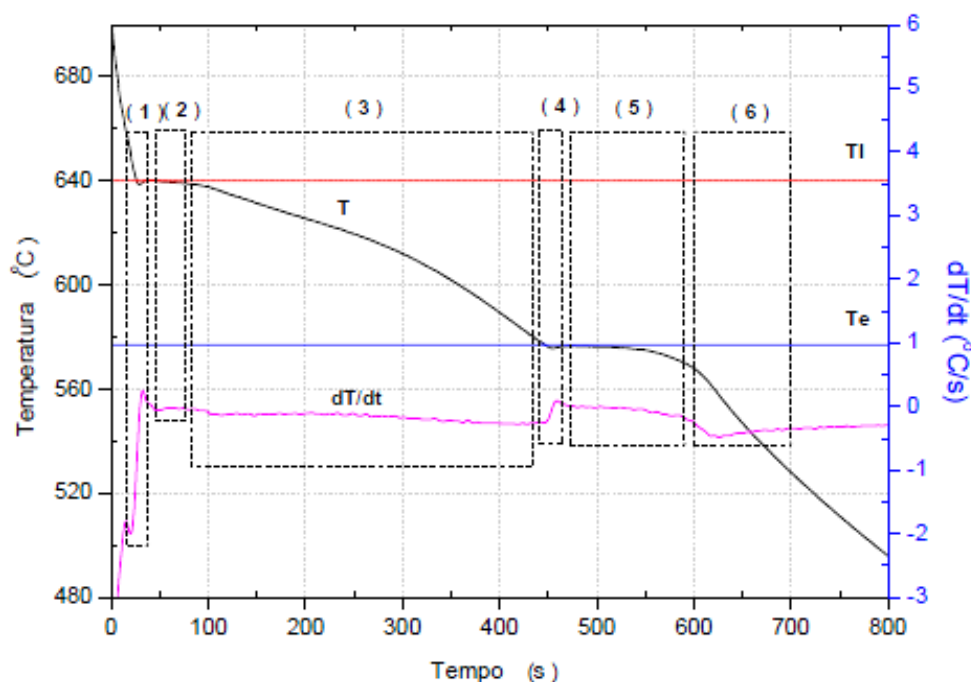


Figura 5 - Curva de resfriamento típica de uma liga Al-3%Si e sua derivada. Fonte: Arango; Martorano, 2011.

- Região (1) Nucleação e livre crescimento dos grãos de alumínio. No máximo valor da derivada (região da recalescência), tem-se uma rápida liberação de calor latente;
- Região (2) Desenvolvimento e crescimento da rede dendrítica da parede em direção ao centro;
- Região (3) Espessamento das dendritas de alumínio;
- Região (4) Nucleação do silício indicando o início da solidificação do eutético. Há um rápido aumento na derivada devido à repentina liberação de calor associado à formação dos cristais de Si;
- Região (5) Continuação do crescimento do silício e também do alumínio contido no eutético;
- Região (6) Término da solidificação, o calor produzido pela solidificação cessa rapidamente e há uma rápida normalização dos gradientes de temperatura do centro para as paredes da amostra.

No estudo realizado por Araujo; Vilella; Verran (s.d.), os resultados das análises térmicas comprovaram que para a liga AA356 o patamar da temperatura eutética diminuiu com acréscimo de 0,022% em peso do modificador estrôncio em relação à liga sem a adição do modificador. Já o estudo realizado por Matsumoto (2012) concluiu que a análise da curva de resfriamento para a liga AA356 com a adição de 1,2g do agente modificador do tipo Al-10%Sr, resultou na diminuição considerável do tempo de solidificação; e também, que 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. Desde modo, pode-se perceber que os estudos em questão chegaram a conclusões diferentes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 LIGA

Para iniciar o experimento, foi utilizado um lingote da liga Al-1%Si. Com o intuito de facilitar a fundição e a colocação do material no cadinho, o mesmo foi cortado em pedaços menores, com auxílio de uma serra hidráulica e uma serra circular, resultando em pedaços de aproximadamente 9 cm³.

3.2 MOLDE

Para confeccionar o molde foi utilizada uma caixa de moldagem, e uma mistura contendo 250g de areia, 250g de argila e água em quantidade suficiente para dar liga. Também foi utilizado um molde de ferro fundido cônico, com volume interno de 407 cm³, e com um orifício na lateral para entrada do termopar.

A mistura de areia, argila e água foi colocada no fundo da caixa de madeira e serviu como base de fundo para o molde de ferro fundido. Foi necessário aguardar, para a secagem da mistura, um intervalo de tempo de 24 horas. Após esse período, o termopar foi inserido no centro do molde, passando pelo orifício do mesmo e selado com durepox para evitar vazamentos da liga fundida. A Figura 6 mostra o molde de fundição confeccionado.



Figura 6 - Ilustração da construção do molde de fundição. Fonte: Autor

O termopar foi conectado ao termômetro para registrar a temperatura a cada segundo. A Figura 7 mostra a bancada utilizada para a realização do experimento.

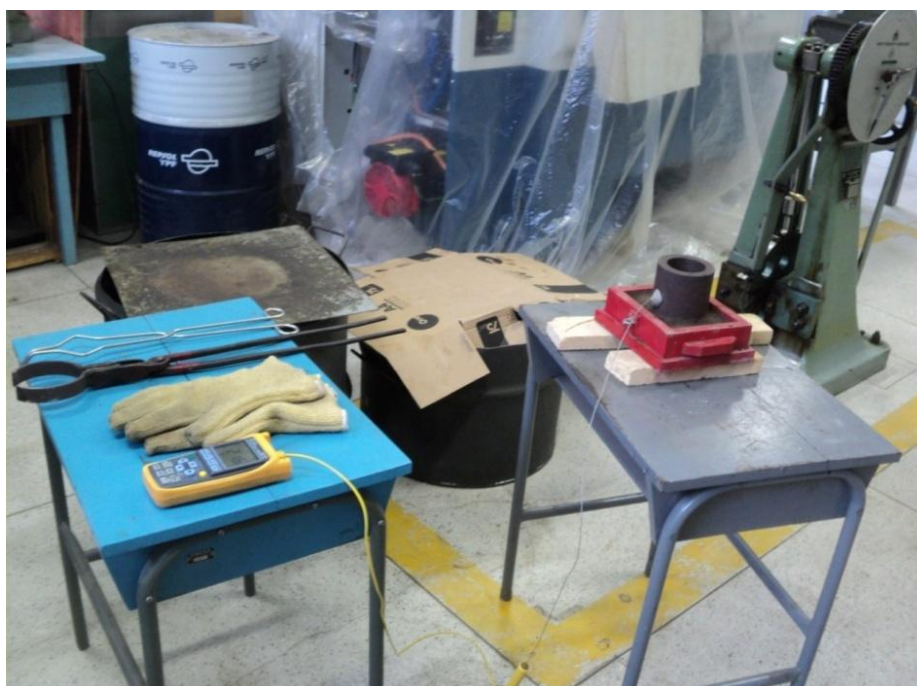


Figura 7 - Bancada experimental. Fonte: Autor

3.3 FUNDIÇÃO

Foram fundidos dois tarugos de alumínio: o primeiro sem elemento modificador (estrôncio) e o segundo com elemento modificador. Para fundição do alumínio foi utilizado um forno tipo mufla e um cadinho de material cerâmico. O cadinho, juntamente com os pedaços de liga, foram inseridos no forno e mantidos no mesmo até atingir a temperatura de 900 graus Celsius, para permitir a fundição da liga de alumínio dentro do cadinho.

Após a completa fusão do material, com o auxílio de uma tenaz, o cadinho foi retirado do forno e com a ajuda de uma escumadeira foi retirada a escória. Em seguida o alumínio fundido foi vazado na forma líquida para dentro do molde de forma contínua para a obtenção de um tarugo cônico com 1 kg de massa. Para a realização do vazamento foram usados equipamentos de segurança adequados, tais como, luva térmica e avental de couro. Na fundição da liga com agente modificador foram colocados 2 g de Al-10%Sr, que representa 0,02% em peso de estrôncio no tarugo com modificador. A Figura 8 mostra o cadinho sendo retirado do forno; já a Figura 9 mostra o vazamento do fundido para o molde e a Figura 10 mostra o auxílio da escumadeira para retirada da escória.



Figura 8 - Retirada do cadinho do forno com o auxílio da tenaz. Fonte: do autor.



Figura 9 - Vazamento do fundido para o molde. Fonte: Autor.



Figura 10 - Auxílio da escumadeira para retirada da escória. Fonte: Autor.

3.4 PROCEDIMENTOS PARA MACROSCOPIA

O tarugo resultante da fundição foi cortado transversalmente, utilizando para isso uma serra de fita. A parte do tarugo acima do termopar (onde se encontrava o rechupe) foi descartada. Desse modo, o tarugo restante foi cortado pela metade para a posterior realização da micro e macrografia. Depois de cortado, as metades foram faceadas em um torno para melhorar o acabamento superficial. Esse procedimento foi realizado no Laboratório do Departamento de Materiais da FEG-UNESP.

A metade do tarugo destinada à macrografia foi lixada utilizando-se lixas com granulometria de 80, 150, 220, 440 e por fim a 600. A Figura 11 mostra a superfície da amostra, depois do lixamento, à espera do ataque químico.



Figura 11 - Amostra lixada, antes do ataque químico. Fonte: Autor.

O ataque químico foi feito com uma mistura de HCl concentrado 75 ml, HNO₃ concentrado 25 ml e HF 48% 5 ml. Com o ataque químico, foi possível evidenciar os contornos de grão do material, conforme Figura 15 na página 32. Esse ataque foi efetuado com o auxílio de algodão embebido com o agente químico e enrolado na ponta de uma haste, para evitar o contato com a pele.

3.5 PROCEDIMENTOS PARA MICROSCOPIA

Foi retirado da região central da metade do tarugo destinada a micrografia, uma placa quadrada de 10 x 10 mm da secção transversal e 5 mm de espessura. Essa amostra foi inserida em um baquelite de forma cilíndrica. A seguir, o conjunto foi lixado, passando pelas lixas com granometria de 80, 150, 220, 440, 600 e por fim a de 1200. Após o lixamento o conjunto foi polido em uma politriz automática, primeiramente com pasta de diamante e o acabamento com OPS. O ataque químico foi feito com uma solução de 2,5% HNO_3 concentrado, 1,5% de HCl concentrado, 1% HF concentrado e 95% de H_2O . Posteriormente as amostras foram analisadas e fotografadas no microscópio óptico. A Figura 12 mostra a amostra do alumínio inserida no baquelite para facilitar o lixamento e polimento da mesma.



Figura 12 - Amostra do alumínio inserido no baquelite. Fonte: Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE DA CURVA DE RESFRIAMENTO

Para plotar os gráficos das curvas de resfriamento, foi utilizado o programa Origin 8.

Os resultados obtidos no experimento sem e com elemento modificador estão apresentados nas Figuras 13 e 14.

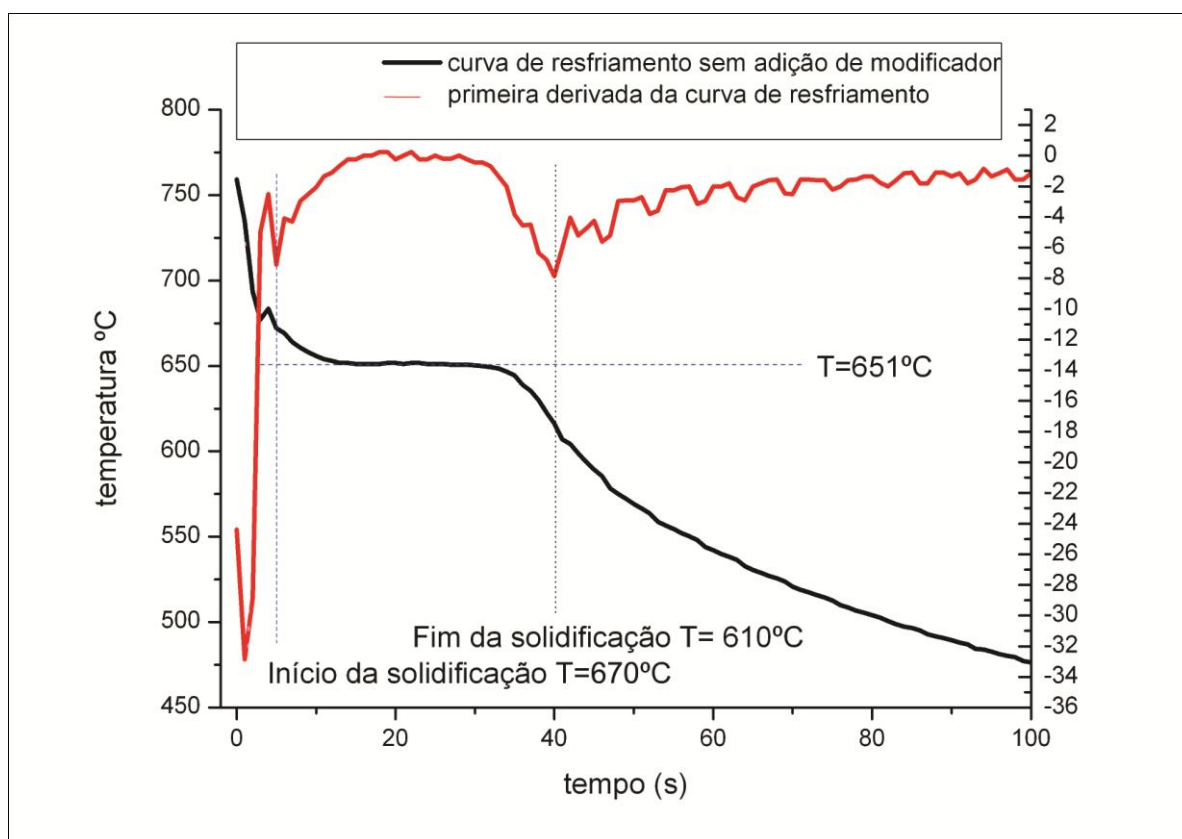


Figura 13- Curva de resfriamento sem adição do modificador de eutético. Fonte: Autor.

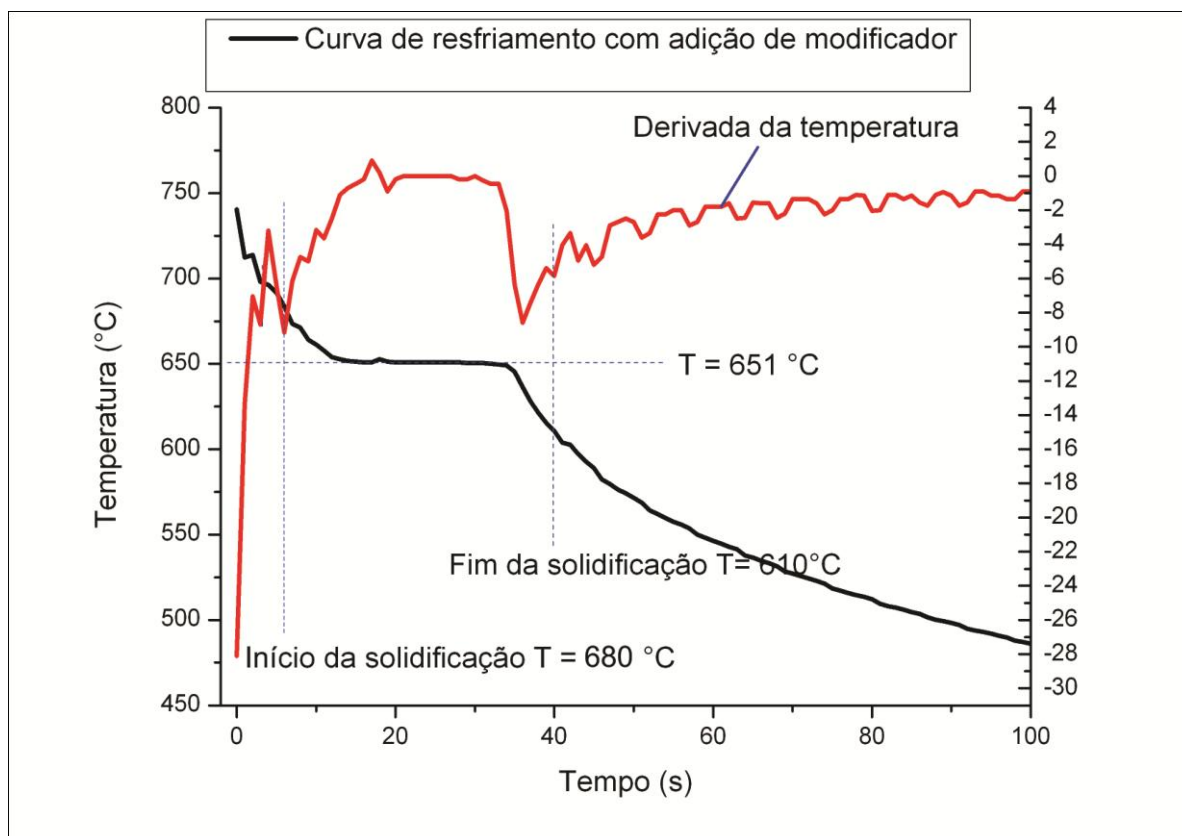


Figura 14 - Curva de resfriamento com adição do modificador do eutético. Fonte: Autor.

Analisando as curvas de resfriamento, percebe-se que os tempos de fim de solidificação não se alteraram e também, os patamares da temperatura eutética permaneceram iguais. É perceptível que as curvas de resfriamento com e sem elemento modificador (Estrôncio) não sofreram alterações evidentes. O resultado da curva de resfriamento corrobora o estudo de Matsumoto (2012), porém, os resultados dos tempos de solidificação da liga Al-1%Si do presente estudo foram diferentes de Matsumoto (2012). Enquanto que, para o primeiro, o tempo de solidificação diminuiu consideravelmente com adição do modificador, nessa pesquisa não foi evidenciada essa alteração.

4.2 ANÁLISE MACROSCÓPICA

A Figura 15 (a) mostra o resultado da macroscopia realizada na secção transversal da amostra sem adição do modificador estrôncio; já a Figura 15 (b) mostra o resultado da macroscopia realizada na secção transversal da amostra com adição do modificador Estrôncio.



(a)



(b)

Figura 15 - Figura 15 (a) mostra o resultado da macrografia realizada na amostra sem modificador; Figura 15 (b) mostra o resultado da macrografia com modificador.

Como podemos observar na Figura 15; a granometria da secção sem a adição do agente modificador é mais fina do que na secção com o agente modificador.

4.3 MICROSCOPIA

As Figuras 16 (a), 17 (a), 18 (a) e 19 (a) mostram fotos tiradas no microscópio óptico sem adição do estrôncio; já as Figuras 16 (b), 17 (b), 18 (b) e 19 (b) mostram fotos tiradas no microscópio óptico com a adição do estrôncio.



(a)

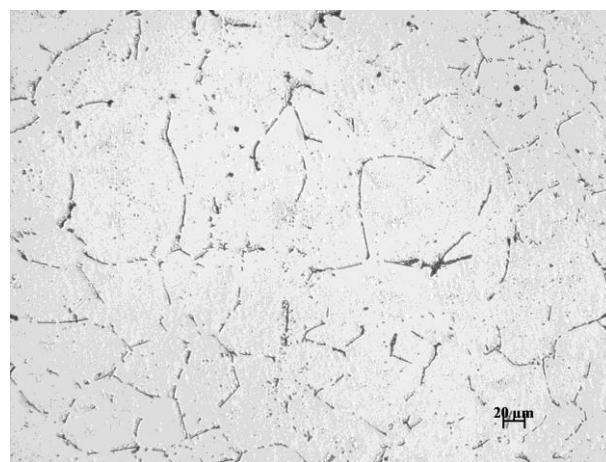


(b)

Figura 16 - (a) Região transversal sem modificador; (b) região transversal com modificador com o aumento de 50x para as ambas as figuras. Fonte: Autor.

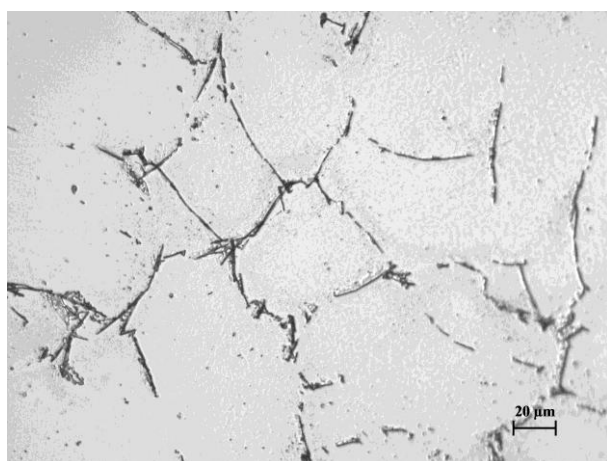


(a)

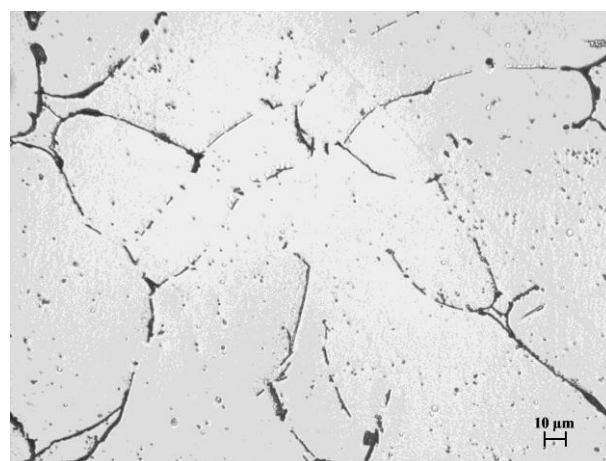


(b)

Figura 17 - (a) Região transversal sem modificador; (b) região transversal com modificador com o aumento de 100x para as ambas as figuras. Fonte: Autor.



(a)



(b)

Figura 18 - (a) Região transversal sem modificador; (b) região transversal com modificador com o aumento de 200x para as ambas as figuras. Fonte: Autor.

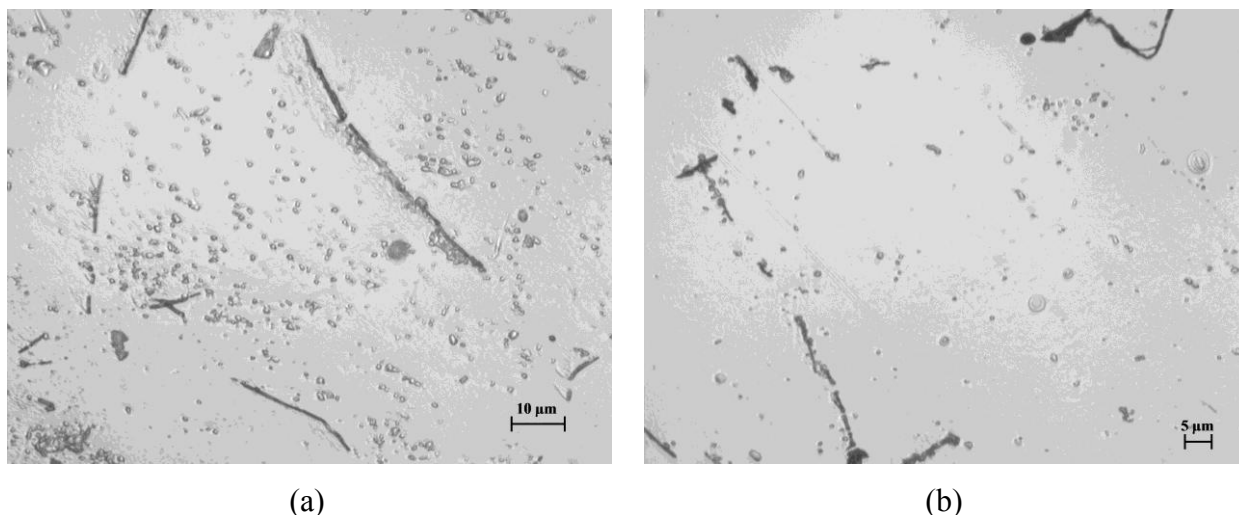


Figura 19 - (a) Região transversal sem modificador; (b) região transversal com modificador com o aumento de 500x para as ambas as figuras. Fonte: Autor.

Foi possível observar na foto representada pela Figura 20 a presença de resíduos do lixamento de polimento; entretanto, esse fato não interferiu nas análises.

Analisando todas as fotos representadas pelas Figuras 17, 18, 19 e 20 não foi possível observar diferenças significativas em relação à modificação do eutético com a adição do estrôncio, quanto aos tamanhos de grãos, também não se observou alterações significativas com o uso do estrôncio.

A Figura 3 na página 19 evidencia a diferença entre amostras modificadas e não modificadas com a utilização do Estrôncio, o que não foi possível perceber nesse trabalho.

Conforme a revisão de literatura, a adição de 0,022% de peso em estrôncio modificou totalmente a liga AA 356. No entanto, abaixo dessa porcentagem de estrôncio haveria modificação parcial da mesma. De acordo com Moreira (s.d.), a liga 356 contém de 6,5 a 7,5% de silício, no entanto a liga utilizada nesse estudo caracterizava-se por conter 1% de Silício. Esse fato pode ter interferido no processo de modificação com a adição de Estrôncio.

5 CONCLUSÃO

As curvas de resfriamento da liga Al-1%Si, com adição de modificador e sem a adição de modificador não sofreram alterações significativas, uma vez que, o tempo de solidificação e o patamar da temperatura eutética não se alteraram com a adição do estrôncio.

Em relação à macroscopia, pode-se concluir que a granulometria da secção sem o elemento modificador (estrôncio) foi mais fina do que na secção com o elemento modificador.

Por meio da microscopia, não foi possível observar diferenças significativas em relação à modificação do eutético com a adição do estrôncio na amostra. Quanto aos tamanhos de grãos, também não se observou alterações significativas com o uso do estrôncio.

Como sugestão para futuros trabalhos, as amostras da liga Al-1%Si poderiam ser em maior quantidade e com diferentes teores de estrôncio, para identificar a porcentagem de modificador necessária para a modificação da estrutura eutética.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMAURO, G. **Solidificação: fundamentos e aplicações**: Unicamp: Campinas, 2001.

ARANGO, J.M.; MARTORANO, M.A. **Estudo de refino de grão das ligas Al-Si através de inoculantes do sistema Al-Ti-Bi. 66º CONGRESSO ABM**. São Paulo, Brasil, 18 a 22 de Julho, 2011.

ARAÚJO, S. K. **Efeito da modificação com estrôncio na microestrutura e nas propriedades mecânicas da liga alumínio-silício 356**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais. PGCEM-UDESC, Joinville - SC, 2012.

ARAÚJO, S. K.; VILELLA, V. M. C.; VERRAN, G.O. **Estudo dos mecanismos atuantes na modificação do silício da liga 356 usando estrôncio**. Campus Universitário UDESC – CCT – DEM. Joinville – SC, Brasil.

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

BRESCIANI, E. F. **Seleção de materiais não ferrosos**: Unicamp: Campinas, 1997.

DOYLE, L. E. **Processos de fabricação e materiais para engenheiros**: Edgard Blucher Ltda: New Jersey USA, 1978.

FURLAN, T. S. **Influência do Teor de Estrôncio na Modificação da Liga A356**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2008.

GOULART, P.R. **Variáveis térmicas de solidificação, microestrutura e propriedades mecânicas de ligas hipoeutéticas Al-Si**. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas - SP, 2005.

LOSEKAN, C. R.; CARPES Jr, W. P.; MORO, N. **Processos de Fundição**. Apostila do Curso Técnico em Mecânica do CEFET/SC, 2002.

MATSUMOTO, L. M. **Estudo do efeito do modificador Al-Sr no tratamento de modificação do eutético da liga AA356**.

MOREIRA, M. F. **Ligas de alumínio para fundição e Relações entre o processo de fundição e a microestrutura**. Escola de Engenharia Mauá, Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT

PERES, M. D.; SIQUEIRA, C. A.; GARCIA A.; Macrostructural and microstructural development in Al–Si alloys directionally solidified under unsteady-state conditions. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 381, p.168, 2004.

SATHYAPAL, H.; PRABHU, N.K. **Modification of eutectic silicon in Al-Si alloys**, **Journal of Materials Science**, v.48, p. 3009-3026, 2008.)

SPARKMAN, D.; KEARNEY, A. **Breakthrough in aluminium alloy thermal analysis technology for process control**. AFS Transactions., v. 102, p. 455-460, 1994.

ZANGRANDI, A. **Alumínio e suas Ligas: Fundamentos metalúrgicos e tecnológicos**. Lorena: Instituto Santa Teresa, 2008.

ZHANG, B.; POIRIER, D.R; CHEN, W, **Efeito da pressão isostática a quente e da modificação sobre a liga A356**. 2 Revista Fundição e Serviços, v.146, p. 18-32, 2004.

<http://www.quimlab.com.br/guiadoselementos/estroncio.htm>. Acessado em 5 de dezembro de 2013.