

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

MARCELO ARAUJO PINTO COLUCI

TRATAMENTO DE MODIFICAÇÃO DE EUTÉTICO
DA LIGA AA356.

Guaratinguetá
2011

MARCELO ARAUJO PINTO COLUCI

TRATAMENTO DE MODIFICAÇÃO DE 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 Kiyari

Guaratinguetá

2011

C726t

Coluci, Marcelo Araujo Pinto

Tratamento de modificação de eutético da liga AA356 / Marcelo
Araujo Pinto Coluci – Guaratinguetá : [s.n], 2011.

85 f : il.

Bibliografia: f. 84-85

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Kiyam

1. Fundição 2. Microestrutura I. Título

CDU 621.74

TRATAMENTO DE MODIFICAÇÃO DE EUTÉTICO DA LIGA AA356.

MARCELO ARAUJO PINTO COLUCI

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. MAURO HUGO MATHIAS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Carlos Kiyun
Orientador/UNESP-FEG


Eng.ª Cássia Cavalcanti da Silva
UNESP-FEG


Eng.º Túlio Stefani Colombaroli
UNESP-FEG

Dezembro de 2011

DADOS CURRICULARES

MARCELO ARAUJO PINTO COLUCI

NASCIMENTO 17 - 11- 1986 – CAMPINAS – SP

FILIAÇÃO Odair Coluci
Naéd Araujo Pinto Coluci

2006/2011 Graduação em Engenharia Mecânica
UNESP – Guaratinguetá - SP

de modo especial aos meu pais Odair e Naéd, que me proporcionaram esta oportunidade e sempre me apoiaram. A minha namorada Samantha, que esteve ao meu lado em todos os momentos e aos amigos que sempre serão lembrados.

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 Kiyam que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível,

à mestrandia, Cássia, que me auxiliou com o material, apoio e orientação para a realização deste trabalho,

aos meus pais Odair e Naéd, que sempre acreditaram em mim e me incentivaram em meus estudos,

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,

às secretárias da pós-graduação Regina e Mirian pela dedicação e alegria no atendimento, e pela atenção especial dada a mim diante dos meus problemas,

ao meu amigo, Thiago Aziz Trevisan, companheiro nas longas jornadas de estudo, ajudando a enfrentar as dificuldades e vivenciando as alegrias durante este período,

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

EPÍGRAFE

"Determinação coragem e auto confiança são fatores decisivos para o sucesso. Se estamos possuídos por uma inabalável determinação conseguiremos superá-los. Independentemente das circunstâncias, devemos ser sempre humildes, recatados e despidos de orgulho."

Dalai Lama

COLUCI, M. A. P. Tratamento de Modificação de Eutético da Liga AA356. 2011. 85 f. Tese (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá – SP, 2011.

RESUMO

Ligas Al-7%Si-0,3Mg (AA356), por ter excelente combinação de propriedades, como baixa contração de solidificação e uma boa fluidez, boa soldabilidade, alta resistência ao desgaste, elevada relação resistência e peso, tem grande aplicação na engenharia em geral, e particularmente, na engenharia automotiva e aeroespacial. O refino da estrutura eutética de ligas 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 e de terras raras, esses têm capacidade de modificar a estrutura do eutético, mas somente o sódio e o estrôncio produzem uma ação modificadora forte quando utilizadas em baixas concentrações. O efeito modificador transforma os veios de 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. Neste trabalho serão obtidos lingotes da liga AA356 utilizando dois tipos diferentes de moldes: molde metálico e molde de areia. Serão feitas macrografias nos lingotes obtidos para observação das macroestruturas obtidas nos dois tipos de lingotes. Serão retiradas amostras em posições estratégicas dos lingotes para correlacionar microestrutura e taxa de resfriamento. Os resultados mostraram que o material da lingoteira tem forte influência na micro e na macroestrutura resultante.

Palavras-chave: Estrutura eutética. Microestrutura. Macroestrutura. Ligas Al-7%Si-0,3Mg (AA356). Fundição.

COLUCI, M. A. P. Treatment Modification of Eutectic Alloy AA356. 2011. 85 f. Thesis (Bachelor's Degree in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá – SP, 2011.

ABSTRACT

Alloy Al-7%Si-0,3Mg (AA356), having an excellent combination of properties such as low solidification shrinkage and good fluidity, good weldability, high wear resistance, high strength to weight particularly in the automotive and aerospace engineering. The refinement of the structure aluminum silicon eutectic alloy is a fairly common practice in the casting, through the treatment known as modification. You can get the modification for the addition of chemicals and rare earths, these have the ability to modify the structure of the eutectic, but only sodium and strontium produce a strong action modifier when used in low concentrations. The modifying effect of silicon grain turns into a fibrous form branched and enveloped by the metal matrix in the form of a composite structure that has the highest limit of tensile strength, ductility and machinability. This work will be obtained AA356 alloy ingots using two different types of molds: metal mold and sand mold. Macrographs will be made in ingots obtained for observation of the macrostructures obtained in both types of ingots. Will be sampled at strategic locations of the ingots to correlate microstructure and cooling rate. The results showed that the material of the ingot has a strong influence on the resulting micro-and-macrostructure.

Keywords: Eutectic Structure. Microstructure. Macrostructure. Alloy Al-7%Si-0,3Mg (AA356). Foundry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Região do diagrama de fases Al-Si (XIANGFA et al., 2000).....	19
Figura 2 - (a) diagrama binário de fases com um único ponto eutético; (b) representações esquemáticas das microestruturas possíveis em função da composição de cada liga. .	21
Figura 3 - Diagrama de fases do sistema alumínio-silício.	23
Figura 4 - Microestrutura do eutético Al-Si não modificada(aumento 300x).....	24
Figura 5 - Microestrutura do eutético Al-Si modificada com sódio (aumento 300x). .	24
Figura 6 - Microestrutura do eutético Al-Si refinada pela ação de taxas de resfriamento elevadas (aumento 300x).	25
Figura 7 - Taxa de modificação de uma liga A356 contendo 0,022%Sr e 0,0025%P em função do tempo de incubação e do tamanho das partículas Al ₄ Sr.	27
Figura 8 - Variação do índice Q com a porcentagem de Sr para diferentes taxas de resfriamento. (1) 1,5°C/s; (2) 0,5°C/s; (3) 0,08°C/s.	27
Figura 9 - Liga A356 parcialmente modificada. Partículas de silício em forma de placas à esquerda e à direita, silício refinado e com morfologia fibrosa (aumento 200x).	28
Figura 10 - Curva esquemática do resfriamento da região eutética de uma liga Al-Si modificada e uma não modificada.	29
Figura 11 - Representação das três zonas de solidificação da macroestrutura do metal fundido.....	31
Figura 12 - Representação da região onde ocorre o crescimento de grãos colunares. .	32
Figura 13 - Microestrutura encontradas na zona acoplada do eutético Al-Si em função da velocidade de crescimento e gradiente de temperatura no líquido na interface de crescimento.	34
Figura 14 - Diagrama de fases Al-Si.....	36
Figura 15 - Formação das dendritas de alumínio.....	37
Figura 16 - Crescimento das dendritas de alumínio e nucleação do eutético Al-Si.	38
Figura 17 - Crescimento do eutético Al-Si e nucleação de eutéticos secundários de ferro e magnésio no líquido remanescente nas regiões de contornos de células eutéticas.	38
Figura 18 - (a) Liga A356 bruta de fundição com silício na forma fibrosa (200x); (b) pós solubilização a 535°C por 4 horas (200x).	39

Figura 19 - Diagrama de fases eutético binário da liga Al-Si.	40
Figura 20 - Curva de resfriamento típica de uma liga de Al-Si.	42
Figura 21 - Curva de resfriamento com sua primeira derivada e o cálculo da curva zero pela análise de Fourier (BARLOW, STEFANESCU, 1997).	47
Figura 22 - Curva da diferença de temperatura entre o centro e a parede da liga Al-7%Si (BARLOW, STEFANESCU, 1997).	48
Figura 23 - Forno elétrico tipo mufla utilizado para a fundição da liga.	51
Figura 24 - Serra hidráulica, utilizada para cortar pedaços grandes da liga Al-Si AA356.	52
Figura 25 - Serra de fita, utilizada para cortar em pedaços menores a liga Al-Si AA356.	52
Figura 26 - Preparação do molde metálico com fundo de areia de fundição.	53
Figura 27 - Envasamento do fundido da liga no molde metálico.	54
Figura 28 - Envasamento do fundido em molde de areia.	54
Figura 29 - Molde permanente metálico com as pontas dos termopares localizadas na parede e no centro do molde.	55
Figura 30 - Molde de areia com as pontas dos termopares localizadas na parede e no centro do molde.	55
Figura 31 - Termopares conectados ao molde e ao aparelho que capta os dados para a obtenção da curva de resfriamento.	56
Figura 32 - Prensa metalográfica AROTEC PRE 30M (embutidora).	59
Figura 33 - Lixas de granulação utilizadas para lixar os corpos-de-prova recém embutidos.	60
Figura 34 - Politriz automática, utilizada para o polimento das amostras.	60
Figura 35 - Estereomicroscópio utilizado para verificação de ausência de riscos nas amostras.	61
Figura 36 - Corpos-de-prova com a liga AA356 embutidos ao lado do lingote cortado para a obtenção dos corpos-de-prova.	62
Figura 37 - Microscópio óptico de reflexão Nikon Epiphot 200.	63
Figura 38 - Cadinho preenchido com 490g da liga de alumínio.	66
Figura 39 - Pequenos pedaços cortados pela serra de arco da anteliga Al-Sr.	67

Figura 40 - Termopares conectados ao molde de areia e ao sistema de aquisição de dados.	67
Figura 41 - Macroestrutura obtida a partir da liga de alumínio AA356 em molde metálico.	69
Figura 42 - Macroestrutura obtida a partir do lingote da liga de alumínio AA356 em molde de areia.	70
Figura 43 - Gráfico de solubilidade do hidrogênio no metal fundido das ligas de alumínio em geral pela temperatura do fundido.	71
Figura 44 - Macroestrutura obtida a partir do lingote da liga Al-Si AA356 com adição de agente modificador na forma de anteliga Al-Sr fundida em molde de areia.	73
Figura 45 - Microestrutura da amostra da liga Al-Si AA356 fundida em molde de areia (100x).	74
Figura 46 - Microestrutura da parede da amostra da liga Al-Si AA356 fundida em molde metálico (200x).	74
Figura 47 - Microestrutura colorida da região entre a parede e o centro da amostra da liga Al-Si AA356 fundida em molde metálico (200x).	75
Figura 48 - Microestrutura colorida do centro da amostra da liga alumínio-silício com adição de agente modificador Sr (50x).	76
Figura 49 - Microestrutura colorida do centro da amostra da liga alumínio-silício com adição de agente modificador Sr (200x).	76
Figura 50 - Curva de resfriamento da liga AA356 em molde metálico.	78
Figura 51 - Curva de resfriamento da liga AA356 em molde de areia sem adição de agente modificador.	79
Figura 52 - Curva de resfriamento da liga AA356 em molde de areia com adição de agente modificador (anteliga Al-Sr).	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limite de Composição da liga 366 e A356 em peso.....	18
Tabela 2 - Correlação entre microestrutura eutética e morfologia de crescimento de cada fase em sistemas metálicos.	22
Tabela 3 - Sequência de solidificação de uma liga AA356.	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	Aplicações da liga AA356.....	17
2.2	Modificação	19
2.2.1	Ligas eutéticas.....	20
2.2.2	Modificação de eutéticos.....	22
2.2.2.1	Eutético alumínio-silício.....	22
2.2.2.2	O estrôncio (Sr).....	26
2.3	A macroestrutura da liga AA356	29
2.4	A microestrutura da liga AA356	32
2.5	Curvas de resfriamento	41
2.5.1	Interpretação da curva de resfriamento	41
2.5.2	Curva Zero	43
2.5.3	Determinação da coesão dendrítica	48
3	METODOLOGIA.....	49
3.1	Obtenção da macroestrutura da liga AA356	49
3.2	Obtenção da microestrutura da liga AA356	57
3.3	Estudo da liga Al-Si AA356 com adição de agente modificador	63
3.3.1	Macrografia com adição de modificador	65
3.3.2	Micrografia com adição de modificador	68
4	RESULTADOS	69
4.1	Análise da macroestrutura das amostras vazadas em molde metálico e de areia.	69
4.2	Análise da microestrutura das amostras vazadas em molde metálico e de areia.	73

4.3	Análise das curvas de resfriamento da liga Al-Si AA356.....	77
5	CONCLUSÃO.....	82
	REFERÊNCIAS.....	84

1 INTRODUÇÃO

As ligas do sistema Al-Si são as mais importantes e das mais utilizadas entre as ligas de alumínio fundidas, principalmente por sua alta fluidez, baixa contração nos fundidos, elevada resistência à corrosão, boa soldabilidade, fácil brasagem e seu baixo coeficiente de expansão térmica. A microestrutura dessas ligas consiste de uma fase primária de alumínio ou de silício e de uma fase eutética composta por esses dois elementos (COUTO et al., 2010).

As ligas alumínio-silício podem ser classificadas conforme o teor de silício em sua composição. Desta forma são classificadas em hipoeutéticas, eutéticas ou hipereutéticas como segue:

- ligas hipoeutéticas: possuem teores de silício inferiores a 12,6%, desta maneira, por possuírem menor teor de silício, tendem a realizar uma solidificação pastosa, devido a solidificação dendrítica, além de um maior intervalo de solidificação (590 – 520°C);
- ligas eutéticas: possuem teor de silício mais elevado, entre 11 a 13%, diferentemente da liga hipoeutética, ela não tem uma solidificação pastosa, ocorrendo então a transformação líquido – sólido diretamente;
- ligas hipereutéticas: possuem teor de silício acima de 13% e tem como principal característica durante a solidificação, a formação de plaquetas de silício primário. Estas plaquetas aumentam a dureza do material e dão maior resistência ao desgaste às ligas de alumínio; (ALUINFO.COM.BR).

As propriedades mecânicas de qualquer liga, são dependentes de sua microestrutura. E é por esta razão, a importância de se caracterizar a microestrutura das ligas.

A liga utilizada é a liga AA356, doada pela Alcoa na forma de lingotes de 20kg.

O material do lingote será cortado em pedaços menores, colocado em cadinhos, fundido em um forno elétrico e vazado em lingoteiras para a obtenção de lingotes. Serão obtidos lingotes fundidos em moldes de areia sem adição do agente modificador e lingotes com adição do agente modificador.

Desde o momento do vazamento até o término da solidificação, teremos o monitoramento através de um par de termopares acoplados a um sistema de aquisição de dados para a obtenção da curva de resfriamento do material.

O lingote será cortado de forma a apresentar uma seção transversal que será lixada e atacada com reagente para a observação da macroestrutura do mesmo.

A observação microestrutural será feita em amostras retiradas a distâncias distintas da interface metal-molde, para que se analise a mudança na microestrutura conforme se distancia do centro da amostra. Para isso deve-se lixar novamente as amostras, embuti-las e poli-las e só ai então atacá-las para análise em microscópio ótico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aplicações da liga AA356

A liga de alumínio AA356 tem grande aplicação na engenharia em geral, principalmente na engenharia das indústrias automotiva e aeroespacial devido a suas propriedades físicas e mecânicas (HERNÁNDEZ-PAZ;PARY;GRUZLESKI, 2004).

De acordo com a classificação da Aluminum Association, a liga AA356 pertence à série 3 (Al-Si) das ligas para fundição ou fundidos de alumínio. Conforme Furlan (2008), a liga AA356 possui um limite de ruptura aproximadamente de 283 MPa e um limite de escoamento de 207 MPa.

As ligas com menores teores de silício (5 a 7%), caso da liga AA356 que contém 7% de silício, são geralmente empregadas na confecção de peças que utilizam moldes de areia, enquanto que as ligas com maiores teor de silício (9 a 13%), são normalmente vazadas em moldes metálicos permanentes (FURLAN, 2008).

Segundo Associação Brasileira do Alumínio – ABAL (2007), as ligas empregadas nas aplicações gerais de engenharia, frequentemente contém silício em sua estrutura a fim de melhorar suas características de fundição, como fluidez, referindo-se a vazamento, e resistência a trincas de contração quando o metal quente se solidifica e contrai. Algumas ligas também apresentam em sua estrutura uma pequena porção de magnésio em conjunto com silício para tornar a liga mais suscetível a tratamentos térmicos.

As características que a liga Al-Si (AA356), apresenta é sua média resistência mecânica, boa resistência à corrosão e usinabilidade, excelente fluidez e estanqueidade sob pressão. Desta forma suas aplicações são muito amplas, como peças fundidas com seções finas, cilindros, válvulas, cabeçotes, blocos de motores, rodas automotivas, chassis, carrocerias, pistões, caixas de cambio, estrutura de aeronave, ferramentas pneumáticas e componentes arquiteturais anodizados na cor cinza.

Na indústria aeronáutica o alumínio tem sido o material predominante nos aviões, com cerca de 80% em peso, devido ao desenvolvimento de ligas com resistência mecânica mais elevada. Este material também tem sido requisitado para o emprego em foguetes, devido á rigorosa exigência que estes apresentam. Já na indústria automotiva, principalmente em veículos automotivos comerciais, o alumínio é extensamente utilizado, devido aos custos de manutenção e a economia de operação serem cruciais. O uso do alumínio na indústria automotiva é muito promissor pelo fato da busca do menor consumo de combustível buscar uma redução considerável de emissões de poluentes (ABAL, 2007).

A Tabela 1 mostra os limites máximos para composição das ligas 356 e A356 (METALS HANDBOOK, 2004).

Tabela 1 - Limite de Composição da liga 366 e A356 em peso.

	Si	Mg	Cu	Mn	Fe	Zn	Ti	Outros (cada)	Outros (total)
356.0	6,5-7,5	0,20-0,45	0,25	0,35	0,6	0,35	0,25	0,5	0,15
A356.0	6,5-7,5	0,25-0,45	0,20	0,10	0,20	0,10	0,20	0,05	0,15

Se os limites de impurezas forem excedidos, como no caso de haver alto teor de cobre e níquel, a consequência disso é que a ductilidade e a resistência a corrosão decrescem, assim como se houver alto teor de ferro, a resistência e ductilidade também decrescem.

A Figura 1 mostra uma região do diagrama binário de fases das ligas Al-Si contendo de 7 a 11% de Si. Nota-se que o diagrama de fases é uma curva simples eutética.

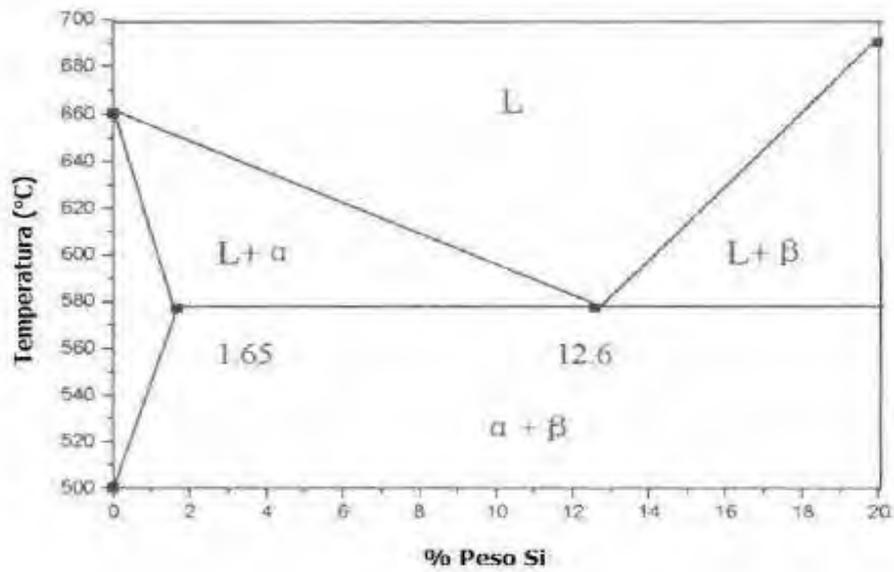


Figura 1 - Região do diagrama de fases Al-Si (XIANGFA et al., 2000).

Furlan (2008) comenta que a microestrutura das ligas Al-Si, é formada basicamente por dendritas de fase alfa e de eutético Al-Si. O controle da formação da microestrutura durante a solidificação tem tornado-se cada vez mais importante para produtores de peças fundidas de alumínio, não só pelo fato da microestrutura determinar as propriedades mecânicas do material, mas também por fatores de fundibilidade e susceptibilidade à formação de defeitos das peças fundidas.

2.2 Modificação

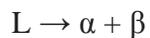
Segundo Amauri Garcia (2001), as ligas eutéticas permitem o crescimento com interface sólido/líquido plana, destacando-se pela variedade de morfologias assumidas durante sua solidificação. O campo de possibilidades de formação microestrutural das ligas polifásicas é ainda amplo, ainda que em situações de interface instável e de solidificação fora de equilíbrio, garantindo suas aplicações diversificadas.

2.2.1 Ligas eutéticas

Uma das características mais marcantes das ligas eutéticas é a capacidade de apresentar um ponto de fusão menor do que o dos dois componentes que a compõem. Existem duas propriedades principais que caracterizam um diagrama eutético simples, sendo eles: a completa solubilidade no estado líquido e a parcial solubilidade no estado sólido, e os dois pares de linhas liquidus e solidus apresentando coeficientes de distribuição de soluto (k) menor do que a sua unidade.

No ponto eutético as duas linhas liquidus se encontram, enquanto que uma linha horizontal à temperatura eutética faz a conexão entre as duas soluções sólidas terminais (GARCIA, 2001).

Nas ligas de composição eutética, o líquido se solidifica com a deposição simultânea das soluções sólidas, α e β , e a reação eutética pode ser definida por:



onde: α e β têm suas composições indicadas respectivamente pelos pontos C e D da Figura 2, que apresenta o diagrama binário de fases.

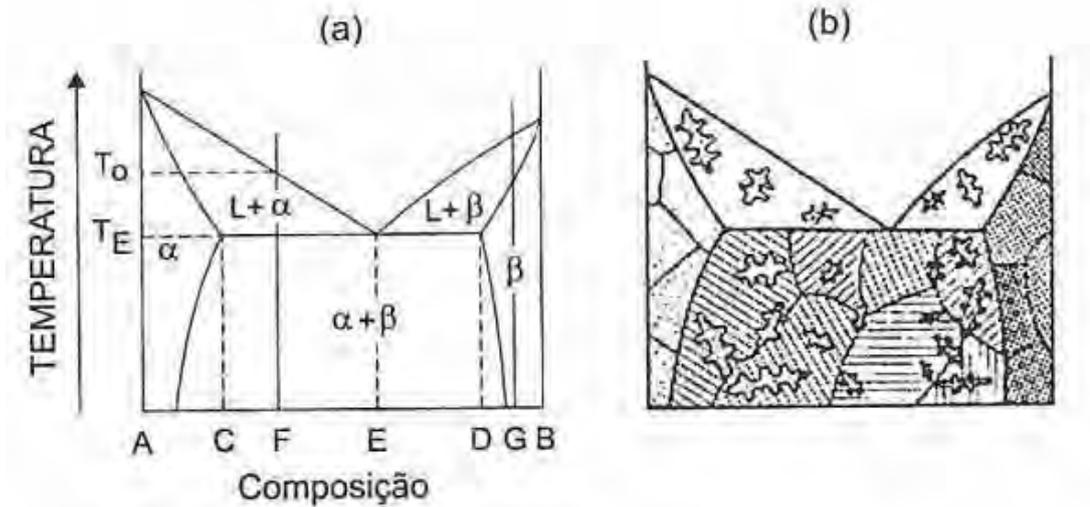


Figura 2 - (a) diagrama binário de fases com um único ponto eutético; (b) representações esquemáticas das microestruturas possíveis em função da composição de cada liga.

Uma característica fundamental da solidificação eutética se dá pelo sólido formado, que representa uma mistura de duas soluções sólidas, ainda que a microestrutura que decorre da mistura dependa da forma de crescimento de cada fase individual: facetada ou difusa (GARCIA, 2001).

Segundo Amauri Garcia (2001), os eutéticos regulares apresentam amplas possibilidades de aplicação na produção de materiais com anisotropia de propriedades. Seu arranjo de fases permite a formação de uma matriz dúctil com a outra fase de maior resistência disposta na direção que necessita de melhores propriedades mecânicas.

As estruturas regulares são constituídas basicamente em dois tipos de microestruturas: lamelares e fibrosas.

As estruturas lamelares são compostas por placas paralelas e alternadas das duas fases sólidas que compõem o eutético. Já a microestrutura fibrosa constitui-se de barras finas de uma das fases, envolvida pela matriz.

Existem também as estruturas regulares complexas, em que se observam duas regiões de aspecto distinto: uma com um padrão regular repetitivo e a outra com orientação ao acaso.

As estruturas irregulares são formadas por orientações ao acaso das suas fases que constituem o eutético. A Tabela 2, mostra a correlação entre microestrutura eutética e a morfologia de crescimento de cada fase em sistemas metálicos (GARCIA, 2001).

Tabela 2 - Correlação entre microestrutura eutética e morfologia de crescimento de cada fase em sistemas metálicos.

Tipo	Microestrutura	Morfologia de crescimento das fases do eutético	Exemplos
I	Regular	Difusa/Difusa	Sn-Pb, Al-Zn, Al-Cu, Al-Ag
II	Regular Complexa	Difusa/Facetada	Al-Si, Sn-Bi, Pb-Bi, Al-Ge
III	Irregular	Difusa/Facetada	Al-Si, Fe-C
		Facetada/Facetada	Compostos Orgânicos

2.2.2 Modificação de eutéticos

Segundo Amauri Garcia (2001), a “modificação” do eutético é um tratamento a qual algumas ligas de composição eutética, usadas na tecnologia de fundição, são passíveis. Este tratamento provoca mudanças marcantes em sua microestrutura, no sentido de melhorar determinadas características mecânicas, através de pequenas alterações químicas na composição química do eutético.

2.2.2.1 Eutético alumínio-silício

O sistema alumínio-silício constitui cerca de 50% das ligas de alumínio utilizadas em indústrias de fundição. Isso ocorre pela combinação de diferentes características físicas e mecânicas, como a elevada fluidez, pequena contração na solidificação,

resistência à corrosão, soldabilidade e boa relação resistência/peso. A Figura 3 mostra o diagrama de fases do sistema alumínio silício.

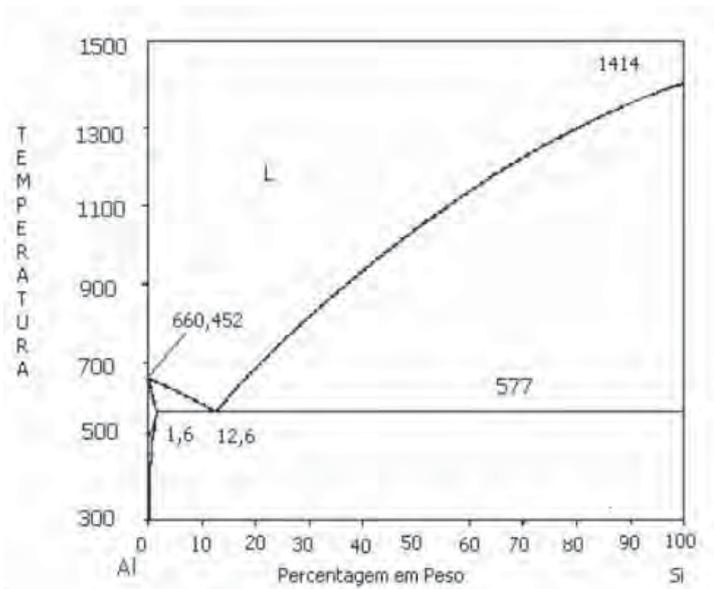


Figura 3 - Diagrama de fases do sistema alumínio-silício.

O refino da estrutura eutética de ligas alumínio-silício é amplamente comum na fundição, através da modificação. A modificação pode se dar de forma natural, pela imposição de altas velocidades de solidificação, ou pela adição de agentes químicos modificadores quando tratar-se de um típico processo de resfriamento lento, como a fundição em moldes de areia. Alguns elementos químicos, como os dos grupos I e II-A da tabela periódica, tem o potencial de modificar a estrutura do eutético, porem apenas o sódio e o estrôncio produzem ação modificadora forte, mesmo em suas baixas concentrações exigidas para aplicações comerciais (GARCIA, 2001).

Ambas as formas modificadoras transforma os veios de silício em uma forma fibrosa e ramificada envolvida pela matriz metálica na forma de uma estrutura composta, e apresentam um nível muito melhor de propriedades como limite de resistência à tração, ductilidade, dureza e usinabilidade. A Figura 4, 5 e 6 mostram exemplos de microestruturas do eutético alumínio-silício no estado não modificado, modificado pela

ação do sódio e modificado naturalmente pela ação de taxas de resfriamento mais elevadas, respectivamente (GARCIA, 1978).



Figura 4 - Microestrutura do eutético Al-Si não modificada(aumento 300x).



Figura 5 - Microestrutura do eutético Al-Si modificada com sódio (aumento 300x).



Figura 6 - Microestrutura do eutético Al-Si refinada pela ação de taxas de resfriamento elevadas (aumento 300x).

Inicialmente, atribuiu-se o refino do silício a repetidas nucleações do silício, que é continuamente envolvido pela fase metálica. Hoje em dia, sabe-se que embora o agente químico atue de forma a diminuir a temperatura de nucleação, o silício cresce de forma contínua sem a ocorrência de repetidas nucleações e com maiores valores de super-resfriamento e afeta somente o silício, sem causar efeitos na fase rica em alumínio. Sendo assim, a modificação está associada a uma mudança no mecanismo de crescimento do silício, passando da fase facetada para uma morfologia de crescimento mais isotrópica.

A eficácia dos agentes químicos modificadores depende de diversos fatores além da relação de tamanhos atômicos (r) agente químico/silício, tais como o ponto de fusão, a energia livre de formação de óxidos, etc. O sódio, mesmo com a capacidade de dissolver-se e misturar-se rapidamente no líquido sem sofrer oxidação, perde seu poder relativamente rápido, apesar de exercer uma ação modificadora muito eficiente nesse intervalo de tempo. Já o estrôncio, dissolve-se rapidamente, mas sofre uma ligeira oxidação, porém, possui um potencial de ação mais duradouro, com um poder modificador mais fraco que o sódio (GARCIA 2001).

2.2.2.2 O estrôncio (Sr)

O estrôncio é o elemento de modificação mais utilizado devido ao seu efeito mais duradouro, facilidade de controle de adição, facilidade de estocagem, menor reatividade com refratários, etc. As ligas que contêm mais que 63% de Sr reagem quimicamente com o ar e formam espessas camadas de óxidos. Por conta dessa alta reatividade do Sr com o ar, pode-se adicionar Sr nas ligas Al-Si na forma de anteliga Al-Sr, com as composições mais comuns de Al-5%Sr, Al-10%Sr e Al-15%Sr. Pode-se também utilizar-se de ligas pré-modificadas que podem ser refundidas pela alta estabilidade do estrôncio(FURLAN, 2008).

De acordo com Furlan (2008), a dissolução das anteligas Al-Sr se dá de maneira simples, não há produtos de reação quando são imersas no banho. Porém, há um tempo de incubação, que varia de acordo com as reações:



A reação (a) depende do tamanho das partículas Al_4Sr , já a reação (b) depende da quantidade de fósforo presente no banho.

Segundo Furlan (2008), pode-se determinar a quantidade ideal de estrôncio a ser adicionada, através da relação entre a quantidade de estrôncios e as propriedades mecânicas na liga.

O índice de qualidade Q relaciona a tensão de ruptura e o alongamento, e é comumente usado para avaliar as propriedades mecânicas das ligas de alumínio. Para aumentar a tensão de ruptura e alongamento, a fim de que se melhore o índice de qualidade das ligas, pode-se manipular a composição química, microestrutura e tratamento térmico. Para as ligas A356 utiliza-se a seguinte relação apresentada na Figura 7:

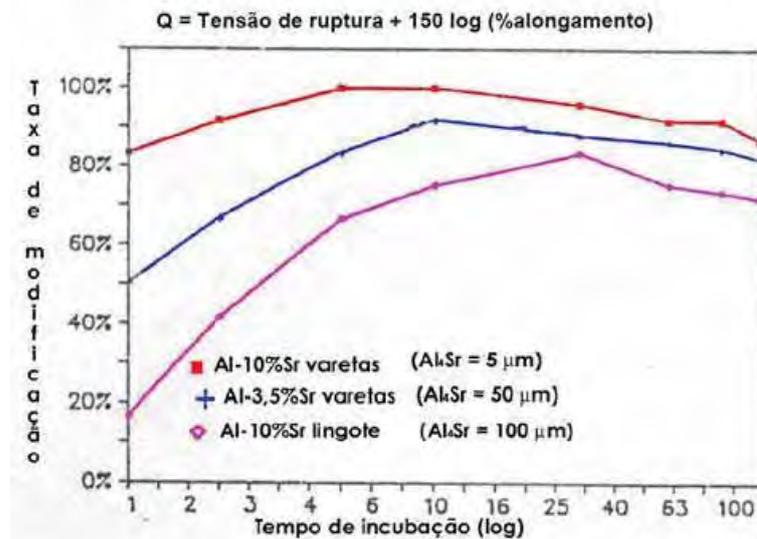


Figura 7 - Taxa de modificação de uma liga A356 contendo 0,022%Sr e 0,0025%P em função do tempo de incubação e do tamanho das partículas Al4Sr.

A Figura 8 mostra a relação entre a quantidade de estrôncio e as propriedades mecânicas da liga que pode determinar a quantidade ideal de estrôncio a ser adicionada.

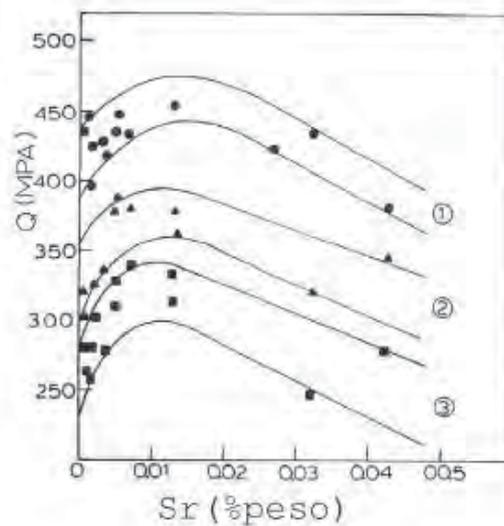


Figura 8 - Variação do índice Q com a porcentagem de Sr para diferentes taxas de resfriamento. (1) 1,5°C/s; (2) 0,5°C/s; (3) 0,08°C/s.

Pela análise dos gráficos, verifica-se que a quantidade ideal de estrôncio a ser adicionada esta em torno de 0,010% a 0,012% em peso. Apesar disso são realizados estudos que defendem o uso de estrôncio entre 0,005% e 0,010% em peso.

As ligas com teores de estrôncio menores que o necessário para atingirem uma modificação ideal, tendem a apresentar uma microestrutura parcialmente modificada, nas quais partículas de silício em forma de placas coexistem com partículas de silício fibrosa conforme mostrado na Figura 9. Essas ligas são obtidas a partir de uma combinação de dois fatores: baixa velocidade de resfriamento e adição de estrôncio insuficiente.



Figura 9 - Liga A356 parcialmente modificada. Partículas de silício em forma de placas à esquerda e à direita, silício refinado e com morfologia fibrosa (aumento 200x).

Ainda segundo Furlan (2008), as ligas com teores de estrôncio superiores ao necessário para a modificação são nomeadas supermodificadas. Estudos mostram que a modificação das ligas Al-Si pela adição de Sr é responsável pela aceleração do processo de dissolução de partículas intermetálicas contendo ferro (β -Al₅FeSi). Tais partículas são prejudiciais às propriedades mecânicas de alongamento dessas ligas, uma vez que crescem de forma alongada.

A análise térmica é amplamente utilizada na indústria de fundição de alumínio. As curvas de resfriamento das ligas Al-Si hipoeutéticas e eutéticas apresentam diversas características importantes:

- Conforme o estrôncio é adicionado, há um aumento da depressão da temperatura de nucleação e da temperatura de crescimento eutético, conforme ilustrado na Figura 10;
- A reação eutética se estende por mais tempo na presença de estrôncio;
- A diferença entre a temperatura mínima e a temperatura de crescimento eutético aumenta quando a liga é modificada;

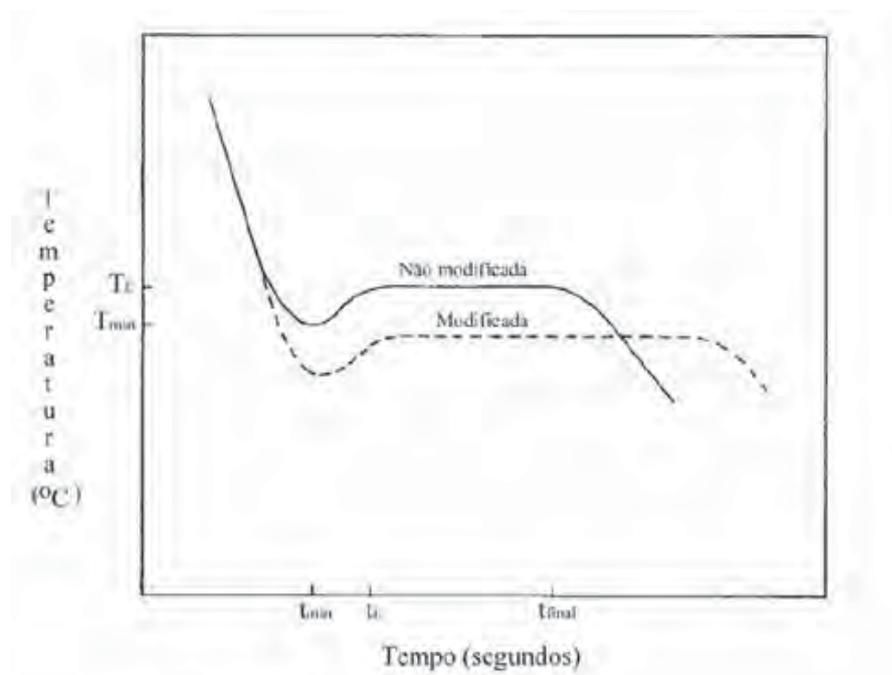


Figura 10 - Curva esquemática do resfriamento da região eutética de uma liga Al-Si modificada e uma não modificada.

2.3 A macroestrutura da liga AA356

Geralmente a solidificação dos metais ocorre em duas etapas consecutivas, uma primeira nucleação e uma segunda de surgimento e crescimento de uma fase sólida em meio ao metal líquido. Quando o metal apresenta-se no estado líquido, os átomos movimentam-se aleatoriamente a partir da diminuição da temperatura. Estes átomos

começam a adquirir maior estabilidade termodinâmica e a criar pequenas regiões, conhecidas como embriões, formando assim 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 procedimento, a interface sólido-líquido forma uma estrutura específica de crescimento, que pode ser classificado como não-facetado, característico dos metais, ou então facetados, encontrados geralmente em materiais metálicos ou intermetálicos (ARANGO, 2009).

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 pode ocorrer simultaneamente com a formação de novos núcleos de solidificação em outras partes do metal fundido. Dessa maneira, o que determinará a macroestrutura final do material é a competição entre o crescimento e a nucleação de novos grãos.

Encontramos três principais zonas de solidificação na macroestrutura dos metais fundidos. São elas: zona coquilhada, zona colunar, e zona euiaxial.

A Figura 11 apresenta esquematicamente essas três principais zonas de solidificação encontradas na macroestrutura de materiais metálicos fundidos (ARANGO, 2009).

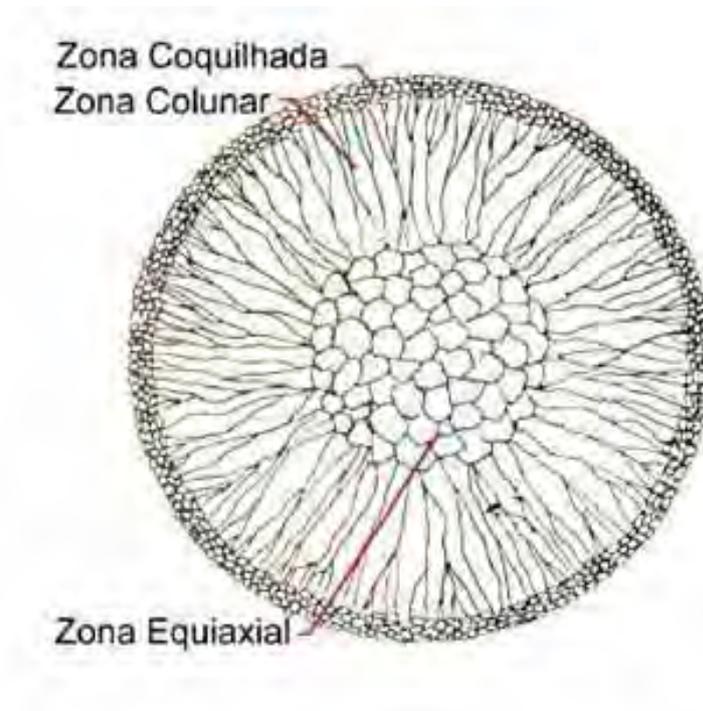


Figura 11 - Representação das três zonas de solidificação da macroestrutura do metal fundido.

Na zona coquilhada, os grãos encontrados nucleiam-se e crescem próximos à parede do molde devido à taxa de resfriamento ser maior. A nucleação ocorre com mais intensidade nesta parte e é influenciada por parâmetros como o coeficiente de transferência de calor na interface metal-molde, definido 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 tem direção de crescimento preferencial paralelo ao fluxo de extração do calor e o crescimento se dá até a condição que for favorável ao surgimento e crescimento dos grãos colunares (ARANGO, 2009).

A Figura 12 é uma representação dessa região onde ocorre o surgimento e crescimento dos grãos colunares (ARANGO, 2009).

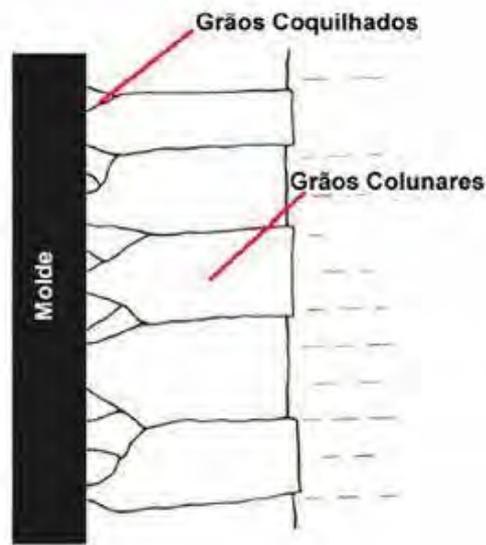


Figura 12 - Representação da região onde ocorre o crescimento de grãos colunares.

A zona equiaxial é uma das estruturas mais desejáveis na fundição de metais. Por este motivo o seu estudo é o mais relevante em análises da macroestrutura dos materiais metálicos.

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

2.4 A microestrutura da liga AA356

Segundo Furlan (2008), as ligas Al-Si são muito utilizadas, principalmente pela atrativa combinação de boas propriedades físicas com sua ótima fundibilidade. A

obtenção das melhores combinações de propriedades mecânicas depende do controle de fatores envolvidos no tratamento do metal líquido e na solidificação, tais como o teor de hidrogênio dissolvido no líquido, velocidade de solidificação e refino de grãos, grau de modificação do eutético, bem como etapas posteriores de processamentos tal como tratamento térmico.

Existem três variáveis que afetam a morfologia de cristais em ligas eutéticas. São eles: a composição, o gradiente de temperatura e a taxa de resfriamento.

A Figura 13 mostra o gráfico relacionando as microestruturas encontradas na zona acoplada das ligas Al-Si com gradiente de temperatura (G) e velocidade de crescimento (R), que Day e Hellawell, em 1968, estabeleceram para as ligas Al-Si eutéticas solidificadas direcionalmente (FURLAN, 2008).

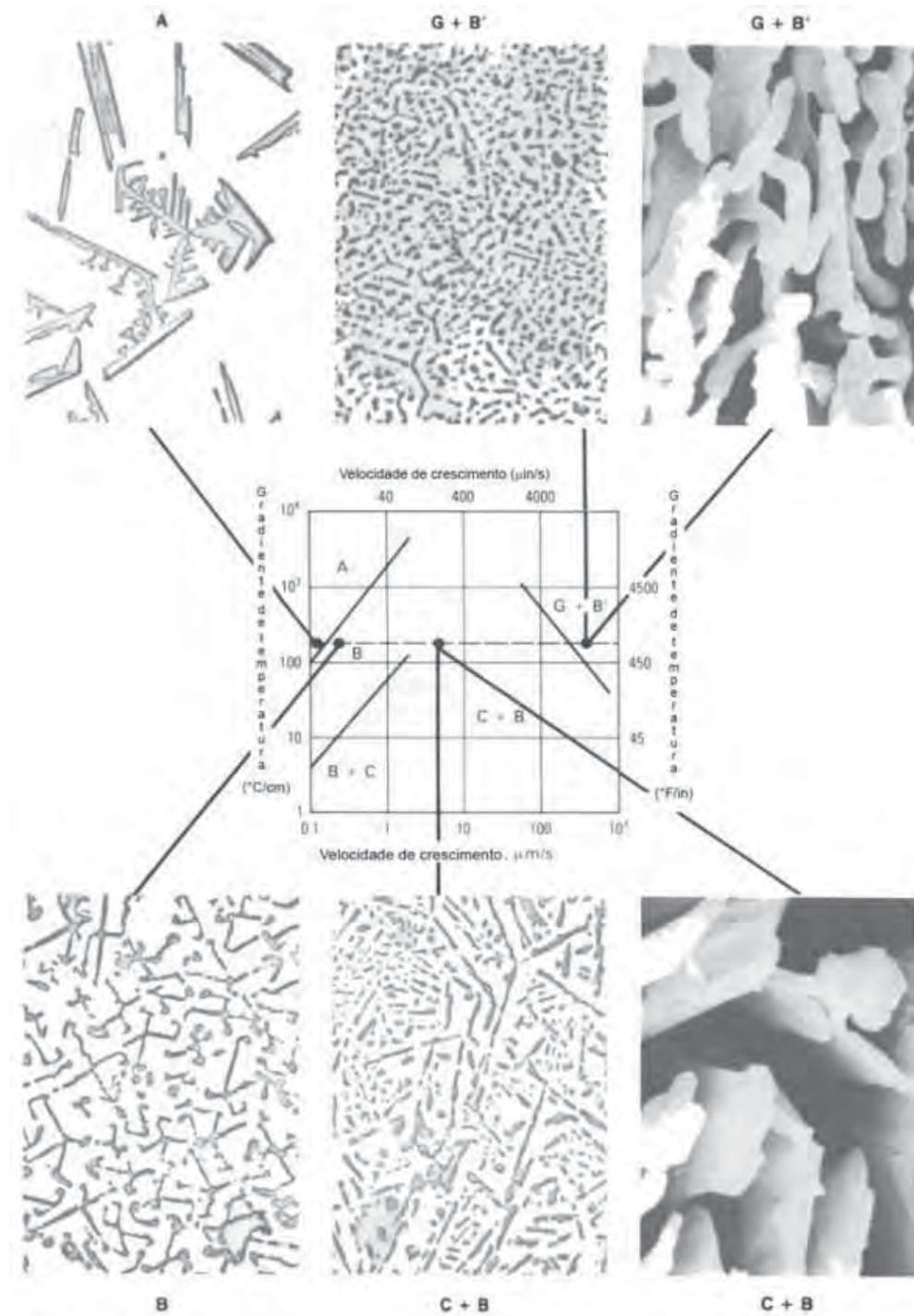


Figura 13 - Microestrutura encontradas na zona acoplada do eutético Al-Si em função da velocidade de crescimento e gradiente de temperatura no líquido na interface de crescimento.

A região A da Figura 13 apresenta partículas de silício eutético massivas e facetadas em uma matriz de alumínio, sua micrografia mostra o silício eutético massivo facetado (100x). A região B apresenta partículas de silício eutético em forma de bastonetes e bastonetes com placas laterais em uma matriz de alumínio, sua micrografia mostra bastonetes com placas laterais facetados de silício eutético (100x). A região B + C, apresenta partículas de silício eutético angulares e em forma de placas em uma matriz de alumínio. A região C + B, apresenta partículas de silício eutético em forma de placas com algumas partículas angulares em uma matriz de alumínio, sua micrografia mostra placas de silício eutético com um pouco de silício angular (100x). E por final a região G + B' apresenta partículas de silício fibroso modificadas por resfriamento rápido com algumas partículas angulares modificadas em uma matriz de alumínio, sua micrografia mostra silício fibroso modificado por resfriamento rápido e silício angular modificado (100x) (FURLAN, 2008).

A Figura 14 mostra um eutético simples no diagrama binário de fases Al-Si. As ligas Al-Si mais importantes são principalmente hipoeutéticas, contendo de 7% a 11% Si (FURLAN, 2008).

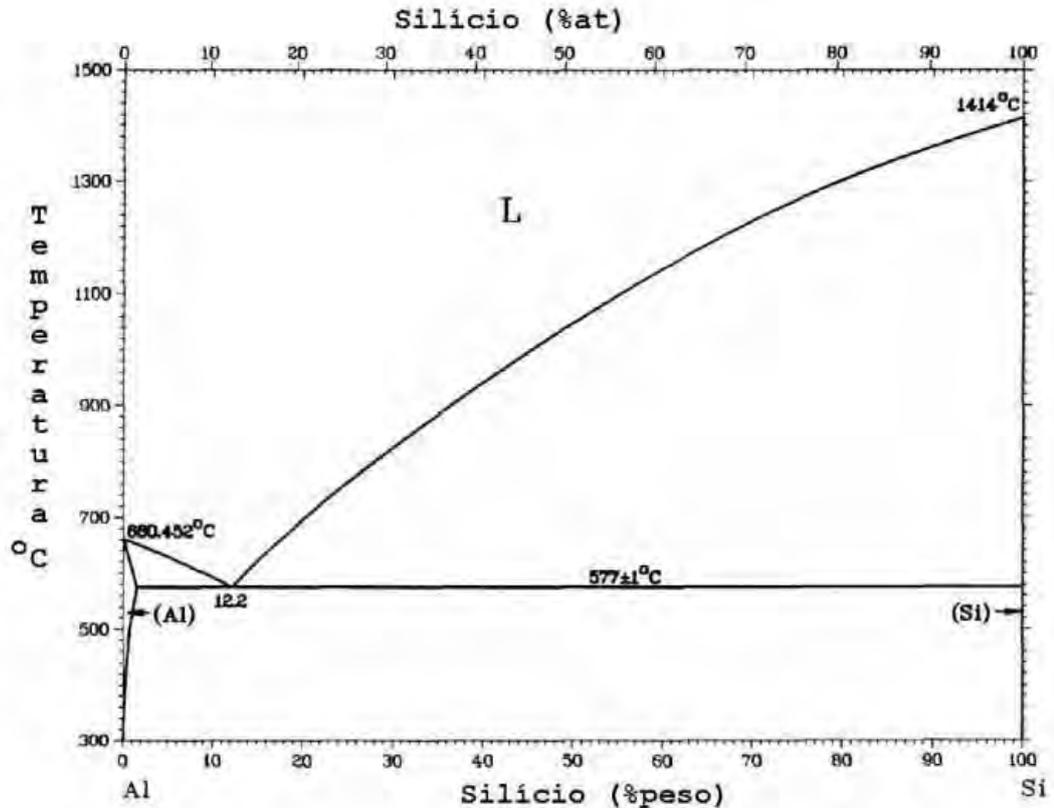


Figura 14 - Diagrama de fases Al-Si.

A microestrutura das ligas Al-Si hipoeutéticas é formada basicamente de dendritas de fase alfa (a qual contém alumínio quase puro com alguma solubilidade de Si, Mg, etc) e do eutético Al-Si. O eutético Al-Si é do tipo anômalo, porque as características de crescimento do alumínio e do silício eutéticos são facetado e não facetado, respectivamente. Além disso, na presença de modificadores, a morfologia do silício sofre uma transição e tem sua forma de crescimento modificada (FURLAN, 2008).

Segundo foi determinado por Backerud et al. (1991), a seqüência de solidificação de uma liga AA356 (de composição 6,8%Si, 0,08%Fe, 0,04%Cu, 0%Mn, 0,35%Mg, 0,01%Zn e 0,15%Ti) é dada pela Tabela 3:

Tabela 3 - Seqüência de solidificação de uma liga AA356.

Número	Reações	Temperatura (°C)
1	$L \rightarrow$ dendritas de fase α	615
2a	$L \rightarrow \alpha + Si$	575
2b	$L \rightarrow \alpha + Al_5FeSi$	575
3a	$L \rightarrow \alpha + Si + Al_5FeSi$	567
3b	$L + Al_5FeSi \rightarrow \alpha + Si + Al_8Mg_3FeSi_6$	567
4	$L \rightarrow \alpha + Mg_2Si + Si$	555
5	$L \rightarrow \alpha + Si + Mg_2Si + Al_8Mg_3FeSi_6$	554

A Figura 15 mostra a reação 1, onde começa a formação das dendritas de alumínio na seqüência de solidificação das ligas Al-Si hipoeutéticas. O alumínio líquido em azul e dendritas de alumínio em preto (FURLAN, 2008).

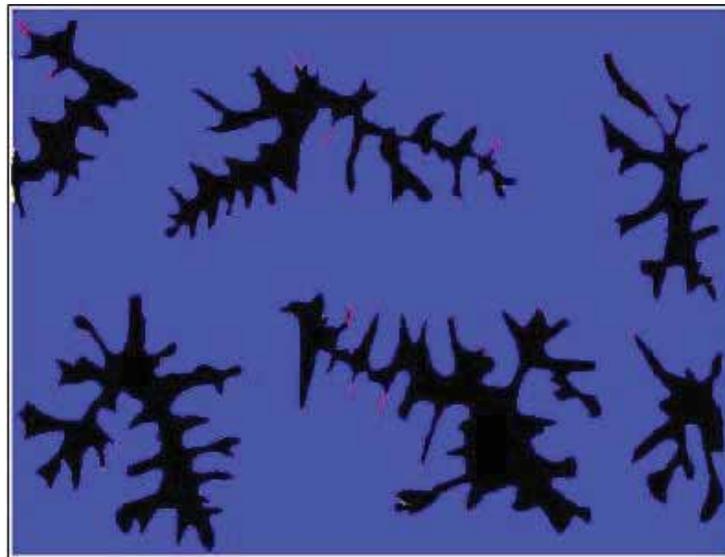


Figura 15 - Formação das dendritas de alumínio.

A Figura 16 mostra a reação 2a. Ocorre o crescimento das dendritas de alumínio e nucleação do eutético Al-Si. O alumínio líquido em azul, dendritas de alumínio em preto e eutético Al-Si em cinza (FURLAN, 2008).



Figura 16 - Crescimento das dendritas de alumínio e nucleação do eutético Al-Si.

A Figura 17 mostra as reações 2a, 2b, 3a, 3b, 4 e 5. Ocorre o crescimento do eutético Al-Si e nucleação de eutéticos secundários de ferro e magnésio no líquido remanescente nas regiões de contornos de células eutéticas. O alumínio em azul, dendritas de alumínio em preto e eutético Al-Si em cinza (FURLAN, 2008).

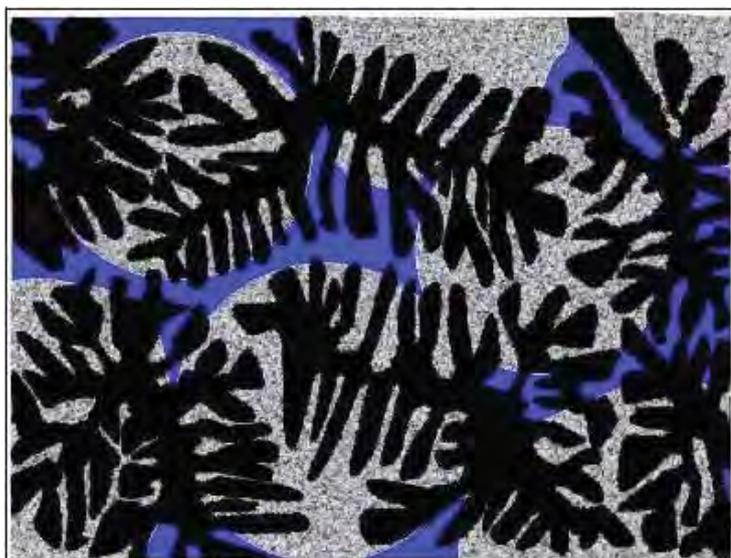


Figura 17 - Crescimento do eutético Al-Si e nucleação de eutéticos secundários de ferro e magnésio no líquido remanescente nas regiões de contornos de células eutéticas.

A reação eutética influencia fortemente nas propriedades mecânicas dessas ligas, já que esta é responsável pelo tamanho, morfologia e quantidade de fases eutéticas presentes na liga, além da distribuição e morfologia das partículas de silício e do nível de microporosidade na microestrutura (FURLAN, 2008).

Segundo Furlan (2008), em boa parte das aplicações, as ligas A356 são tratadas termicamente. O principal objetivo é elevar a resistência mecânica através da dissolução das partículas de Mg_2Si incoerentes com a matriz precipitadas nos contornos de células eutéticas, para obter nova precipitação destas partículas com distribuição mais fina e coerente com o reticulado cristalino da matriz (fase alfa). Um outro efeito desejável do tratamento térmico é a quebra e a esferoidização das partículas de silício do eutético durante a solubilização. Em ligas no estado bruto de solidificação que apresentam silício na forma fibrosa, o tratamento térmico garante um alto grau de esferoidização destas partículas, conforme mostrado na Figura 18.

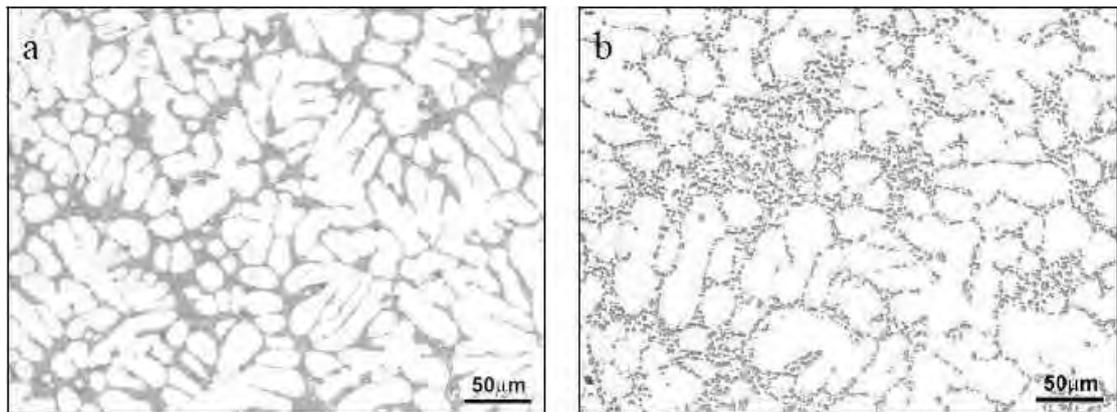


Figura 18 - (a) Liga A356 bruta de fundição com silício na forma fibrosa (200x); (b) pós solubilização a 535°C por 4 horas (200x).

Segundo Marcelo F. Moreira e Ricardo Fuoco, os elementos de liga têm por objetivo aumentar a resistência mecânica, porém, impurezas podem ser prejudiciais para determinadas ligas. Os agentes modificadores mais empregados são o sódio, o estrôncio e o antimônio.

Adições destes elementos (entre 0,005 e 0,02% em peso) promovem fortes alterações no crescimento da fase beta (silício) do eutético: a fase beta passa a exibir uma morfologia mais refinada, aumentando a ductilidade das ligas Al-Si fundidas.

Independente do tratamento de modificação, elevadas velocidades de resfriamento, como as obtidas em moldes metálicos, contribuem para refinar o tamanho dos grãos e a estrutura do próprio eutético.

A figura 19 ilustra o diagrama de fases eutético binário da liga Al-Si e mostra fotos das microestruturas para algumas porcentagens de Si.

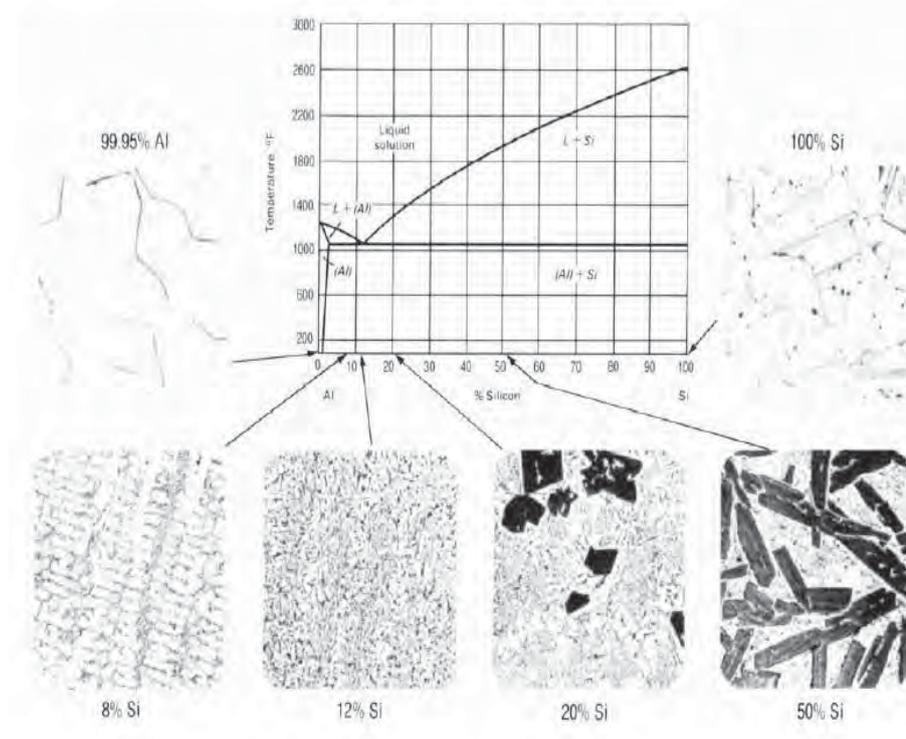


Figura 19 - Diagrama de fases eutético binário da liga Al-Si.

A modificação com estrôncio é realizada por meio da adição de estrôncio metálico ou na forma de anteliga Al-Si (MARCELO F. MOREIRA; RICARDO FUOCO).

2.5 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 por exemplo, os ferros fundidos (BARLOW, STEFANESCU, 1997).

2.5.1 Interpretação da curva de resfriamento

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 também na forma da curva de resfriamento, com exceção, somente à zona de congelamento que é o segmento da curva de análise térmica de resfriamento, do líquido fundido até o fim da solidificação.

Analisaremos uma 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 várias transformações que ocorrem durante o processo de resfriamento. Os termopares que são utilizados para fazer a leitura das temperaturas dentro do molde, indicam na verdade apenas 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. Assim, o fundidor deve atentar-se quanto ao uso da curva de resfriamento para identificar a ocorrência de uma transformação de fase e amplitude (BARLOW, STEFANESCU, 1997).

A Figura 20 ilustra uma curva de resfriamento típica de uma liga de Al-Si (BARLOW, STEFANESCU, 1997).

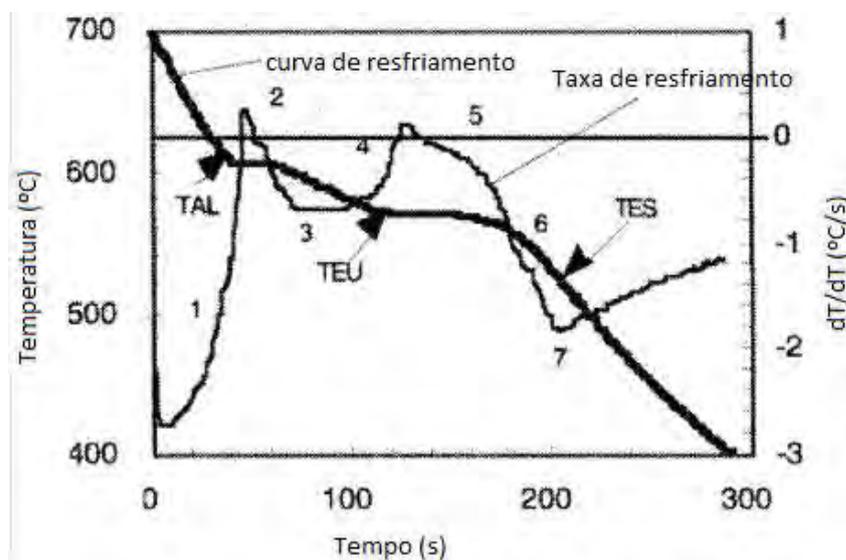


Figura 20 - Curva de resfriamento típica de uma liga de Al-Si.

O ponto TAL (Temperature of Líquidus Arrest) é a temperatura em que as dendritas primárias (α -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 α -Al (formação das dendritas primárias). O ponto TEU (Temperature of Eutectic Undercooling) é a temperatura de subresfriamento eutético. É nele que 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. O ponto TES (Temperature of the End Solidification) é a 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 20, aumentam de valor enquanto que no final da solidificação a taxa de resfriamento (primeira derivada) diminui, devido ao gradiente de temperatura menor nas regiões 2 e 5, conforme ilustrado na Figura 20.

Na solidificação dendrítica, deve-se distinguir entre o crescimento dendrítico livre, onde as dendritas 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 AA356, o qual foi construído o gráfico da Figura B (BARLOW, STEFANESCU, 1997).

2.5.2 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, focaremos em dois métodos de análise e construção da curva zero que nos são interessantes: análise Newtoniana e a análise de Fourier.

Iniciemos os nossos cálculos para se determinar a curva zero pela análise Newtoniana.

Nessa análise, assume-se que a amostra sofre resfriamento newtoniano, isso significa que o gradiente térmico em toda a 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 2 da análise newtoniana, podemos obter a curva zero.

$$h \cdot A \cdot (T - T_{\infty}) = v \cdot \rho \cdot c_p \cdot (-dT/dt) \quad (2)$$

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_{∞} é 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.

Para a análise de Fourier, admite-se que a transferência de calor ocorra somente por condução, e a curva zero é obtida pela seguinte Equação 3:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha \nabla^2 T}{C_v} \quad (3)$$

onde C_v é o calor específico volumétrico, e Q é o calor envolvido durante a solidificação. Rearranjando a Equação 3 e admitindo que para a Equação 4, temos:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = c_V \left(\frac{\partial T}{\partial t} - Z_F \right) \quad (4)$$

A Equação 5 resulta em:

$$Z_F = \alpha \cdot \nabla^2 T \quad (5)$$

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 6:

$$\nabla^2 T = \frac{4 \times (T_2 - T_1)}{R_2^2 - R_1^2} \quad (6)$$

onde, T_2 e T_1 são as temperaturas radiais, e necessitam estar perto uma da 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 7 mostrado abaixo:

$$\alpha = \frac{\frac{\partial T}{\partial t}}{\nabla^2 T} \quad (7)$$

Então, em outros a iteração começa, assumindo a fração de sólido na curva como sendo linear, e é obtida pela Equação 8:

$$f_s = \frac{T - T_s}{T_e - T_s} = \frac{t - t_s}{t_e - t_s} \quad (8)$$

onde, f_s é a fração de sólido, e os subscrito “s” e “e” dizem respeito ao início da solidificação e ao fim da solidificação. Com a Equação 8 é possível determinar as propriedades termofísicas por interação, como mostrado nas Equações 9 e 10.

$$\alpha(t) = \alpha_s [1 - f_s(t)] + \alpha_e f_s(t) \quad (9)$$

$$C_v(t) = C_v [1 - f_s(t)] + C_e f_s(t) \quad (10)$$

O calor latente e a fração de sólido são calculados através das Equações 11 e 12, mostradas a seguir:

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

$$f_s(t) = \frac{1}{L} \int_{t_s}^t \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right)_{it} dt \quad (12)$$

A Equação 3 e as Equações de 9 a 12 são utilizadas para calcular iterativamente a curva de zero de Fourier. A Figura 21 mostra a curva zero calculada 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 calculada pela análise de Fourier. Isto pode ser observado na Figura 21 e no ponto 7 da Figura 20, onde a primeira derivada da curva de resfriamento em função do tempo assume o mínimo valor (BARLOW, STEFANESCU, 1997).

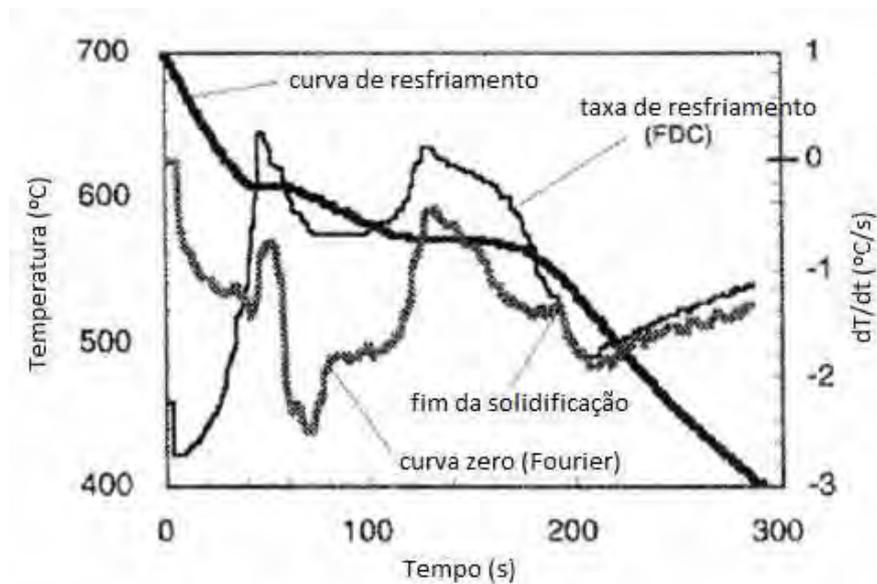


Figura 21 - Curva de resfriamento com sua primeira derivada e o cálculo da curva zero pela análise de Fourier (BARLOW, STEFANESCU, 1997).

2.5.3 Determinação da coesão dendrítica

Como já dito anteriormente 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 22, é identificada como o mínimo da curva, representado pelo número 3 na figura. Quando a coesão das dendritas termina no centro, começa o espessamento das dendritas e quando o delta T começa a retornar para o estado estacionário, com as dendritas já espessas 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 AA356 (BARLOW, STEFANESCU, 1997).

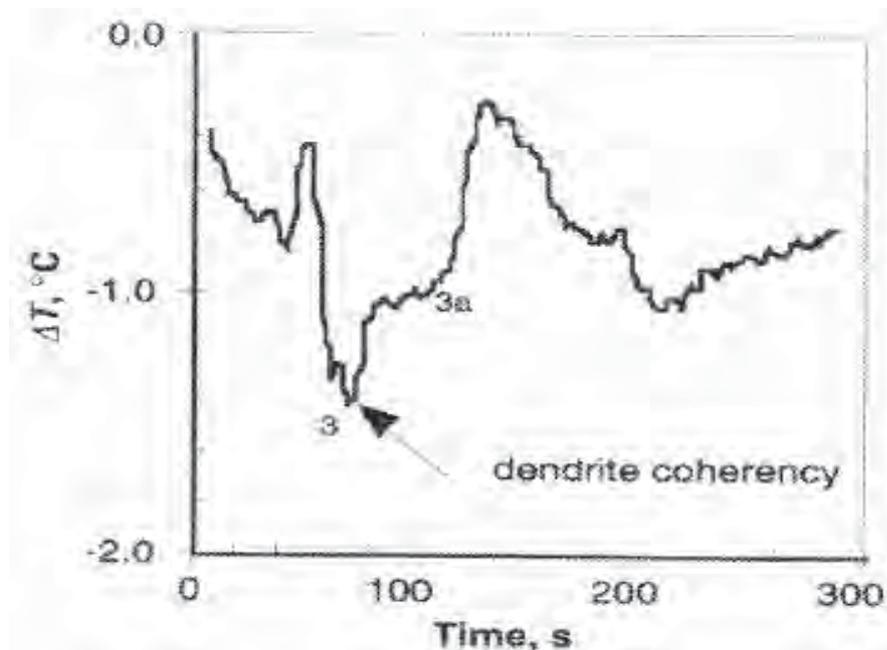


Figura 22 - Curva da diferença de temperatura entre o centro e a parede da liga Al-7%Si (BARLOW, STEFANESCU, 1997).

3 METODOLOGIA

O trabalho pode ser compreendido em duas etapas principais. A primeira delas é o procedimento para a obtenção da macroestrutura, passando por todo um processo de preparação do material e fundição. A segunda etapa consiste na obtenção da microestrutura, que nada mais é do que uma continuidade da primeira etapa com o mesmo material.

3.1 Obtenção da macroestrutura da liga AA356

Para a visualização e análise da macroestrutura dos grãos da liga AA356, foram realizados para efeito de análise e comparação, alguns ensaios com a liga em questão, que estão citados a seguir.

Para a comparação da influência da ação do molde sobre a macroestrutura da liga fundida AA356, foram realizados dois experimentos com a mesma quantidade de material, uma para o molde de areia e outro para o molde metálico.

Os materiais utilizados para o estudo e obtenção dos dados para a análise da macroestrutura da liga AA356 foram os seguintes:

- 1 kg de liga Al-Si AA356, cortados em pedaços suficientemente pequenos de modo a caber no cadinho;
- 1 cadinho de cerâmica, que suporte aproximadamente 500g de material para fundição;
- 1 serra hidráulica, utilizada para cortar a liga Al-Si AA356, doada pela ALCOA, em pedaços menores para a utilização desses pedaços na serra de fita;
- 1 máquina de serra de fita, utilizada para cortar os pedaços da liga Al-Si AA356 em pedaços suficientemente pequenos para caber no cadinho;

- 1 forno elétrico tipo mufla, para fundir o material;
- 1 molde metálico permanente;
- Tenaz, para a manipulação do cadinho após a retirada do forno;
- 1 par de termopares conectados a um sistema de aquisição de dados, que permitirá a obtenção da curva de resfriamento;
- Balança de capacidade de 1 kg;
- Areia de fundição preparada com resina e catalisador na proporção de 1kg 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 Al-Si AA356;
- Lixas de granulação 100, 220, 320,400 e 600;
- Reagente de ataque da superfície a ser estudada, solução de 75 ml de HCl (concentrado), 25 ml de HNO₃ (concentrado) e 5 ml de HF (48%);
- Algodão;
- Luvas de borracha;
- Pinça;
- Béquer;
- Capela, sistema de exaustão dos gases da reação do ataque na peça trabalhada;
- Água corrente;
- Câmera fotográfica;

O procedimento para a obtenção da amostra para análise da macroestrutura inicia-se com o corte da liga Al-Si AA356, doada pela ALCOA, em pedaços menores com o auxílio da serra hidráulica. Quando o material já não pode ser mais cortado na serra hidráulica, faz-se uso da serra de fita. Corta-se a liga em pedaços pequenos suficiente para caberem dentro do cadinho. Então para a fundição da liga usa-se um forno de aquecimento por resistência elétrica programado para uma temperatura de fundição final de 850°C em um cadinho com uma quantidade de 500g de material da liga. A Figura 23 mostra o forno elétrico tipo mufla utilizado para a fundição da liga Al-Si AA356.



Figura 23 - Forno elétrico tipo mufla utilizado para a fundição da liga.

As Figuras 24 e 25 representam as máquinas utilizadas para fazer o corte da liga Al-Si AA356 antes de ser fundida e a figura 25 ainda voltou a ser utilizada para cortar os lingotes para a análise da macroestrutura.



Figura 24 - Serra hidráulica, utilizada para cortar pedaços grandes da liga Al-Si AA356.



Figura 25 - Serra de fita, utilizada para cortar em pedaços menores a liga Al-Si AA356.

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, 20g de resina para preparação de areia de fundição e 5g de catalisador H-20 BB, misturados de forma homogênea num recipiente. Então essa areia é compactada na forma do molde, com tempo de espera para a cura da resina de aproximadamente 30 minutos. As Figuras 26 e 27 mostram a preparação do molde metálico utilizado na fundição de 500g de amostra da liga AA356 e o envasamento da liga no molde metálico. A Figura 28 mostra o envasamento do fundido da liga AA356 no molde de areia.



Figura 26 - Preparação do molde metálico com fundo de areia de fundição.



Figura 27 - Envasamento do fundido da liga no molde metálico.



Figura 28 - Envasamento do fundido em molde de areia.

O molde, tanto o de areia quanto o metálico, é preparado com um par de termopares conectados na parede e no centro do molde, para que seja possível a obtenção da curva de resfriamento da liga. O molde das peças fundidas são no formato cilíndrico de aproximadamente 6 cm de diâmetro e 10 cm de altura.

As Figuras 29 e 30 mostram os termopares conectados, um com sua extremidade na parede do molde e o outro no centro do mesmo.

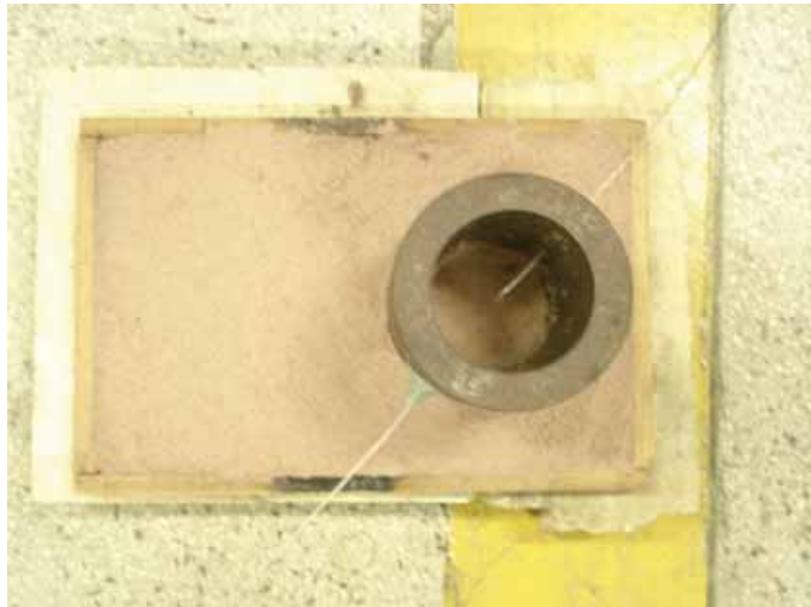


Figura 29 - Molde permanente metálico com as pontas dos termopares localizadas na parede e no centro do molde.



Figura 30 - Molde de areia com as pontas dos termopares localizadas na parede e no centro do molde.

Depois de o fundido da liga atingir a temperatura programada do forno, utiliza-se a tenaz para retirar o cadinho do forno contendo o fundido da liga, e faz-se o vazamento deste nos moldes, tanto no de areia quanto no metálico.

A Figura 31 mostra os termopares ligados no molde e conectados a um sistema de aquisição de dados que permite a obtenção da curva de resfriamento do material.

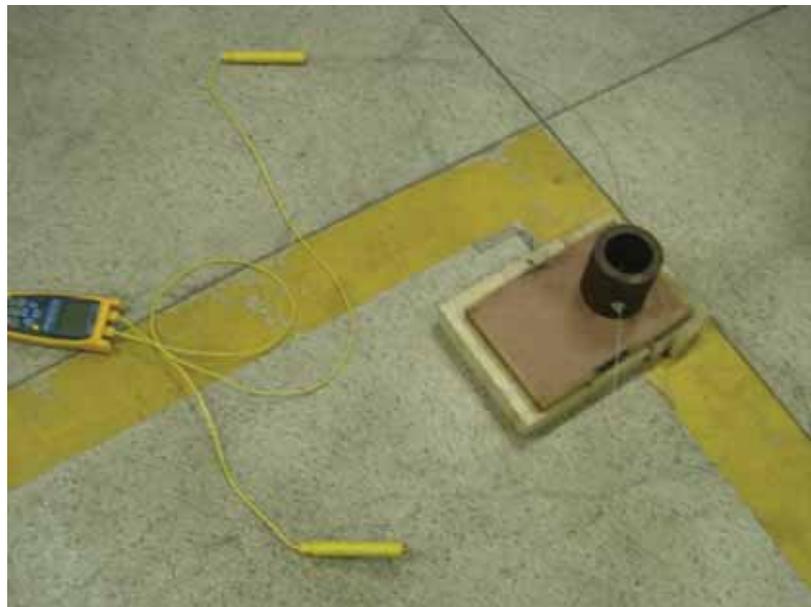


Figura 31 - Termopares conectados ao molde e ao aparelho que capta os dados para a obtenção da curva de resfriamento.

Após a solidificação da liga vazada no cadinho, ela foi retirada de dentro dele e cortada ao meio na serra de fita. Posteriormente foram lixadas na superfície transversal no laboratório de metalografia do Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá FEG-UNESP. O lixamento foi executado utilizando-se as lixas de granulação 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 HNO₃ (concentrado) e 5 ml de HF (48%), aplicada à superfície lixada com auxílio de um algodão embebido na solução de ataque, com pinça e luvas de

borracha nas mãos, de modo a evitar o contato dos ácidos da solução com a pele. Para a execução do ataque foi utilizada uma capela para evitar a inalação dos gases provenientes do ataque da solução na peça.

3.2 Obtenção da microestrutura da liga AA356

Assim como na visualização e análise da macroestrutura, na microestrutura da liga Al-Si AA356, também foram realizados diversos ensaios com a liga em questão para efeito de análise e comparação.

Os ensaios realizados foram feitos a partir das amostras utilizadas na análise da macroestrutura. Os lingotes atacados para visualização da macroestrutura, tanto o de molde de areia quanto o de molde metálico, são expostos a mais alguns experimentos para a obtenção das imagens da microestrutura.

Para o estudo e obtenção dos dados para a análise da microestrutura da liga AA356 foram utilizados os seguintes materiais e ferramentas:

- Lingote atacado no procedimento anterior de estudo da macroestrutura, tanto do molde metálico quanto do molde de areia;
- 1 máquina de serra de fita, para cortar o lingote numa seção transversal mais fina;
- 1 serra de arco, para cortar em pedaços menores as amostras (aproximadamente 10mm x 10mm);
- Prensa metalográfica AROTEC PRE 30M (embutidora), para embutir as amostras em baquelite;
- Vaselina líquida;
- Baquelite em pó, para a fixação da amostra da liga AA356 que será estudada;
- Algodão;
- Béquero;

- Lixas de granulação 600, 800, 1000, 1200;
- Alumina para polimento;
- Secador, para a limpeza dos corpos-de-prova;
- Politriz automática;
- Disco com pano de polimento;
- Estereomicroscópio;
- Pinça;
- Água corrente;
- Reagente de ataque da superfície a ser estudada, solução de HF (0,5%);
- Capela, sistema de exaustão dos gases da reação do ataque com a peça trabalhada;
- Microscópio óptico de reflexão Nikon Epiphot 200;
- Programa AxioVision 4.8, para a visualização das imagens do microscópio óptico;

A metodologia empregada na análise da microestrutura inicia-se com os lingotes utilizados para a análise macroestrutural, anteriormente feita. Estes lingotes são cortados transversalmente na serra de fita, para tornarem-se mais finos, e posteriormente serem cortados em pedaços menores, cerca de 10mm x 10mm, com a serra de arco. Assim então, no laboratório de metalografia do Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá FEG-UNESP, as amostras são colocadas na prensa metalográfica juntamente com a baquelite e ajustada a pressão em 100kgf/cm² e assim mantida por todo o processo de aquecimento e resfriamento da amostra. A Figura 32 mostra a prensa metalográfica, na qual ocorre o embutimento da amostra.

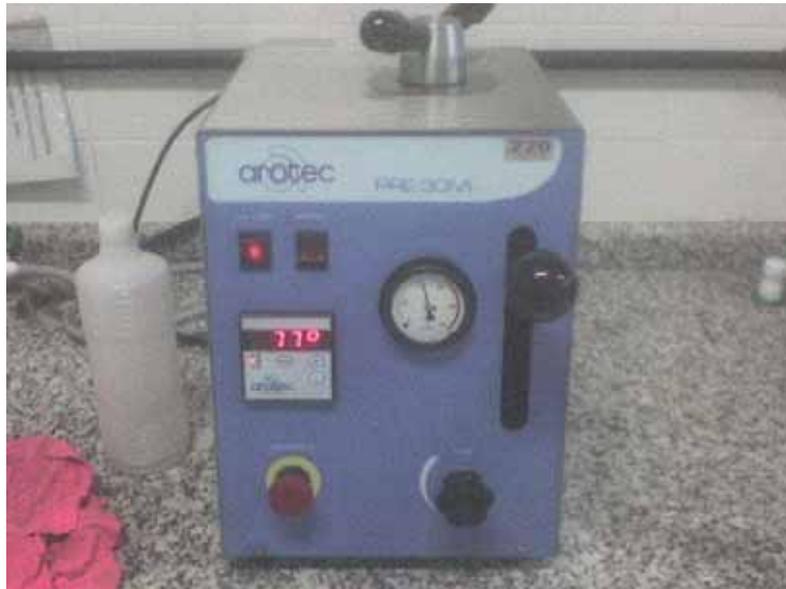


Figura 32 - Prensa metalográfica AROTEC PRE 30M (embutidora).

Assim que o corpo-de-prova sai da embutidora, começa então o processo de lixamento da amostra. A amostra passa pelas lixas de granulação 600, 800, 1000 e 1200 e então são lavadas e secadas. A figura 33 ilustra as lixas em ordem para o procedimento de lixamento dos corpos-de-prova. Esse procedimento antecede o polimento da amostra, que é feito em uma politriz automática, utilizando-se um disco de polimento, água em abundancia e alumina para polimento. Após o polimento a amostra deve ser lavada e secada para análise da estrutura em um estereomicroscópio. A estrutura deve conter o mínimo possível de riscos para que possa ocorrer o ataque das amostras. As Figuras 34 e 35 ilustram o processo de polimento das amostras e um estereomicroscópio, que foi utilizado para auxiliar nos processos de polimento das amostras.



Figura 33 - Lixas de granulação utilizadas para lixar os corpos-de-prova recém embutidos.



Figura 34 - Politriz automática, utilizada para o polimento das amostras.



Figura 35 - Estereomicroscópio utilizado para verificação de ausência de riscos nas amostras.

A Figura 36 mostra o lingote utilizado para a análise da macroestrutura da liga Al-Si AA356 atacada, e a esquerda dele observa-se quatro corpos-de-prova embutidos (na ordem da esquerda para a direita: parede, intermediário, centro e longitudinal).



Figura 36 - Corpos-de-prova com a liga AA356 embutidos ao lado do lingote cortado para a obtenção dos corpos-de-prova.

Após o lixamento e polimento de todas as amostras, foi feito o ataque da superfície delas. O ataque consiste em utilizar uma solução de ataque de HF (0,5%), aplicada à superfície com auxílio de um algodão embebido na solução de ataque que é manuseada com a proteção de luvas de borracha e uma pinça para ajudar no procedimento. O ataque é feito utilizando a capela para evitar a inalação de gases e por segurança de alguma parte do corpo entrar em contato com o ácido.

A parte final do estudo é feita analisando-se a microestrutura das amostras com o auxílio de um microscópio óptico com aumento máximo de 1000 vezes. A Figura 37 mostra um microscópio utilizado para este procedimento.



Figura 37 - Microscópio óptico de reflexão Nikon Epiphot 200.

3.3 Estudo da liga Al-Si AA356 com adição de agente modificador

O estudo diz respeito a fundir novamente a liga Al-Si AA356 em molde de areia, porém desta vez utilizando adição de agente modificador. O objetivo é visualizar e analisar a macroestrutura e microestrutura da liga com adição de agente modificador e compará-la com a liga sem adição do agente modificador. Portanto o estudo compreende-se em duas partes, análise da macroestrutura e análise da microestrutura da liga com adição de agente modificador de estrôncio.

Para a realização do estudo e obtenção dos dados foram utilizados os seguintes materiais e ferramentas:

- 490g de liga Al-Si AA356 cortados em pedaços suficientemente pequenos para caber no cadinho;
- 1 cadinho de cerâmica, que suporte aproximadamente 500g de material;

- 1 máquina de serra de fita, utilizada para cortar os pedaços da liga Al-Si AA356 em pedaços suficientemente pequenos para caber no cadinho e também para cortar transversalmente o lingote obtido da fundição;
- 1 serra de arco, para cortar em pedaços menores as amostras (aproximadamente 10mm x 10mm);
- 1 forno elétrico tipo mufla, para fundir o material;
- 10g de agente modificador, na forma de anteliga Al-Sr;
- Tenaz, para a manipulação do cadinho após a retirada do forno;
- 1 par de termopares conectados a um sistema de aquisição de dados, que permitirá a obtenção da curva de resfriamento;
- Balança de capacidade de 1 kg;
- Balança eletrônica de precisão;
- 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 Al-Si AA356;
- Lixas de granulação 100, 220, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200;
- Reagente de ataque da superfície a ser estudada, solução de 75 ml de HCl (concentrado), 25 ml de HNO₃ (concentrado) e 5 ml de HF (48%);
- Reagente de ataque da superfície a ser estudada, solução de HF (0,5%);
- Prensa metalográfica AROTEC PRE 30M (embutidora), para embutir as amostras em baquelite;
- Vaselina líquida;
- Baquelite em pó, para a fixação da amostra da liga AA356 que será estudada;
- Alumina para polimento;
- Politriz automática;
- Disco com pano de polimento;
- Estereomicroscópio;

- Algodão;
- Luvas de borracha;
- Pinça;
- Béquero;
- Secador, para a limpeza dos corpos-de-prova;
- Capela, sistema de exaustão dos gases da reação do ataque na peça trabalhada;
- Água corrente;
- Microscópio óptico de reflexão Nikon Epiphot 200;
- Programa AxioVision 4.8, para a visualização das imagens do microscópio óptico;
- Câmera fotográfica;

3.3.1 Macrografia com adição de modificador

A metodologia empregada na análise da macroestrutura inicia-se com a fundição de 490g de liga Al-Si AA356, cortadas na serra de fita em pedaços menores suficientemente para caber no cadinho. O cadinho é levado ao forno de aquecimento por resistência elétrica programado para uma temperatura de fundição final de 850°C. a Figura 38 mostra o cadinho com os 490g da liga Al-Si AA356.



Figura 38 - Cadinho preenchido com 490g da liga de alumínio.

Depois de o fundido da liga atingir a temperatura programada do forno, retira-o com o auxílio da tenaz e adiciona-se 10g de agente modificador na forma de anteliga Al-Sr cortadas em pequenos pedaços utilizando a serra de arco. A Figura 39 mostra os pequenos pedaços da anteliga Al-Sr utilizada como agente modificador da liga de alumínio.



Figura 39 - Pequenos pedaços cortados pela serra de arco da anteliga Al-Sr.

Retorna-se então rapidamente o cadinho ao forno e espera por mais alguns minutos até que então o fundido pode ser vazado no molde de areia, que esta com os termopares ligados em sua parede e centro conectados a um sistema de aquisição de dados para a construção da curva de resfriamento da amostra conforme mostrado na Figura 40.



Figura 40 - Termopares conectados ao molde de areia e ao sistema de aquisição de dados.

Após o fundido ser vazado no molde e esperar que ele se resfrie, utiliza-se a serra de fita para fazer um corte transversal no corpo do lingote, o qual será lixado com as lixas de granulação 100, 220, 320, 400 e 600. Em seguida ao lixamento faz-se uso da capela para manusear o reagente de solução de ataque de 75 ml de HCl (concentrado), 25 ml de HNO₃ (concentrado) e 5 ml de HF (48%) que é aplicado sobre a superfície com o auxílio de um algodão embebido na solução de ataque manuseado por uma pinça e com a proteção de luvas de borracha.

3.3.2 Micrografia com adição de modificador

A metodologia empregada para a realização da análise da microestrutura da liga Al-Si AA356 modificada foi feita a partir da amostra utilizada na análise da macroestrutura da mesma. O lingote atacado para a visualização da macroestrutura, foi exposto a alguns experimentos para a obtenção das imagens da microestrutura dessa liga modificada.

A serra de fita foi utilizada para cortar o lingote transversalmente a fim de obter uma amostra mais fina para ser novamente cortada, também na serra de fita, em pedaços menores (aproximadamente 10mm x 10mm). Essas amostras foram embutidas na prensa metalográfica e lixadas com as lixas de granulação 600, 800, 1000 e 1200. Em seguida, foram polidas com alumina, enxaguadas, secadas e observadas no estereomicroscópio até que foram atacadas com o reagente de solução de ataque de HF (0,5%).

Após o ataque as amostras foram levadas até o microscópio óptico de reflexão Nikon Epiphot 200 e analisada no programa AxioVision 4.8.

4 RESULTADOS

4.1 Análise da macroestrutura das amostras vazadas em molde metálico e de areia.

A macrografia consiste no exame do aspecto de uma peça ou amostra metálica, segundo uma seção plana devidamente polida e, em geral, atacada por um reativo apropriado. Pela macrografia obtêm-se informações de caráter geral, um aspecto de conjunto sobre a homogeneidade do material da peça, a distribuição e a quantidade de certas impurezas, distribuição, orientação e tamanho de grãos em peças de granulação grosseira, etc.

Comparando-se a macroestrutura da liga Al-Si AA356 fundida em molde metálico, com a fundida em molde de areia, fica muito evidente a partir da Figura 41 e 42 que os grãos do lingote fundido em molde de areia são bem maiores que os do lingote fundido em molde metálico.



Figura 41 - Macroestrutura obtida a partir da liga de alumínio AA356 em molde metálico.



Figura 42 - Macroestrutura obtida a partir do lingote da liga de alumínio AA356 em molde de areia.

Uma análise mais detalhada sobre a comparação entre a macroestrutura da liga Al-Si AA356 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 no 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 o mais seco possível e de degaseificadores que eliminam ou reduzem a dissolução de gases no fundido para se evitar este tipo de porosidade.

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 43 (MOREIRA, FOUÇO).

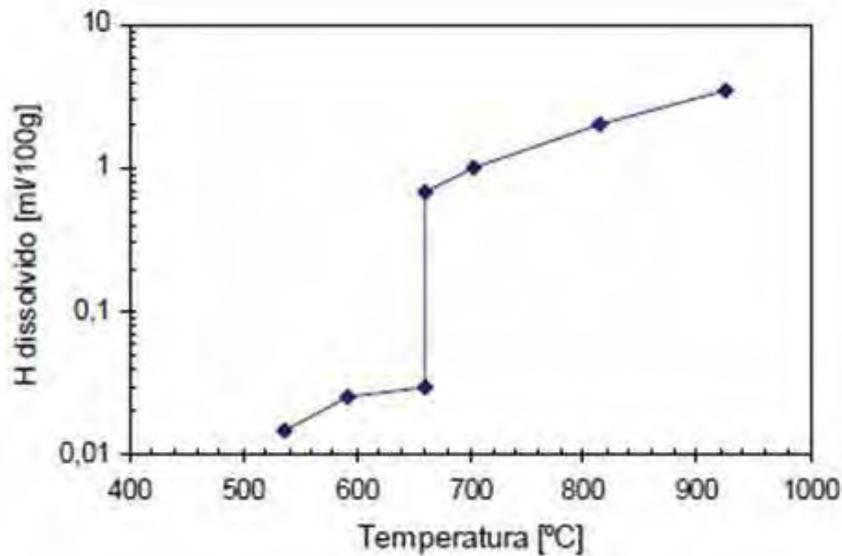


Figura 43 - Gráfico de solubilidade do hidrogênio no metal fundido das ligas de alumínio em geral pela temperatura do fundido.

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

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 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 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 será o tamanho das bolhas, e assim é a cinética da desgaseificação (MOREIRA, FOUCO).

Observando-se a macroestrutura da liga de alumínio AA356 que foi fundida em molde metálico e comparando-a com a liga fundida em molde de areia, nota-se que na primeira, a distribuição dos grãos é maior do que na segunda, porém como já dito anteriormente, o tamanho dos grãos são menores na macroestrutura da liga fundida em molde metálico do que não fundida em molde de areia. Também podemos observar que na amostra obtida no molde metálico, há o surgimento das três zonas de solidificação: 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 à 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, devido a taxa de perda de calor entre o fundido e a parede do molde serem menores do que no molde metálico.

A Figura 44 mostra a macroestrutura da liga de alumínio AA356 com adição de modificador, fundida em molde de areia. Comparando-a com a macroestrutura da liga em molde de areia sem adição de modificador, observamos que a distribuição dos grãos é bem maior e o tamanho deles é bem menor na macroestrutura da liga com adição da anteliga alumínio-estroncio.



Figura 44 - Macroestrutura obtida a partir do lingote da liga Al-Si AA356 com adição de agente modificador na forma de anteliga Al-Sr fundida em molde de areia.

4.2 Análise da microestrutura das amostras vazadas em molde metálico e de areia.

A micrografia é uma técnica laboratorial utilizada, sobretudo para análises de verificação da estrutura cristalina e metalúrgica de ligas. Comparando-se as microestruturas da liga AA356 fundida em molde metálico e molde de areia, mostradas abaixo nas Figuras 45 e 46, nota-se uma diferença nas estruturas delas.

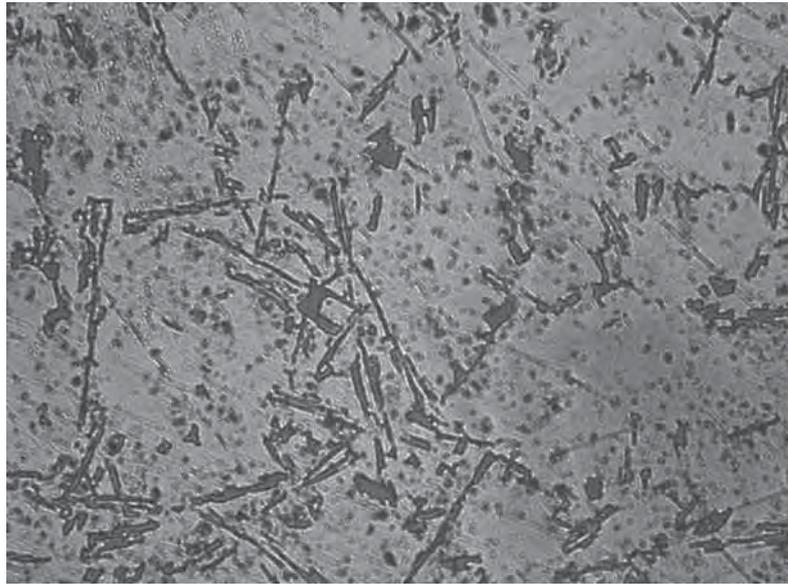


Figura 45 - Microestrutura da amostra da liga Al-Si AA356 fundida em molde de areia (100x).

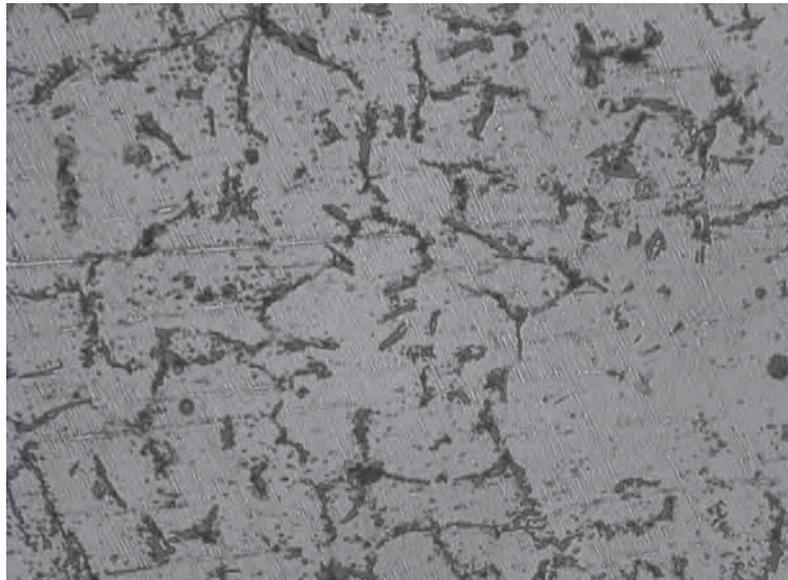


Figura 46 - Microestrutura da parede da amostra da liga Al-Si AA356 fundida em molde metálico (200x).

A Figura 47 mostra uma imagem colorida da microestrutura da região entre o centro e a parede da amostra usada na análise macrográfica da liga AA356 fundida em

molde metálico ampliada 200 vezes onde os pontos azulados representam o eutético da estrutura da liga.

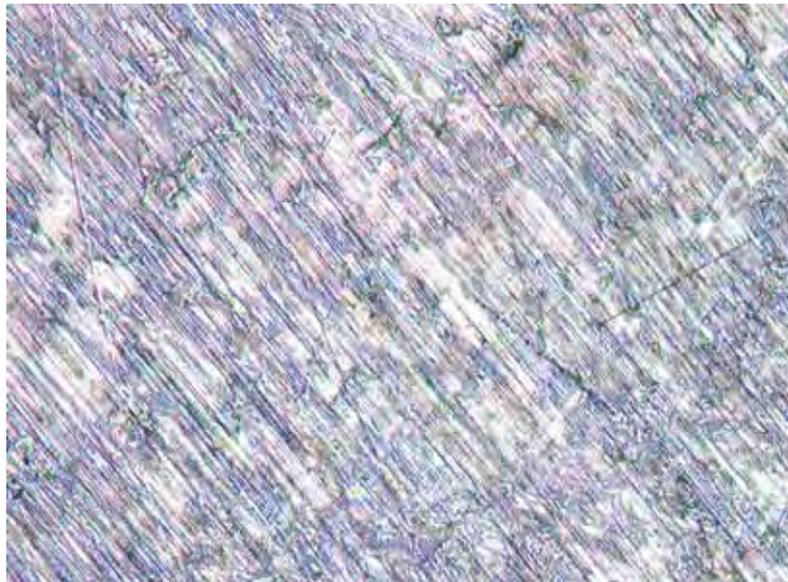


Figura 47 - Microestrutura colorida da região entre a parede e o centro da amostra da liga Al-Si AA356 fundida em molde metálico (200x).

Observa-se que a microestrutura da liga fundida no molde de areia é mais cheia de ranhuras do que a fundida em molde metálico, o que se explica pelo fato da areia arranhar mais a superfície da amostra. Nota-se também que há muita porosidade na microestrutura da liga fundida em molde de areia enquanto que na do molde metálico não há tanto. A porosidade é explicada pelo fato da liga, ao passar do estado líquido para o estado sólido, ter uma redução de seu volume, causando assim porosidades nas regiões centrais do lingote. Ainda, observa-se que na Figura 47 o silício no eutético tem uma morfologia do tipo de plaquetas, e que os grãos não são tão arredondados quanto os da liga fundida em molde metálico.

As Figuras 48, 49, mostram a microestrutura da liga Al-Si AA356 modificada pela anteliga Al-Sr, sendo de fácil visualização pela coloração da Figura 49 observar o eutético contornando os grãos.

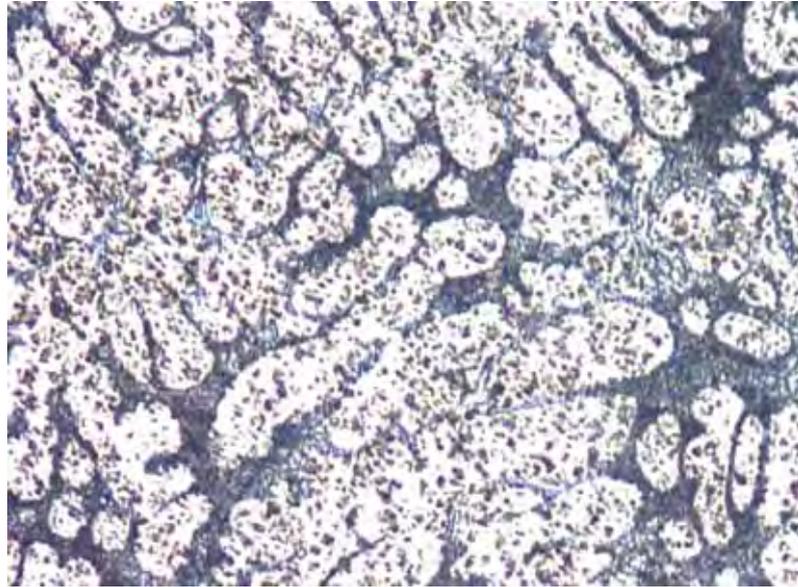


Figura 48 - Microestrutura colorida do centro da amostra da liga alumínio-silício com adição de agente modificador Sr (50x).

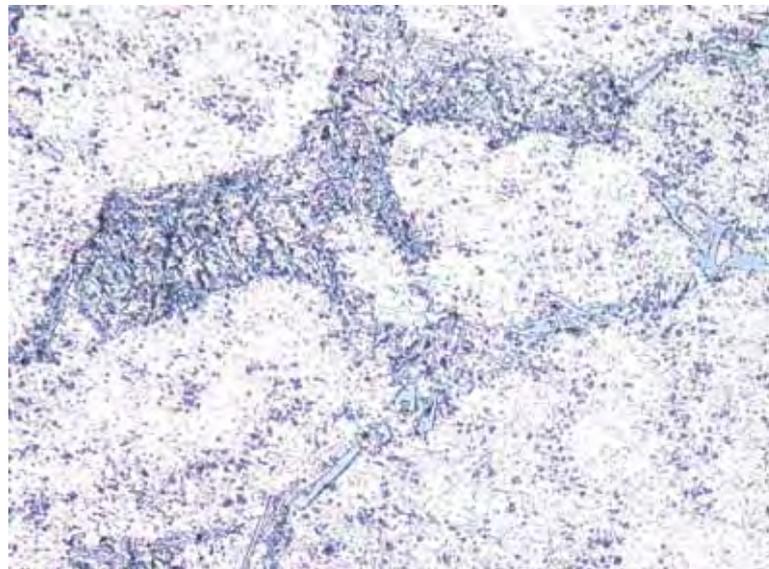


Figura 49 - Microestrutura colorida do centro da amostra da liga alumínio-silício com adição de agente modificador Sr (200x).

O que se observa da comparação da liga AA356 fundida em molde de areia, com e sem agente modificador, é que os constituintes são os mesmos, entretanto as partículas de Si do eutético na amostra modificada são menores e mais arredondadas que na amostra sem adição de modificador, e isso torna a liga mais dúctil e tenaz.

Observa-se que na liga não modificada a morfologia apresenta-se na forma de placas enquanto que na modificada a morfologia é mais suavizada. Segundo Couto et al., a modificação da morfologia do silício eutético parece ser a responsável pelos valores mais elevados de resistência mecânica.

4.3 Análise das curvas de resfriamento da liga Al-Si AA356.

O método utilizado para a confecção, análise e comparação das curvas de resfriamento da liga AA356 neste trabalho, consistiu na obtenção e monitoramento da temperatura ao longo do tempo através de termopares instalados na interface da parede e no centro do metal fundido, dos moldes de areia e metálico, por intermédio de um sistema de aquisição de dados.

Para a aquisição dos dados e das amostras a fim de se obter o levantamento das curvas de resfriamento, foi preciso além dos materiais anteriormente citados, de um sistema de armazenamento das temperaturas de solidificação, termômetro da marca “Minipa T-600”, e de um computador de mesa para fazer o descarregamento dos dados obtidos pelo termômetro.

O termômetro, ligado aos termopares, funciona marcando a temperatura de segundo a segundo na região da interface parede e centro da amostra a partir do momento em que a liga é vazada no molde, até o final de sua solidificação. A Figura 50 mostra a curva de resfriamento obtida no molde metálico para a fundição da liga Al-Si AA356.

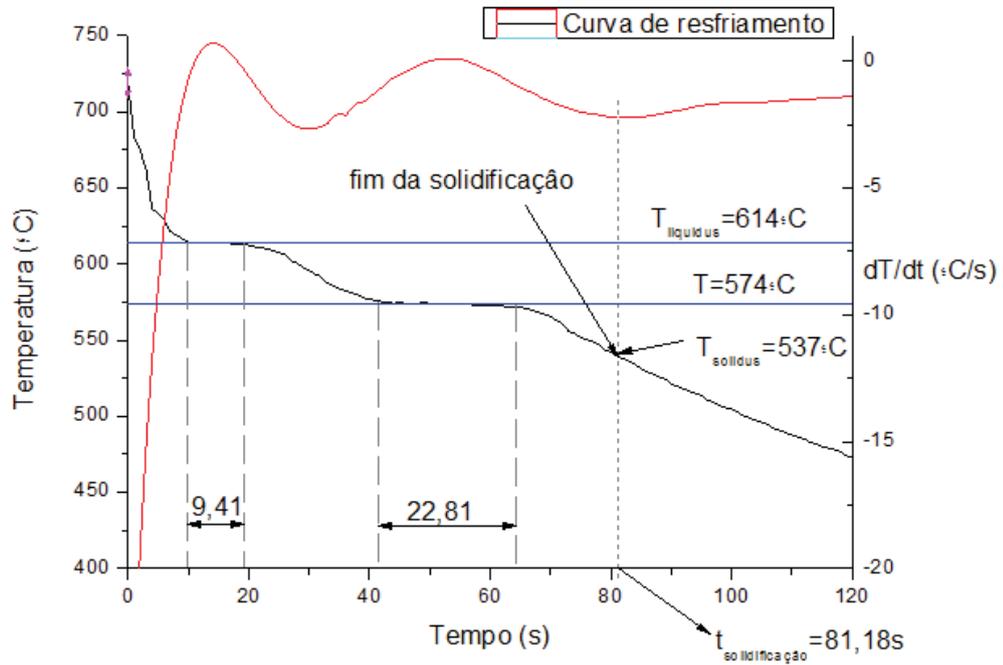


Figura 50 - Curva de resfriamento da liga AA356 em molde metálico.

As Figuras 51 e 52 mostram a curva de resfriamento obtida para a fundição em molde de areia da liga Al-Si AA356 sem adição de agente modificador e a curva de resfriamento obtida para a fundição em molde de areia da liga com adição de agente modificador, anteliga Al-Sr.

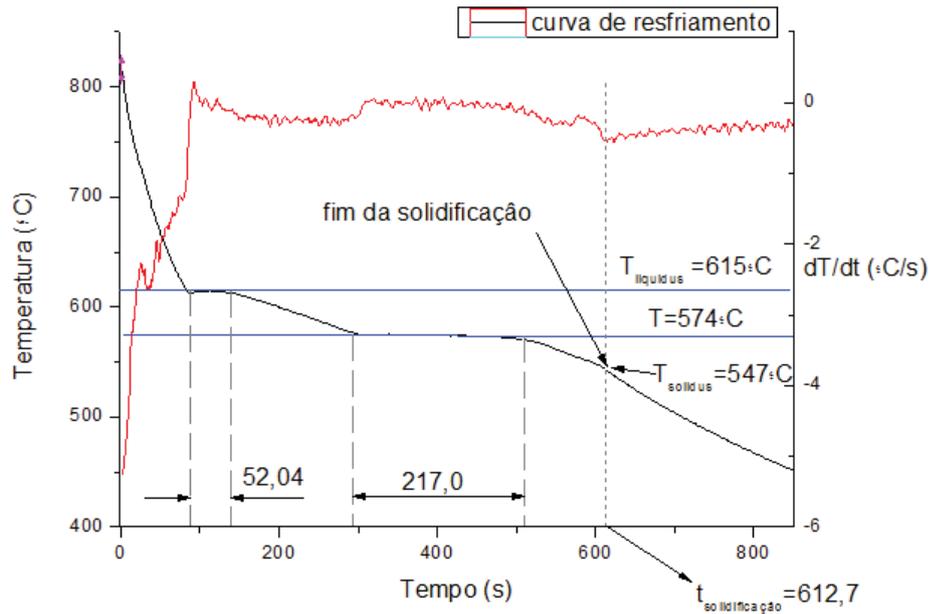


Figura 51 - Curva de resfriamento da liga AA356 em molde de areia sem adição de agente modificador.

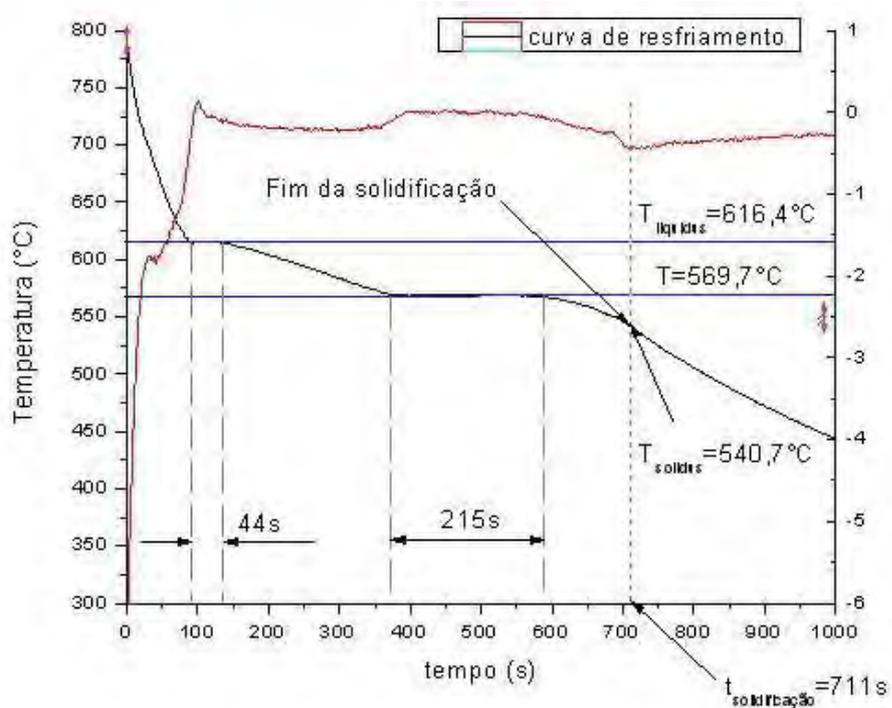


Figura 52 - Curva de resfriamento da liga AA356 em molde de areia com adição de agente modificador (anteliga Al-Sr).

Observando as curvas de resfriamento das Figuras 50 e 51, nota-se que o tempo de solidificação da liga em molde metálico é bem menor do que em molde de areia, mas que as temperaturas do patamar de solidificação da fase α -Al (formação das dendritas primárias), 614°C para o molde metálico e 615°C para o molde de areia, e as temperaturas do patamar da formação do eutético da liga, 574°C para ambos os moldes, mantêm-se praticamente iguais de um para o outro, alterando-se, de um para o outro apenas no tempo de resfriamento na curva de resfriamento. Em relação ao tempo, a curva de resfriamento da liga no molde metálico é muito mais rápida do que a curva de resfriamento da liga no molde de areia. Nota-se isso observando que para no molde metálico o tempo para o crescimento da rede dendrítica da parede em direção ao centro dura 9,41 segundos, enquanto que no molde de areia dura 52,04 segundos, e que o crescimento do silício e do alumínio contido no eutético para o molde metálico dura apenas 22,81 segundos enquanto que no molde de areia leva 217 segundos nessa região. Nota-se também que a solidificação em ambos os moldes, ocorre praticamente na mesma temperatura. Podendo assim concluir que o tipo de molde não influi consideravelmente nas características da curva de resfriamento da liga alumínio-silício AA356.

Analisando agora, as curvas de resfriamento das Figuras 51 e 52, nota-se que o tempo de resfriamento da liga com adição de estrôncio, como agente modificador, é pouca coisa menor que o tempo de resfriamento da liga sem adição de agente modificador. Assim como as temperaturas do patamar de solidificação da fase α -Al (formação das dendritas primárias), 615°C para a liga sem adição de modificador e $616,4^{\circ}\text{C}$ para a liga com adição de modificador, e as temperaturas do patamar da formação do eutético da liga, 574°C para a liga sem modificador e $569,7^{\circ}\text{C}$ para a liga com modificador, praticamente mantêm-se iguais, alterando-se apenas o tempo de resfriamento de um para o outro. O tempo para total solidificação da liga com adição de estrôncio é de 711 segundos enquanto que para a liga sem a adição do modificador é de apenas 612,7 segundos. Ainda observa-se que a região onde ocorre a nucleação do silício indicando o início da solidificação do eutético, no pico da derivada, que ele vai desaparecendo devido ao aumento de teor de Sr na liga, podendo ser notada nas curvas de resfriamento da liga sem e na liga com estrôncio.

As curvas de resfriamento de ambas as amostras, liga de alumínio no molde de areia com e sem agente modificador, são praticamente iguais, apenas diferenciando-se na questão de suas estruturas, pois quanto a tempo e temperaturas elas são muito parecidas.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos no trabalho possibilitam tirar as seguintes conclusões sobre ele:

- Na análise da macroestrutura da liga Al-Si AA356, constatou-se que o tipo de molde utilizado no processo de fundição da liga interfere significativamente na macroestrutura dela. Pudemos observar na utilização do molde metálico que é possível ver o aparecimento das três zonas de solidificação na macroestrutura do material, a coquilhada, a colunar e a equixial, isso devido à taxa de velocidade de resfriamento deste tipo de molde ser maior do que a taxa do molde de areia, e também por apresentar tamanho de grãos menores que o do molde de areia, o qual observa-se uma estrutura grosseira dos grãos e ausência de grãos colunares na macroestrutura;
- Com relação à curva de resfriamento, não importa muito o tipo de molde a ser utilizado. Constatou-se que tanto o molde de areia quanto o metálico não mudou significativamente as características da curva de resfriamento da liga Al-Si AA356. A única diferença mais marcante entre esses dois moldes presenciada pela curva de resfriamento foi o tempo de solidificação, a formação de patamares, da formação das dendritas primárias e do eutético da liga. Entre a liga com modificador e a liga sem modificador constatou-se duas principais diferenças entre elas, a primeira foi do tempo de solidificação, maior para a liga com o modificador, e a segunda foi uma pequena diminuição na região onde ocorre a nucleação do silício indicando o início da solidificação do eutético. Essa diminuição dessa região é esperada para quanto maior for a quantidade de estrôncio na liga até que ela venha a desaparecer por completo;
- O molde de areia para vazamento da liga Al-Si AA356, gera na amostra quantidades significativas de poros, devido a este conter maior presença de umidade de vapor d'água na areia e no próprio gás atmosférico no momento

da fundição. A presença desse 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 na liga fundida;

- A adição do agente modificador (anteliga Al-Sr) na fundição da liga Al-Si AA356 causou uma mudança na morfologia do silício eutético, tornando-o com uma aparência menos angular e mais arredondada, o que resulta em melhores propriedades físicas e mecânicas comparada à liga sem o agente modificador.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, G.F.C.; COUTO, A.A.; SEVERINO, B.P.; CABRAL NETO, A.; VATAVUK, J.; MACHADO, K.B.S.C. Estudo de ligas Al-Si fundidas em moldes de areia verde: efeito da adição de refinador e de modificadores de grão nas propriedades mecânicas. 18º CBECiMat- Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Porto de Galinhas, PE, Brasil, 2008.

ALUINFO Portal técnico comercial do mercado de fundição de alumínio, disponível em www.aluinfo.com.br/novo/materiais/ligas-aluminio, acessado em 15 de dezembro de 2011.

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.

GARCIA, A. Solidificação – fundamentos e aplicações. Campinas, Editora da Unicamp, 2001

GARCIA, A., SANTOS, R. G. e PRATES, M. Metalurgia – ABM, v. 34, p. 249, 1978

HERNÁNDEZ-PAZ, J.F.; PARAY, F.; GRUZLESKI, J.E. Natural Aging and Heat Treatment of A356 Aluminium Alloy, AFS Transaction, 2004.

McDONALD; S.D.; NOGITA, K.; DAHLE, A.K.; TAYLOR, J.A.; StHOHN, D.H.; Eutectic solidification and porosity formation in Al-Si alloys: the role of strontium; Transactions AFS; v.108; pp. 463-470; 2000.

METALS HANDBOOK, ASM Metals Handbook v.9 - Metallography and Microstructures

XIANGFA, L.; GUANGHUI, Q.; XIUFANG, B. The size sudden change and structure involvement of the macro-grains of al-si. Materials science forum., 2000.