

UNESP

Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

HENRIQUE HADIME WATANABE JUNIOR

**ANÁLISE DA CURVA DE RESFRIAMENTO DA LIGA
DE ALUMÍNIO AA 356**

Guaratinguetá

2012

HENRIQUE HADIME WATANABE JUNIOR

ANÁLISE DA CURVA DE RESFRIAMENTO DA LIGA

AA 356

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

Orientador: Prof. Dr. Carlos Kiyan

Guaratinguetá

2012

W324a	<p>Watanabe Junior, Henrique Hadime Análise de curva de resfriamento da liga de alumínio AA 356 / Henrique Hadime Watanabe Junior. - Guaratinguetá: [s.n.], 2012 37 f.: il. Bibliografia: f. 37</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012 Orientador: Prof. Dr. Carlos Kiyam</p> <p>1. Ligas de aluminio I. Título</p>
	CDU 669.715

ANÁLISE DA CURVA DE RESFRIAMENTO DA LIGA DE ALUMÍNIO AA
356

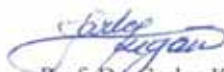
HENRIQUE HADIME WATANABE JUNIOR

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

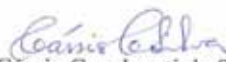
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO
DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Antonio Wagner Forti
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Carlos Kiyari
Orientador/UNESP-FEG



Eng.ª Cássia Cavalcanti da Silva
UNESP-FEG



Eng.º Gustavo Bartelega de Castro Rodrigues
UNESP-FEG

Dezembro de 2012

DADOS CURRICULARES

HENRIQUE HADIME WATANABE JUNIOR

NASCIMENTO	21.03.1982 – SÃO PAULO / SP
FILIAÇÃO	Henrique Hadime Watanabe Elmara Moraes Watanabe
2003/2012	Curso de Graduação UNESP/FEG – Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

de modo especial à minha família,
que acreditou e sempre me apoiou
durante esses longos anos de
graduação e foi a grande
responsável por mais essa conquista.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, que me deu saúde para enfrentar essa jornada, minha família e meus amigos,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Carlos Kiyam*, por seu incentivo e dedicação para que esse estudo aqui apresentado fosse possível,

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

aos meus pais Henrique e Elmara, que me incentivaram apesar de todas as dificuldades,

à minha irmã Érika, que me apoiou durante todo o tempo em que estive estudando,

à minha vó Dolores que me acolheu com alegria em sua casa e as minhas tias e tios que me ajudaram em diversos momentos,

aos meus amigos de Jarinu que me apoiaram durante esta etapa da minha vida,

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

aos meus amigos, das repúblicas WCK, Iglu, Inferninho, APAE, 69, Jurupinga, entre outras, que participaram de bons e maus momentos durante essa trajetória,

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

Mas agradeço principalmente a minha mãe que foi a maior incentivadora para que fosse possível concluir esta etapa.

“O campo da derrota não está povoado de fracassos, mas de homens que tombaram antes de vencer”.

Abraham Lincoln

Watanabe, H.H. **Análise da Curva de Resfriamento da Liga de Alumínio AA 356** 2012.
f. Trabalho de graduação (Graduação em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia
Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

RESUMO

É de extrema importância o estudo da macroestrutura de um material no estado bruto de solidificação devido à influência nas propriedades mecânicas, bem como o estudo da sua curva de resfriamento. No presente trabalho foi realizado o estudo da liga AA 356, sua macroestrutura e sua curva de resfriamento. O material foi vazado em dois moldes diferentes, um de areia e outro metálico.

No presente trabalho estudou-se as diferenças em suas macroestruturas e nas respectivas curvas de resfriamento.

Na macroestrutura podemos observar a ausência das três zonas de solidificação e a grande presença de poros, devido à umidade na areia. Na amostra retirada do molde metálico podemos observar as três zonas de solidificação: a coquilhada, colunar e equiaxial.

PALAVRAS-CHAVE: Liga de Alumínio

Watanabe, H.H. **Analysis of Cooling Curve of 356 Aluminium Alloy AA** 2012. 37 p. Monography (Graduation in Mechanical Engineering) Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

ABSTRACT

It is very important to study the macrostructure of a material in the crude state of solidification due to influence the mechanical properties, as well as the study of their cooling curve. In the present work was to study the alloy AA 356, its macrostructure and its cooling curve. The material was cast in two different molds, a sand and other metallic.

In this paper we study the differences in its macrostructure and its cooling curves.

In macrostructure can observe the absence of the three zones of solidification and the presence of large pores because of moisture in the sand. In the sample taken from the metal mold can observe the three zones of solidification: a coquilhada, columnar and equiaxed.

KEYWORDS: Aluminum Alloy

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema da Microestrutura da Liga	18
Figura 2: Serra Hidráulica	19
Figura 3: Serra de Fita	20
Figura 4: Visor do Forno	21
Figura 5: Forno Elétrico	21
Figura 6: Molde de Areia com Termopares.....	22
Figura 7: Molde Metálico com Termopares e Termômetro	23
Figura 8: Vazamento da Liga AA 356 no Molde de Areia	24
Figura 9: Vazamento da Liga AA 356 no Molde Metálico.....	24
Figura 10: Lixadeira Utilizada na Amostra	25
Figura 11: Representação das três Zonas de Solidificação Presentes na Macroestrutura do Metal Fundido	27
Figura 12: Zona de Crescimento de Grãos Colunares	27
Figura 13: Macroestrutura da Liga AA 356 Obtida em Molde Metálico.....	29
Figura 14: Macroestrutura da Liga AA 356 Obtida em Molde de Areia	29
Figura 15: Desgaseificador Contínuo	30
Figura 16: Gráfico de Solubilidade do Hidrogênio no Metal Fundido das Ligas de Alumínio em Geral pela Temperatura do Fundido	31
Figura 17: Disposição dos Termopares no Molde Areia.....	32
Figura 18: Disposição dos Termopares no Molde Metálico.....	32
Figura 19: Curva de Resfriamento Típica de uma Liga Al-Si.....	33
Figura 20: Curva da Diferença de Temperatura entre o Centro e a Parede da Liga Al-7%Si (BARLOW, STEFANESCU, 1997).....	35
Figura 21: Curva de Resfriamento da Liga AA 356 Obtida em Molde de Areia.....	36
Figura 22: Curva de Resfriamento da Liga AA 356 Obtida em Molde Metálico	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Obtenção do Alumínio	13
1.2	Estrutura de Solidificação e Propriedades	14
2	MATERIAIS E MÉTODOS	15
2.1	Materiais e Ferramentas	15
2.2	Metodologia Empregada	17
3	ANÁLISE DA MACROESTRUTURA.....	24
3.1	Teoria da Solidificação	24
3.2	Formação da Macroestrutura	24
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
5	CURVAS DE RESFRIAMENTO.....	29
	REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

O alumínio se tornou um dos metais mais versáteis devido a uma combinação de propriedades, tendo aspectos econômicos atrativos em vários setores da engenharia. Podendo ser utilizado na sua forma de metal puro ou em forma de ligas.

A liga de alumínio AA 356.0 que tem em sua composição silício vem sendo utilizada amplamente na engenharia automotiva e aeroespacial. A combinação de alumínio com o silício Al -7%Si apresenta as seguintes propriedades: boa fluidez, baixa contração de solidificação, boa soldabilidade, alta resistência ao desgaste, elevada relação resistência e peso.

No estado bruto de solidificação a microestrutura influencia nas propriedades mecânicas do material, daí a importância do estudo da taxa de resfriamento na macro e microestrutura do material.

Com o monitoramento do tempo e a da temperatura durante a solidificação é possível traçar a curva de resfriamento da liga AA 356.0. A partir dessa curva é possível determinar propriedades termofísicas da liga, fração sólida e calor latente de solidificação. A primeira derivada da curva de resfriamento propicia uma melhora na precisão do estudo da mesma.

Neste trabalho foram obtidas curvas de resfriamento da liga AA 356.0, uma realizada em molde de areia e outra em molde metálico. E a análise macroscópica e microscópica de amostras retiradas de lingotes.

1.1 Obtenção do Alumínio

Com 8,05% o alumínio é o elemento mais abundante da crosta terrestre, mas ele não é encontrado livre na natureza devido a sua elevada afinidade com o oxigênio, o alumínio só existe combinado com outros elementos, sendo a bauxita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) o mais abundante deles.

O alumínio foi produzido industrialmente pela primeira vez em 1886 pelo processo Hall-Héroult (McGEER, 1977), o alumínio denominado primário é extraído da alumina pura (Al_2O_3), que é extraída da bauxita pelo processo Bayer.

O processo industrial Hall-Héroult para obtenção do alumínio consiste basicamente na eletrólise da alumina. (reações anodo e catodo) O alumínio obtido pelo

processo eletrolítico, em geral, passa por processo de refino, para remoção de impurezas em busca da melhora de algumas propriedades para que atenda determinadas aplicações.

1.2 Estrutura de Solidificação e Propriedades

A grande maioria dos produtos metálicos passa necessariamente pelo processo de solidificação em algum estágio da sua fabricação. O metal líquido preenche totalmente a cavidade do seu molde, já proporcionando uma peça semi-acabada, assim sendo o processo mais econômico no processo de conformação mecânica do material.

O lingotamento já consiste no vazamento do material em moldes com geometria mais simples, por exemplo, quadradas, cilíndricas, retangulares. Após isso os lingotes sofreram algum processo de conformação mecânica, por exemplo, laminação e extrusão para que resulte no produto final desejado.

Na solidificação a estrutura do metal ou liga no seu estado bruto irá determinar futuras propriedades do material. Não só em materiais fundidos, mas também lingotes que irão sofrer conformação podendo alterar alguma de suas propriedades.

Existem algumas características do material que alteram diretamente suas propriedades mecânicas tais como: tamanho de grão, espaçamentos dendríticos, espaçamentos lamelares ou fibrosos, das heterogeneidades de composição química, do tamanho, forma e distribuição de inclusões, das porosidades formadas, etc.

Todas essas características da microestrutura dependem das condições da solidificação, como o tipo de molde por exemplo.

Existem variáveis na dinâmica da solidificação que irão influenciar diretamente na microestrutura do material e como consequência nas propriedades do material, tais como: o material do molde (variando a absorção do calor e influenciando no tempo de solidificação), a convecção com o ambiente durante o vazamento. São algumas das variáveis que podem modificar a microestrutura durante a solidificação, isso somado a adição de soluto ou solvente e de alguma heterogeneidade química, como mostra a figura 1, e defeitos, irão resultar nas propriedades físicas e químicas do produto final.

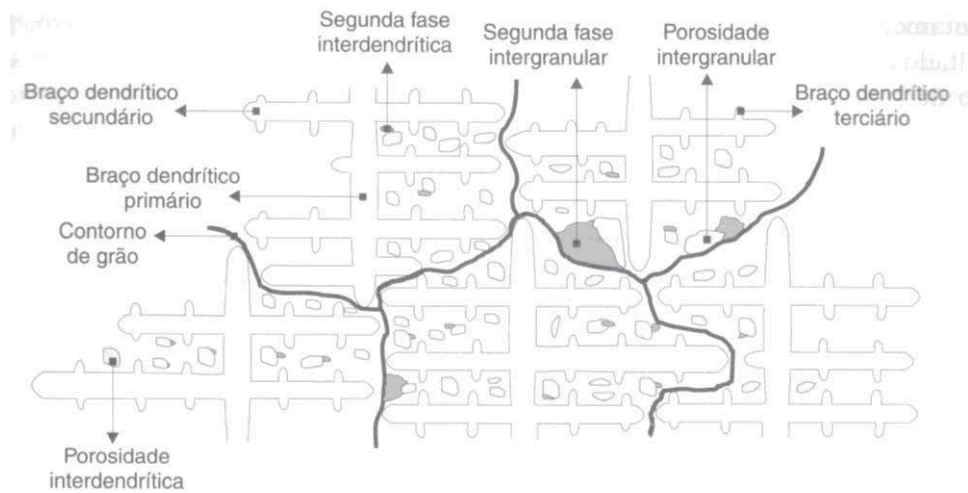


Figura 1 Esquema da Microestrutura da Liga

Nas grandes indústrias a grande maioria dos aços produzidos é por lingotamento contínuo, em um processo com alto grau de automação. Pesquisas científicas na área de solidificação dos materiais permitiram um aumento na sua faixa de interesse dentro da engenharia.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para análise e estudo da liga AA 356.0 foram necessários diversos materiais e equipamentos e diversos ensaios para que fosse possível a visualização e o estudo da liga, que estão descritos a seguir:

2.1 Materiais e Ferramentas

Os materiais e ferramentas utilizados para a visualização e estudo da liga AA 356.0 empregados estão descritos abaixo:

- 1 kg de liga Al-Si AA 356.0 cortados em pequenos pedaços para que a quantidade coubesse no cadinho fosse máxima;
- 1 cadinho de cerâmica, com capacidade de aproximadamente 500g de material;
- 1 molde metálico de aço;
- 1 forno de aquecimento;
- 1 serra de fita;
- Tenaz, para a manipulação do cadinho após a retirada do forno;
- 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;
- Lixas de grana 100, 220, 320, 400 e 600;
- 1 serra hidráulica;
- Luvas e avental;
- Balança de capacidade 1kg;
- Capela, sistema de exaustão dos gases da reação do ataque com a peça trabalhada;
- 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%); conforme norma ASTM E 340 ASTM E3 E 407;
- Algodão;
- Béquer;
- Água corrente;
- Câmera fotográfica;
- 1 par de termopares para cada amostra fundida em molde metálico e molde de areia;

- Um sistema de armazenamento das temperaturas de solidificação, termômetro da marca “*Minipa T-600*”;
- Um computador para levantamento e trabalho dos dados obtidos pelo termômetro “*Minipa T-600*”;

2.2 Metodologia Empregada

Inicialmente foi realizado o corte do lingote em pequenos pedaços para que a capacidade do cadinho fosse máxima, para isso utilizamos a serra hidráulica e a serra de fita que estão ilustradas abaixo na figura 2 e figura 3, respectivamente.



Figura 2 Serra Hidráulica



Figura 3 Serra de Fita

Após o corte do material foi necessário um forno para fundir a liga AA 356.0. Esse forno foi utilizado para derreter a liga AA 356.0 para ambos os moldes, o metálico e o de areia, e programado em 850°C.

As figuras 4 e 5 mostram o visor do forno programado para 850°C e o forno, respectivamente.



Figura 4 Visor do Forno



Figura 5 Forno Elétrico

Foi necessário elaborar a mistura de areia de fundição, catalizador e a resina, na proporção de 1 Kg de areia de fundição, 20g de resina para preparo e 5g H-20 BB, com um tempo de espera de 35 minutos aproximadamente para fazer o molde de areia e o fundo para o molde metálico.

A figuras 6 e 7 mostram o molde areia já configurado e o molde metálico já com o fundo de areia e o termômetro para o armazenamento dos dados e um par de termopares para cada amostra devidamente colocado e pronto para coletar os dados da curva de resfriamento quando o material for vazado.



Figura 6 Molde de Areia Com os Termopares



Figura 7 Molde Metálico com Termopares e Termômetro

A figura 8 e 9 mostram o vazamento da liga AA 356.0 no molde de areia e no molde metálico, respectivamente.



Figura 8 Vazamento da Liga AA 356 no Molde de Areia



Figura 9 Vazamento da Liga AA 356 no Molde Metálico

Após as peças serem fundidas elas são desmoldadas e cortadas na sua seção transversal na serra de fita. Logo a seguir é necessário lixar as peças sequencialmente com as lixas de grana 100, 220, 320, 400 e 600, para que seja realizado o ataque nas superfícies lixadas. Para esse ataque utilizamos com um reagente de solução de ataque de 75 ml de HCl concentrado, 25 ml de HNO₃ concentrado e 5 ml de HF 48%.

Para esse procedimento utilizamos algodão encharcado com o reagente e passamos na superfície transversal lixada, com muito cuidado para que não haja contato com o produto e nem a inalação do mesmo.

A figura 10 mostra a lixadeira utilizada na amostra.



Figura 10 Lixadeiras utilizadas na Amostra

3 ANÁLISE DA MACROESTRUTURA

3.1 Teoria da Solidificação

Geralmente a solidificação dos metais ocorrem em duas etapas, sendo a primeira a nucleação e o aparecimento de uma fase sólida n interior do metal líquido. Com a diminuição da temperatura os átomos que se movimento aleatoriamente na fase líquida começam a ter uma maior estabilidade termodinâmica e a criar pequenos embriões, esses embriões são estruturas de sólidos estáveis, esse processo é conhecido como nucleação da fase sólida.

3.2 Formação da Macroestrutura

A nucleação da fase sólida é a primeira etapa na formação da macroestrutura dos grãos brutos na solidificação. Logo após ocorre simultaneamente o crescimento desses grãos e a formação de novos em outras partes do metal fundido. A macroestrutura será determinada por essa competição entre crescimento dos grãos e nucleação de novos grãos.

Existem três zonas de solidificação principais na macroestrutura:

- Zona coquilhada;
- Zona colunar; e
- Zona equiaxial.

A figura 11 mostra as três zonas principais da macroestrutura de um material metálico fundido (ARANGO, 2009).

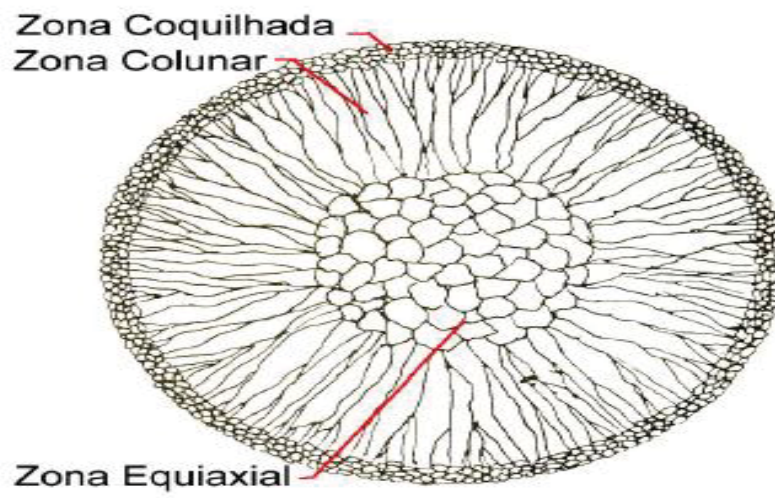


Figura 11 Representação das três zonas de solidificação presentes na macroestrutura do metal fundido

A figura 12 mostra a zona de crescimento de grãos colunares.

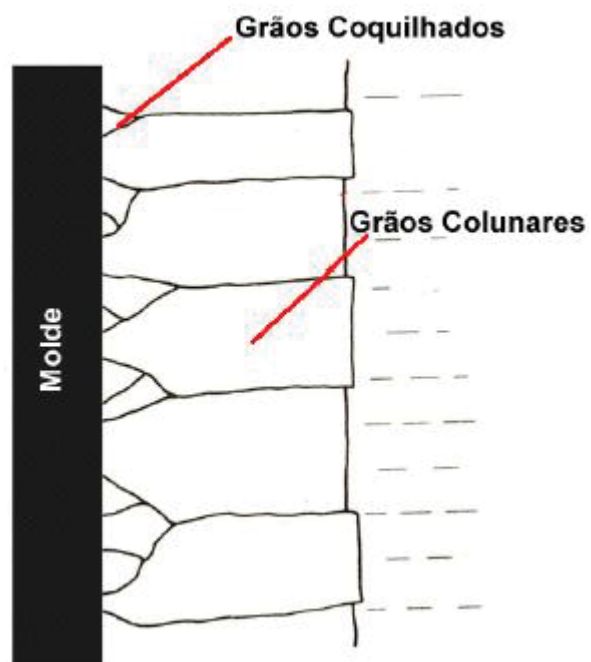


Figura 12 Zona de crescimento de grãos colunares

Próximo a parede do molde a nucleação ocorre com maior intensidade devido a taxa de resfriamento ser maior neste local devido a fatores como o coeficiente de transferência de calor na interface metal-molde e pela taxa de extração de calor, nesta área é encontrada a zona coquilhada.

A zona colunar se origina a partir da zona coquilhada e tem seu crescimento preferencialmente na direção paralela ao fluxo de extração de calor e o crescimento ocorre até o surgimento e crescimento dos grãos equiaxiais em uma condição favorável.

E por último a zona mais desejável na fundição de metais que é a zona equiaxial, esta zona de solidificação tem o estudo mais relevante.

A transição dos grãos colunares para equiaxial tem despertado muito interesse em pesquisadores para que possam ter um melhor entendimento nos parâmetros que afetam direta ou indiretamente a formação da macroestrutura dos grãos Arango (2009). Afetam na macroestrutura alguns parâmetros como: a convecção natural do líquido, o tipo de molde empregado, o superaquecimento inicial do metal líquido e a adição de inoculantes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Analisando melhor as amostras da liga AA 356, uma em molde metálico e outra em molde areia observamos uma maior concentração de poros na amostra do molde de areia em relação ao molde metálico, devido a presença de umidade e gases na areia utilizada para elaborar o molde, por isso nas indústrias se utiliza desgaseificadores para a fundição que reduzem ou eliminam esta porosidade.

As figuras 13 e 14 são amostras da liga AA 356 após serem sofrerem ataque com o reagente, uma sendo no molde metálico e outra no molde de areia, respectivamente.



Figura 13 Macroestrutura da liga AA 356 obtida em molde metálico



Figura 14 Macroestrutura da liga AA 356 obtida em molde de areia

Essa porosidade notada principalmente na amostra do molde de areia devido a presença de hidrogênio afetam nas propriedades mecânicas dos materiais, principalmente na ductilidade e na resistência à fadiga.

Essa dissolução do hidrogênio se dá devido a presença de vapor d'água, devido a umidade da areia, formado durante a fundição do material e também pela umidade presente no ar atmosférico. O método mais utilizado na indústria para se evitar isso é o uso de desgaseificadores.

Um processo de desgaseificação das ligas de alumínio fundido consiste na injeção de gás inerte por meio de rotor de grafita no fundido. Neste processo, o gás é “fragmentado” pelo movimento rotativo do rotor, gerando um número elevado de bolhas. Como o processo depende, fundamentalmente, da área total das bolhas de gás, quanto maior a quantidade menor o tamanho das bolhas, e assim é a cinética da desgaseificação.

Na figura 15 temos um esquema de desgaseificadores contínuos.

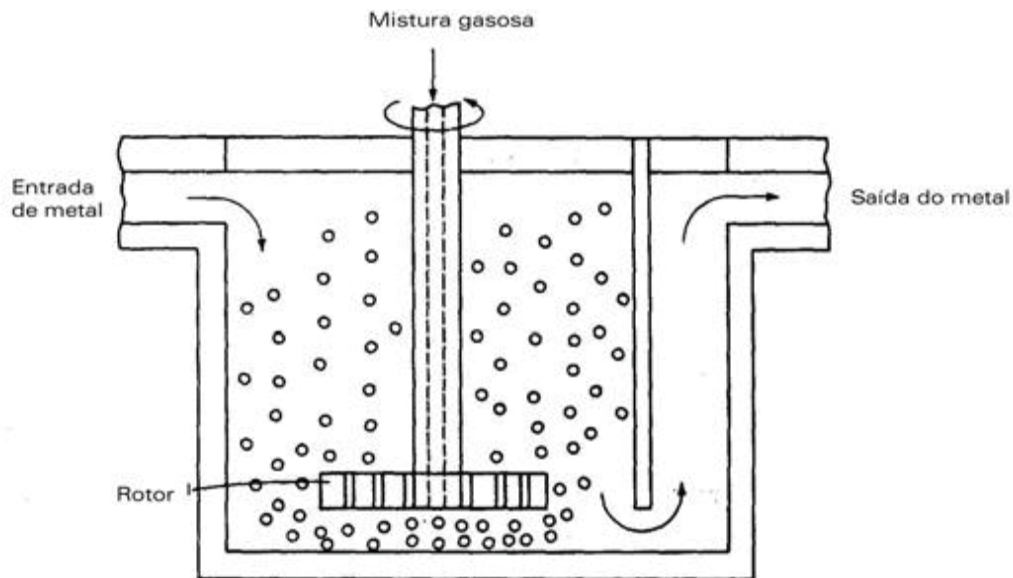


Figura 15 Desgaseificador Contínuo

De uma maneira geral, os metais no estado líquido tendem a absorver gases da atmosfera. As ligas de alumínio apresentam grande solubilidade de hidrogênio no estado líquido. Porém, quando na solidificação, essa solubilidade do hidrogênio tende a diminuir drasticamente, conforme mostrado na figura 16 (MOREIRA, FOUÇO).

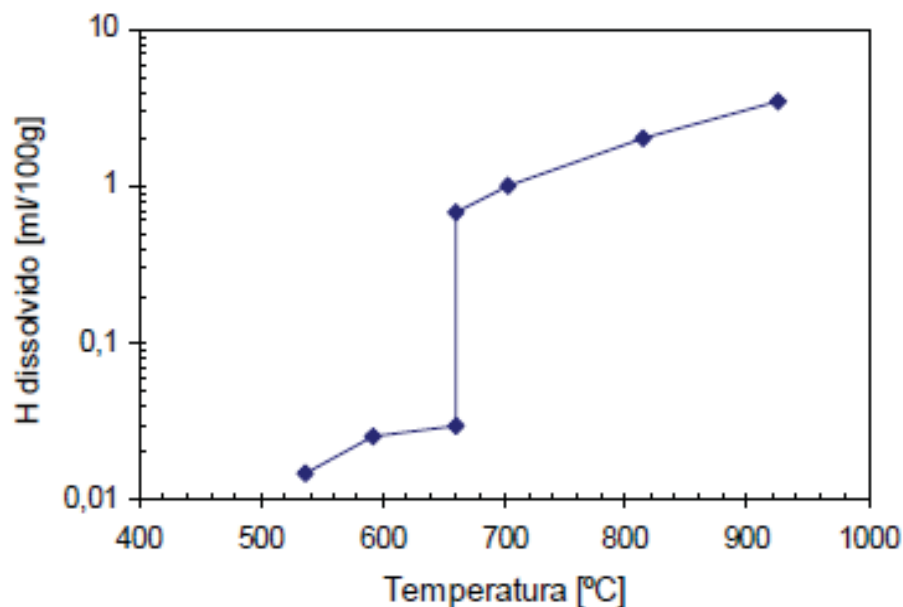


Figura 16 Gráfico de solubilidade do hidrogênio no metal fundido das ligas de alumínio em geral pela temperatura do fundido

Também podemos notar ao analisar a macroestrutura das amostras retiradas é que na amostra retirada do molde metálico é o tamanho dos grãos, que nessa amostra é menor do que a retirada em molde de areia, isso devido a velocidade de resfriamento.

No molde de areia reparamos a ausência das três zonas de solidificação: colunar, coquilhada e equiaxial, já observadas na amostra retirada do material fundido no molde metálico.

5 CURVAS DE RESFRIAMENTO

Informações importantes como: calor latente de solidificação, coesão dendrítica, quantidade e tipos de fases formadas, composição da liga, grau de modificação e os espaçamentos dendríticos podem ser retiradas através da análise da curva de resfriamento. Sendo assim muito importante o controle e estudo das curvas de resfriamento para materiais de fundição.

Monitorando e colhendo dados durante o resfriamento é possível construir a curva de resfriamento com auxílio de termopares, termômetro e computador para elaborar a curva.

No presente trabalho foram levantadas duas curvas de resfriamento da liga AA 356, sendo uma vazada em molde metálico e outra em molde de areia.

Nas figuras 17 e 18 mostramos a disposição dos termopares no molde de areia e no molde metálico respectivamente.



Figura 17 Disposição dos termopares no molde de areia



Figura 18 Disposição dos termopares no molde metálico

Observa-se que em ambos os moldes os termopares são alocados da mesma maneira, sendo um na parte central do molde e outro na interface entre o material e o molde.

A figura 19 mostra uma curva de resfriamento típica de uma liga Al-Si

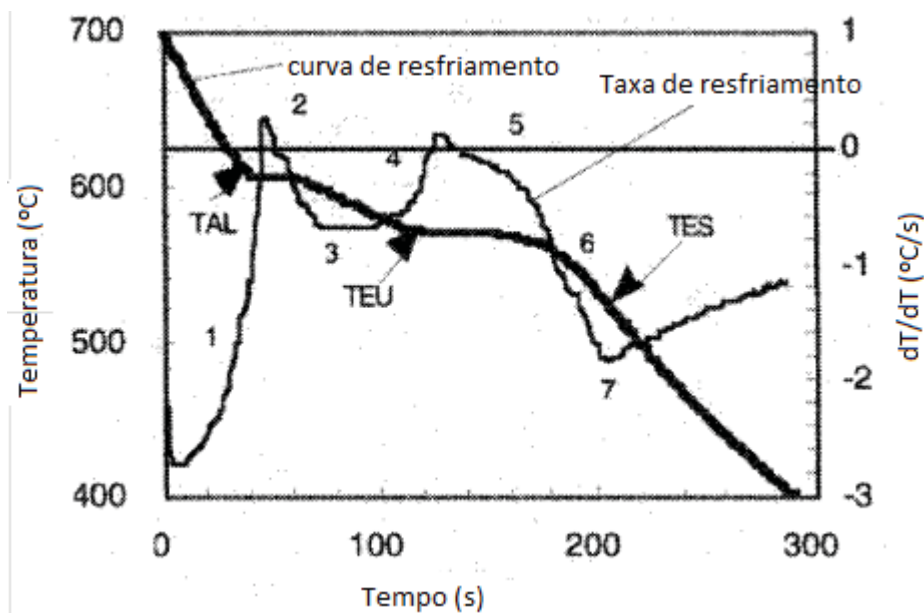


Figura 19 Curva de resfriamento típica de uma liga Al-Si

Na figura acima temos o ponto TAL (Temperature of Líquidus Arrest), 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 latente de solidificação da fase α -Al, formação dos dendritos primários. O ponto TEU (Temperature of Eutectic Undercooling), temperatura de subresfriamento eutético, é onde ocorre o crescimento significativo do eutético, e a mudança na inclinação da curva de resfriamento, neste ponto ocorre devido ao surgimento do calor latente de solidificação do eutético do alumínio. TES (Temperature of the End Solidification), temperatura de solidificação total, corresponde a inflexão na curva de resfriamento, é o mínimo da derivada da temperatura pelo tempo, que fica perto da solidificação, não precisando,

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

A forma da curva de resfriamento nada mais é do que resultado do calor perdido pelo metal fundido para o ambiente e para o molde utilizado, durante a mudança de fase. Os vários eventos que podem ser observados na curva de resfriamento podem estar associados a varias transformações que ocorrem durante o processo de resfriamento. O que os termopares indicam na verdade, as temperaturas médias ao longo de um determinado volume, sendo assim o que é registrado na curva de resfriamento, pode não ser o que necessariamente esteja acontecendo na transformação real. Dessa forma, o fundidor deve ter o cuidado quanto ao uso da curva de resfriamento para identificar a ocorrência de uma transformação de fase e amplitude (BARLOW, STEFANESCU, 1997).

5.1 Curva Zero

A derivada temporal da curva de resfriamento é chamada de curva zero, onde se supõe que o material fundido não sofre qualquer mudança de fase. Podendo se obter dessa curva teórica e imaginária o calor de solidificação que é representado pela área entre a curva zero e a curva da taxa de resfriamento do metal. A curva zero pode ser calculada de diversas maneiras e análises, sendo que cada maneira interfere na curva obtida. Abaixo temos algumas dessas análises:

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

Na análise newtoniana o gradiente de temperatura em toda a amostra é considerado zero, ou seja, resfriamento newtoniano, então é feito um balanço energético igualando o calor cedido pela amostra e a perda de calor, levando em conta somente a troca por convecção entre o fundido e o molde.

Já na análise de Fourier é considerado que o calor perdido para para o molde é por condução.

5.2 Coesão Dendrítica

Quando as pontas de uma fração sólida do dendrítico formado entram em contato formando um esqueleto dendrítico, isso é chamado de coesão dendrítica.

Alocando um termopar no centro do material fundido e outro na interface entre o material e o molde podemos determinar a coesão dendrítica na curva de resfriamento. Na curva de resfriamento mostrado na Figura 20 é identificada como o mínimo da curva, representado pelo número 3 sobre a curva, quando a coesão dos dendritos termina no centro, começa o espessamento dos dendritos e quando o ΔT começa retornar para o estado estacionário, com os dendritos já espessos em todo o material fundido, ao invés de retornar para o valor de estado estacionário após a região 3, a curva de diferença de temperatura indica um outro evento na região 3a. Esta é a precipitação da fase do ferro na liga AA 356.0 (BARLOW, STEFANESCU, 1997).

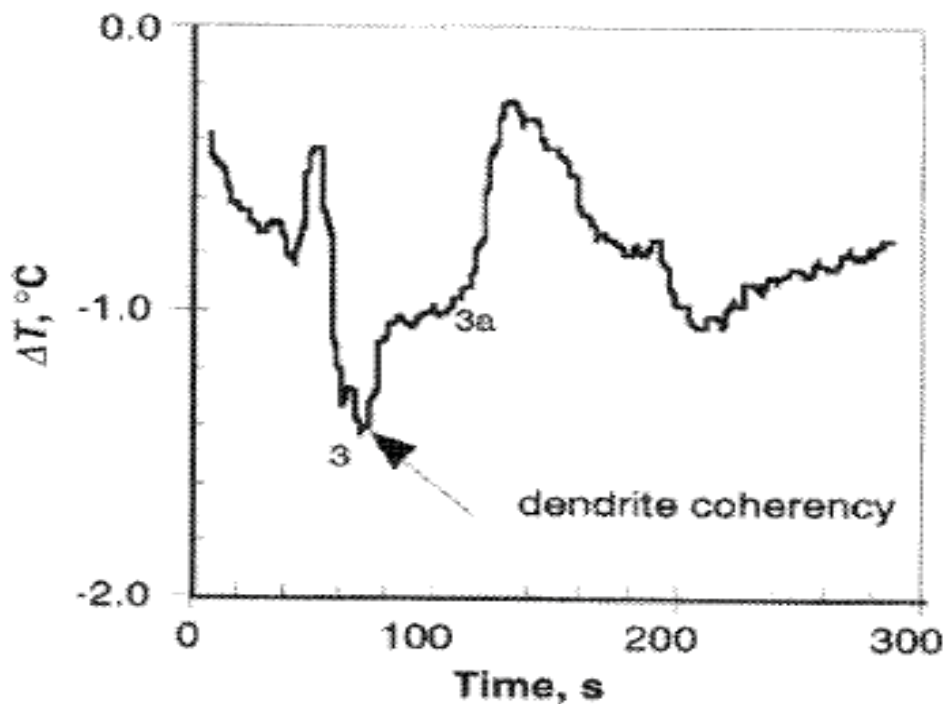


Figura 20 Curva da diferença de temperatura entre o centro e a parede da liga Al-7%Si (BARLOW, STEFANESCU, 1997).

5.3 Resultado

Tanto na obtenção da curva de resfriamento da liga AA 356 do molde metálico quanto na do molde areia foram utilizados as mesmas ferramentas e os mesmos métodos.

Nas figuras 21 e 22 a seguir mostram as curvas de resfriamento da liga AA 356 levantadas no molde de areia e no molde metálico, respectivamente.

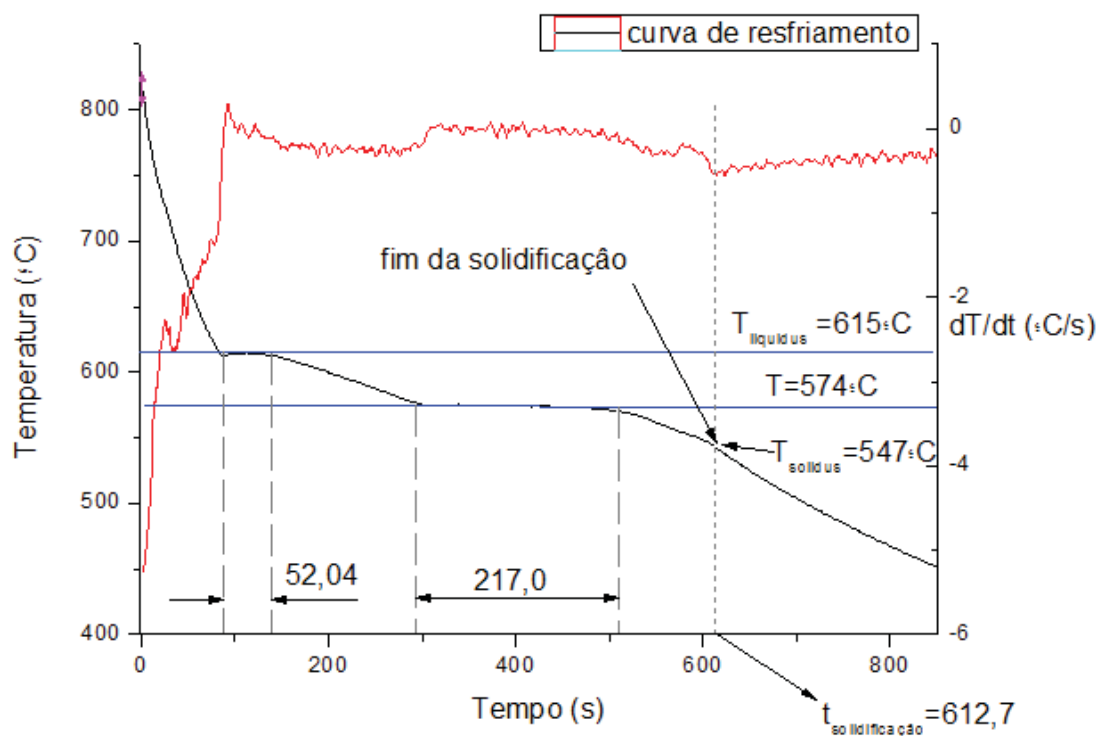


Figura 21 Curva de resfriamento da liga AA 356 obtida no molde de areia

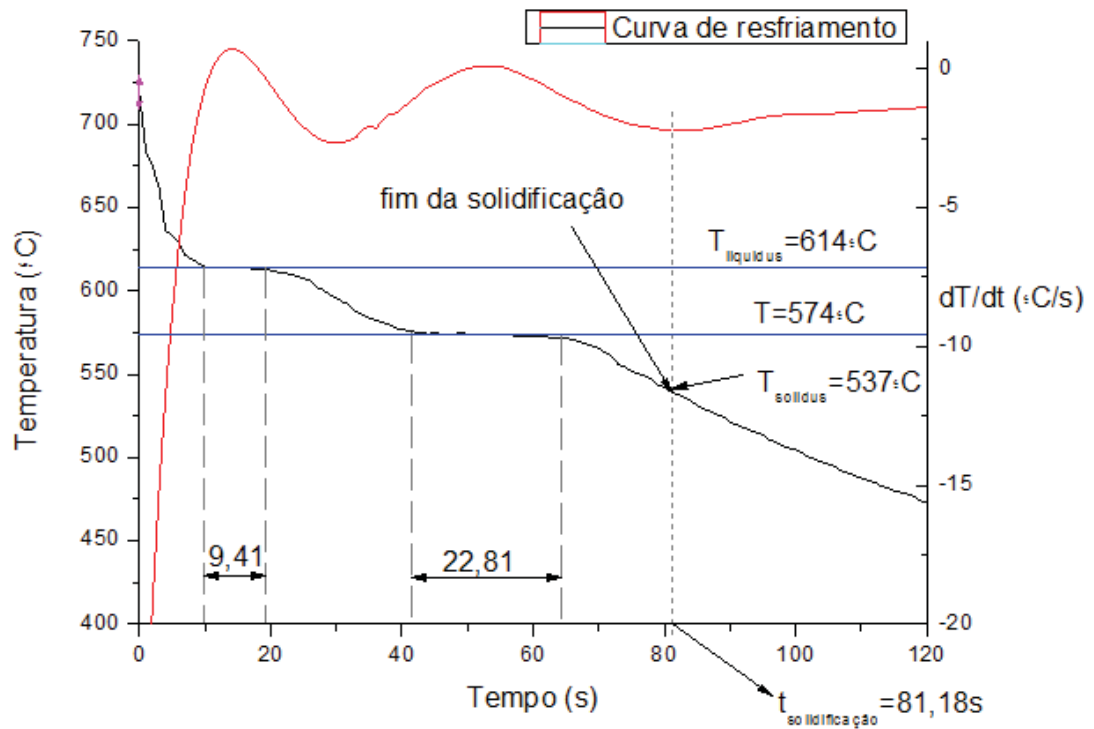


Figura 22 Curva de resfriamento da liga AA 356 obtida em molde metálico

Analisando as figuras acima é possível observar que o tempo de resfriamento da liga no molde metálico é menor em relação ao molde de areia, a formação das dendritas, ou seja, o patamar de solidificação da fase α -Al ocorre praticamente na mesma temperatura, 616°C (metálico) e 615°C (areia), e a temperatura de formação do eutético da liga divergem de um para outro apenas no tempo de formação e se mantém para os dois em 574°C .

Podemos notar que o tipo de molde não interfere significativamente na curva de resfriamento, pois a solidificação nos dois moldes ocorre praticamente na mesma temperatura.

6 CONCLUSÃO

Podemos concluir com o trabalho realizado que:

- Na utilização do molde de areia para o vazamento da liga AA 356, ocorre formação significativa de poros na amostra, devido a

presença de umidade na areia e no ar atmosférico durante a fundição. Essa presença de umidade leva a formação de vapor d'água e assim provocando a dissolução de hidrogênio no material fundido, assim provocando o aparecimento de poros pela reação de redução do vapor d'água, esses poros presentes levam ao comprometimento das propriedades mecânicas e resistência a fadiga da liga fundida, na indústria o método mais utilizado para se resolver esse problema é a desgaseificação.

- Os dois tipos de molde utilizados, areia e metálico, não interferem significativamente nas características da curva de resfriamento da liga AA 356. As principais diferenças entre as curvas são: o tempo de solidificação e a formação de patamares do eutético da liga e a formação dos dendríticos primários, devido a maior taxa de perda de calor o tempo de solidificação no molde metálico é menor.
- Utilizando dois moldes diferentes, areia e metálico, as diferenças na macroestrutura do material é significativa, no molde metálico é possível observar a presença das três zonas de solidificação na macroestrutura da amostra do material (coquilhada, colunar e equiaxial) devido a sua maior taxa de resfriamento comparado com o molde de areia. Também se observa grãos menores no molde metálico.

REFERÊNCIAS

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

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

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

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

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

MOREIRA, Marcelo F.; FOUÇO, Ricardo. **Ligas de Alumínio**. Disponível em: <http://www.dalmolim.com.br/EDUCACAO/MATERIAIS/Bibliomat/aluminiofund.pdf>. Acesso em 06 dezembro 2011.

ZANGRANDI, Aelcio. **Alumínio e suas Ligas: Fundamentos metalúrgicos e tecnológicos**. 1ª.ed. Lorena: Instituto Santa Teres