

**UNESP UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

MAURÍLIO DE OLIVEIRA SILVÉRIO

**ANÁLISE MACRO E MICROGRÁFICA DA LIGA AA-356 CONFORME A TAXA DE
RESFRIAMENTO**

Guaratinguetá
2013

MAURÍLIO DE OLIVEIRA SILVÉRIO

**ANÁLISE MACRO E MICROGRÁFICA DA LIGA AA-356 CONFORME A TAXA DE
RESFRIAMENTO**

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

Orientador: Prof. Dr. Carlos Kiyan

Guaratinguetá
2013

Silvério, Maurílio de Oliveira
S587a Análise macro e micrográfica da liga AA-356 conforme a taxa de resfriamento / Maurílio de Oliveira Silvério – Guaratinguetá : [s.n], 2013.
39 f : il.
Bibliografia: f. 39

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013.
Orientador: Prof. Dr. Carlos Kiyam

1. Ligas de alumínio 2. Fundição I. Título

CDU 669.715

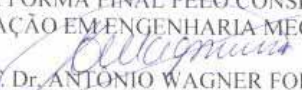
UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

ANÁLISE MACRO E MICROGRÁFICA DA LIGA AA-356 CONFORME A TAXA DE
RESFRIAMENTO

MAURÍLIO DE OLIVEIRA SILVÉRIO

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 KIYAN
Orientador/UNESP-FEG



Eng.ª.Mestre CÁSSIA CAVALCANTI
UNESP-FEG



Eng.ª.Mestre ÉRIKA APARECIDA DA SILVA
Membro Externo

Dezembro de 2013

DADOS CURRICULARES

MAURÍLIO DE OLIVEIRA SILVÉRIO

NASCIMENTO	25.03.1990 – SÃO JOSÉ DOS CAMPOS / SP
FILIAÇÃO	Rosélia Maria de Oliveira
2001/2004	Ensino Fundamental EE Prof.º Jorge Barbosa Moreira
2005/2007	Ensino Médio Colégio Poliedro - SJC
2008/2013	Curso de Graduação Engenharia mecânica - UNESP

Dedico este trabalho e graduação ao meu amado Espírito Santo,
minha família, à ONG Integrar Brasil e a todos que torceram
por mim em todos esses anos de faculdade

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus que é o motivo de toda minha existência e sempre me fortalece nos momentos mais difíceis.

Agradeço a minha família que me apoiou nesses anos de graduação, especialmente a minha mãe *Rosélia Maria* que me educou, cuidou e me amou desde 1990.

Agradeço ao meu orientador *Carlos Kiyam*, minha amiga *Cássia Cavalcanti* que muito me orientou nesse trabalho e à *Érika Aparecida* por fazer parte da minha banca contribuindo para a melhora desse trabalho.

A todos que me fizeram poder viver esse momento: a ONG Integrar Brasil na pessoa de *Araújo* e *Silvia* que me concederam a chance de estudar no Colégio Poliedro o qual também agradeço pela bolsa de estudo pela qual foi o caminho para estar hoje aqui, bem como todos os professores tanto da FEG, ONG Integrar Brasil, Poliedro, ETEP, EE Prof. Jorge Barbosa Moreira que de uma forma ou de outra contribuíram pela minha formação, a minha professora de inglês *Sônia*.

Aos amigos que fiz na época da faculdade, em especial à família Moradia que me ensinaram a saber conviver com diferentes culturas, crenças, personalidades crescendo humanamente.

“Não sabes, não ouviste que o eterno Deus, o Senhor, o Criador dos fins da terra, nem se cansa nem se fatiga? É inescrutável o seu entendimento.

Dá força ao cansado, e multiplica as forças ao que não tem nenhum vigor.

Os jovens se cansarão e se fatigarão, e os moços certamente cairão;

Mas os que esperam no Senhor renovarão as forças, subirão com asas como águias; correrão, e não se cansarão; caminharão, e não se fatigarão.”

[\(Isaías 40:28-31\)](#)

SILVÉRIO, M. O. **Análise macro e micrográfica da liga AA-356 conforme a taxa de resfriamento**. 2013. 39 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo o estudo das características da liga Al-7%Si-0,3Mg (AA356), mais especificamente caracterizar a macroestrutura e a microestrutura e propriedades mecânicas de lingotes da liga AA356 obtidos em moldes metálicos e moldes de areia para poder se estudar as estruturas através da diferença das taxas de resfriamento. O estudo dessa liga se explica pelo fato da referente liga possuir 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. Neste trabalho iremos verificar essa diferença nas propriedades através de duas diferentes taxa de resfriamento. Iremos monitorar as temperaturas na solidificação por meio de termopares construindo com elas a curva de resfriamento que nos auxiliará como ferramenta para avaliar a eficácia do refino de grãos, pois com ela conseguimos algumas importantes propriedades da liga como o calor latente de solidificação, a fração sólida, as temperaturas líquidos e sólidos, o tempo total de solidificação. A análise térmica será apoiada de estudo gráfico mediante software “Origin” onde será conseguido a curva de resfriamento bem como a sua primeira derivada que representa a taxa de resfriamento. Feita a análise térmica, serão feitas análises de macrografias nos lingotes obtidos para observação das macroestruturas obtidas nos dois tipos de lingotes e também análise de micrografias onde serão retiradas amostras em posições estratégicas dos lingotes para correlacionar com a microestrutura. Por fim será feita a coleta de dados da dureza Brinell dos lingotes e assim então correlacionando as propriedades dos lingotes com sua respectiva taxa de resfriamento. Verificamos que os lingotes obtidos com molde metálico apresentaram propriedades superiores aos lingotes obtidos com molde de areia.

PALAVRAS CHAVE: Liga Al-7% Si-Mg (AA356). Fundição. Taxa de resfriamento. Micro e macroestrutura. Propriedades mecânicas

SILVÉRIO, M.O. **Macro and micrographic alloy AA356 as the cooling rate analysis**. 2013. 39 f. Graduate Work (Graduate Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

ABSTRACT

The present work aims to study the characteristics of the alloy Al - 7 % Si - 0 , 3Mg (AA356) , more specifically characterize the macrostructure and microstructure and mechanical properties of the alloy ingots AA356 obtained in metal molds and sand molds for power studying the structures through the difference of cooling rates . This alloy is explained by the fact of referring league has excellent combination of properties such as low solidification shrinkage and good fluidity, good weldability , high wear resistance , high strength to weight ratio, has wide application in general engineering , and particularly in the automotive and aerospace engineering . In this work we will verify this difference in properties through two different cooling rates . We monitor the solid solidification temperatures by thermocouples building with them the cooling curve as a tool that will aid us to evaluate the effectiveness of the grain refining because it achieved with some important properties of the alloy as the latent heat of solidification fraction the liquid and solid temperatures, the total solidification time, and identify the presence of inoculants for grain refinement. Thermal analysis will be supported by the study of graphic software “Origin “will be achieved where the cooling curve and its first derivative that is the cooling rate. Made thermal analysis, analysis will be made in macrographs ingots obtained for observation of macrostructures obtained in both types of ingots and also analysis of micrographs where sampling will occur in strategic positions ingots to correlate with the microstructure. Finally will be collecting data from Brinell hardness of ingots and so then correlating the properties of their respective ingots with cooling rate. We found that obtained with cast metal ingots showed superior properties to the ingots obtained with sand mold.

KEYWORDS: alloy Al-7% Si-Mg (AA356). Foundry. Cooling rate. Micro and macrostructure. Mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Curva típica de resfriamento de uma liga Al-7%Si.....	19
Figura 2: Derivada de uma curva de resfriamento de uma liga Al -Si7%.....	20
Figura 3: Serra hidráulica usada para corte do lingote bruto.....	22
Figura 4: Serra de fita para cortes das peças.....	23
Figura 5 : Cadinho preenchido com material a ser estudado (liga AA356).....	23
Figura 6: Forno elétrico utilizado para fusão do material.....	24
Figura 7: Molde metálico posicionado para vazamento.....	25
Figura 8: Molde de areia.....	25
Figura 9: Vazamento de metal líquido.....	26
Figura 10: Prensa metalográfica AROTEC PRE 30M.....	27
Figura 11: Curva de resfriamento e sua respectiva derivada para molde metálico.....	29
Figura 12: Curva de resfriamento e sua respectiva derivada para molde de areia.....	30
Figura 13: Fenômeno de superresfriamento em molde de areia.....	31
Figura 14: Macrografia no lingote molde de areia.....	32
Figura 15: Macrografia no molde metálico.....	33
Figura 16: Comparação entre macrografia dos moldes.....	33
Figura 17: Micrografia transversal (50x) do lingote vazado em molde metálico.....	34
Figura 18: Micrografia transversal (50x) do lingote vazado em molde de areia.....	35
Figura 19: Micrografia longitudinal (50x) do lingote vazado em molde metálico.....	35
Figura 20: Micrografia longitudinal (50x) do lingote em molde de areia.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química da liga AA356.....	16
Tabela 2: Propriedades mecânicas da liga AA356.....	17
Tabela 3: Sequência de solidificação de uma liga AA356.....	18
Tabela 4: Dureza das amostras em molde metálico e de areia, transversal e longitudinal.....	37

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO.....	12
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1.O ALUMÍNIO E SUAS LIGAS.....	14
2.2.LIGA AA356.....	15
2.3.O PROCESSO DE FUNDIÇÃO – SOLIDIFICAÇÃO.....	17
2.4.FUNDIÇÃO EM MOLDES METÁLICOS E DE AREIA.....	20
2.5.REFINO DE GRÃOS EM LIGAS DE ALUMÍNIO FUNDIDOS.....	21
3.MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
3.1.MATERIAIS, FUNDIÇÃO E VAZAMENTO.....	22
3.1.1.PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE TÉRMICA.....	22
3.1.2.PROCEDIMENTO PARA MACROGRAFIA.....	27
3.1.3.PROCEDIMENTO PARA MICROGRAFIA.....	27
3.1.4.PROCEDIMENTO PARA ENSAIO DE DUREZA.....	28
4.RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
4.1.ANÁLISE TÉRMICA.....	28
4.2.ANÁLISE MACROSCÓPICA.....	32
4.3.ANÁLISE MICROSCÓPICA.....	34
4.4.ENSAIO DE DUREZA.....	36
5.CONCLUSÕES.....	38
REFERÊNCIAS.....	39

1. INTRODUÇÃO

Dentro do ramo da fundição as ligas de alumínio são as mais versáteis dentre as ligas empregadas em fundição (FUOCO; MOREIRA, sem data). Segundo Fuoco e Moreira suas principais características de fundição são:

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

Algumas famílias de ligas de alumínio são Al – Cu (série 200), Al – Si (série 300), Al – Mg (série 500), Al – Zn (série 700). Dentre as várias famílias de ligas de Alumínio as ligas Al-Si da série 300 fazem parte das ligas apresentam as melhores características de fundição, motivo pelo qual cerca de 90% das peças fundidas em alumínio pertencerem á série 300 (FUOCO;MOREIRA, sem data).

De acordo com Couto (2010), a microestrutura das ligas Al-Si são composta de uma fase primária de alumínio ou de silício e de uma fase eutética composta por esses dois elementos.

No presente trabalho iremos estudar ligas desse tipo: a liga AA356. Sendo de nosso conhecimento suas variadas aplicações citadas têm a explicação, o motivo pelo qual faremos o estudo do material em questão.

Como ligas da série 300, a liga AA356 possui inúmeras aplicações, dentre as quais podemos citar a fabricação de peças como cilindros, válvulas, cabeçotes, blocos de motores,

ferramentas pneumáticas e componentes para anodizados na cor cinza de uso na arquitetura (ABAL, 2010).

A microestrutura de qualquer liga tem grande influência em suas propriedades mecânicas. Nesse trabalho iremos caracterizar a microestrutura da liga AA356 por meio do seguinte procedimento: primeiramente levantaremos a curva de resfriamento da liga seguida da análise térmica, posteriormente faremos análise a macroscópica (a olho nú), análise microscópica (aumento de 50x) e por fim o ensaio de dureza Brinell. Para o trabalho proposto usaremos dois corpos de prova (lingotes) provenientes do mesmo processo porém em diferentes condições, ou seja, faremos os estudos acima mencionados para lingotes vazados em molde de areia e em molde metálico. O uso de material diferente dos moldes terá objetivo de variar a extração de calor do metal líquido conseguindo obter diferentes microestruturas no lingote. Posteriormente será comparado entre os lingotes a relação que se conseguirá através das diferentes taxas de resfriamento com suas respectivas microestruturas, e assim então relação com as suas propriedades mecânicas.

Portanto, temos como objetivos a caracterização da microestrutura da liga AA356, obtenção das curvas de resfriamento durante a solidificação da liga AA-356 e verificação da diferença das propriedades mecânicas conforme taxa de resfriamento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

O alumínio, por possuir excelentes propriedades físico-químicas dentre as quais podemos citar as principais ter baixo peso específico, possuir boa resistência à corrosão, possuir alta condutibilidade térmica e elétrica e a infinita reciclagem - apresenta uma ampla variedade de utilização, que o torna o metal nãoferroso mais consumido no mundo (ABAL, 2007).

De acordo com a ABAL, 2007 rápido e notável crescimento da importância do alumínio na indústria é resultado de uma série de fatores:

- É um metal que possui excelente combinação de propriedades (algumas citadas) úteis resultando numa adequabilidade técnica para um campo extraordinário de aplicações em engenharia;
- Pode ser facilmente transformado, através de todos processos metalúrgicos normais, sendo assim viável à indústria manufatureira em qualquer forma que seja requerida;
- As atividades de pesquisa desenvolvidas pela própria indústria do alumínio, pelos laboratórios acadêmicos e pelos seus usuários têm levado a um maior conhecimento das características de engenharia deste metal, além do que técnicas de fabricação, de soldagem e de acabamento têm sido desenvolvidas, fazendo com que o alumínio seja considerado um material que não apresenta dificuldade nas suas aplicações;
- Finalmente, um fator importante na aceitação geral do alumínio tem sido a livre divulgação da indústria quanto às recomendações aos usuários e potenciais usuários do metal. Isto tem sido feito pelos fabricantes individualmente, por centros de pesquisa e pela ABAL.

Quando o alumínio se encontra fundido ele possui grande capacidade de dissolver outros metais e substâncias que também possuem metais, como por exemplo o Silício, que atua neste aspecto como metal. Por possuírem diferentes pontos de fusão quando o Alumínio se resfria e se solidifica, alguns dos constituintes da liga podem ser retidos em solução sólida, podendo tornar a

estrutura atômica do metal mais rígida. A rede cristalina então é então como se fosse átomos arranjados regularmente, formando átomos de tamanhos diferentes daqueles do elemento de liga principal. Grande quantidade de elementos de liga podem ficar em solução sólida com o metal quente. Ele tende a precipitar o excesso dos elementos de liga da solução quando ocorre o seu resfriamento. Tais precipitados tornam a liga mais rígida e então mais resistente. (ABAL, 2007).

O fato de o Alumínio poder se combinar com outros metais de grande uso na engenharia, chamados de elementos de liga, para alcançar um material desejável na engenharia tornam as ligas de Alumínio de grande importância no mercado (ABAL, 2007).

As ligas empregadas nas aplicações gerais de engenharia frequentemente contêm silício, cobre Magnésio e cada um desses elementos são adicionados com um propósito definido como fluidez, maior dureza ou melhor resistência.

Concluindo sobre ligas de Alumínio seu principal objetivo é aumentar a resistência mecânica, sem que outras propriedades sejam interferidas, afim de desenvolver outras ligas que sejam utilizadas em aplicações específicas que se pretendem. (ABAL, 2007).

Podemos citar as principais famílias das ligas fundidas e suas características principais:

- Ligas Al-Cu (série 200) : elevada resistência mecânica, boa usinabilidade, baixa resistência à corrosão atmosférica e grande tendência à formação de microporosidades.
- Ligas Al-Si (série 300): ligas de alumínio que apresentam as melhores características de fundição, elevada resistência à corrosão, boa soldabilidade, usinagem difícil que pode ser melhorada com adição de Cu..
- Ligas Al-Mg (série 500): elevada resistência à corrosão e excelente usinabilidade, moderada tendência a defeitos de fundição e tendência à oxidação. Após tratamento térmico desenvolvem resistência mecânica elevada.
- Ligas Al-Sn (série 800): usinabilidade e boas propriedades anti-fricção.

2.2. LIGA AA356

Das cerca de 238 composições de ligas de alumínio para fundição registradas na *Aluminum Association of América* (AAA), 46% são formadas por ligas de alumínio-silício (Al-

Si). Na tabela 1 encontramos a composição química nominal da liga AA356. Segundo ABAL, 2007 a liga AA356 possui média resistência mecânica, excelente fluidez e estanqueidade sob pressão, boa resistência a corrosão e usinabilidade, e geralmente é utilizada em peças fundidas com seções finas, cilindros, válvulas, cabeçotes, blocos de motores, ferramentas pneumáticas.

Tabela 1: Composição química da liga AA356

Composição química nominal (% em massa)							
Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Zn	Ti	Ag
6,7	0,44	0,01	0,35	0,30	0,01	0,01	

Fonte: (Backerud, 1991).

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. Dependendo da quantidade de Silício, as ligas Al-Si são divididas em três grupos: hipo-eutéticas onde contêm de 5 a 10% de Si, eutética possuindo de 11 a 13% de Silício e hiper-eutética com 14 a 20% de Si (BACKERUD, 1991). Segundo FUOCO, MOREIRA a liga AA356 possui 7% de Si em sua composição, caracterizando uma liga hipo-eutética.

Algumas propriedades mecânicas da liga AA 356 no estado bruto de solidificação e após tratamento térmico de solubilização e envelhecimento, fundidas em molde permanente e em molde de areia são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Propriedades mecânicas da liga AA356

Estado bruto de solidificação		
Estrutura do eutético	Limite de resistência (MPa)	Alongamento (%)
Acicular (sem modificação)	180	7
Fibrosa (modificada)	200	16
Após tratamento de solubilização e envelhecimento – fundição em molde permanente		
Estrutura do eutético	Limite de resistência (Mpa)	Alongamento (%)
Acicular (sem modificação)	290	12
Fibrosa (modificada)	290	17
Após tratamento de solubilização e envelhecimento - fundição em molde de areia		
Estrutura do eutético	Limite de resistência (MPa)	Alongamento (%)
Acicular (sem modificação)	275	2,5
Fibrosa (modificada)	280	6

Fonte: (FUOCO, MOREIRA, sem data).

2.3. O PROCESSO DE FUNDIÇÃO – SOLIDIFICAÇÃO

O processo de fundição consiste no vazamento do metal líquido dentro de uma cavida na qual se deseja obter uma peça específica. Pelo lado da fundição, as ligas de alumínio caracterizam-se pelo baixo ponto de fusão. Outro modo, esta característica permite uma grande flexibilidade quanto aos tipos de moldes utilizados já que as solicitações térmicas são reduzidas. Ligas de alumínio fundidas são geralmente diferentes das ligas conformadas pela ausência de qualquer tipo de conformação mecânica em seu processamento, ou seja, são obtidas diretamente do líquido por meio de processos de fundição. São comuns os moldes de areia (a verde ou aglomerados com resinas ou silicatos), moldes metálicos (fabricados em aços ou ferros fundidos), moldes de gesso, moldes de materiais cerâmicos (fundição de precisão e processo “shaw”) (FUOCO, MOREIRA, sem data).

Moldes metálicos ditos permanentes, fabricados em materiais metálicos, são os preferidos para grandes produções por minimizarem os custos de moldagem e permitirem a obtenção de excelente acabamento superficial. Para menores volumes, os processos em areia, gesso e em moldes cerâmicos são mais relacionados. Contudo, em tais processos, uma menor velocidade de resfriamento, menor extração de calor por tempo do fundido das ligas desenvolve microestruturas grosseiras e o aumento do volume de microporosidades, causando uma má qualidade metalúrgica dos componentes (FUOCO, MOREIRA, sem data).

Fora o material de do molde, é destacado também os processos de fundição mediante forma de vazamento do metal, podendo ser:

- Por gravidade;
- Sob pressão ou
- Contra a gravidade com baixa pressão.

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:

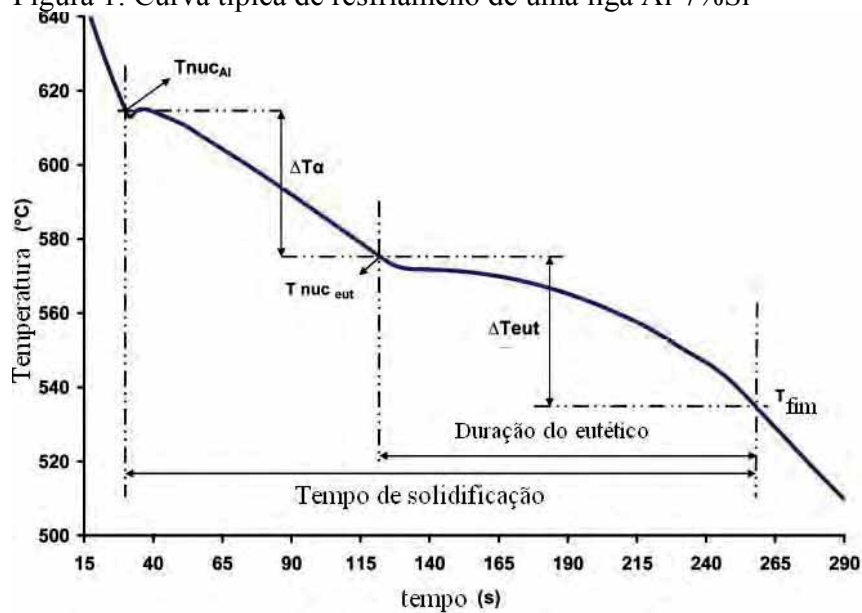
Tabela 3: Seqüência de solidificação de uma liga AA356

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	$L + Al_5FeSi \rightarrow \alpha + Si + Al_8Mg_3FeSi_8$	567
4	$L \rightarrow \alpha + Mg_2Si + Si$	555
5	$L \rightarrow \alpha + Si + Mg_2Si + Al_8Mg_3FeSi_8$	554

Fonte: Backerud et al. (1991)

Representa-se na figura 1 uma curva obtida num resfriamento de uma liga Al – Si com 7% de Silício. Nessa curva estão indicadas as temperaturas referentes à: nucleação da fase α (T_{nucal}), solidificação do eutético (T_{nucut}) e final da solidificação (T_{fim}).

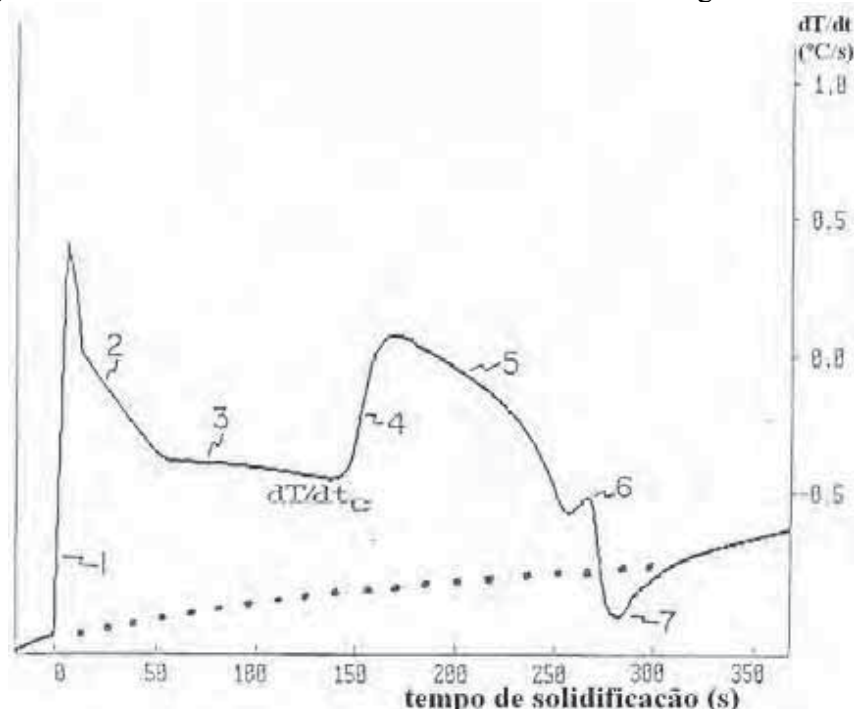
Figura 1: Curva típica de resfriamento de uma liga Al-7%Si



Fonte: Adaptado de NAFISI; GHOMASHCHI; VALI, 2008.

Para se alcançar maiores informações sobre a solidificação podemos fazer a análise da derivada da curva de resfriamento. Essa por sua vez, representa a taxa de resfriamento da amostra solidificada sendo ela numericamente igual à inclinação da curva de resfriamento. A figura 2 representa a derivada da curva de resfriamento, onde cada ponto enumerado representa um sub-processo do processo de solidificação (BACKERUD, 1990).

Figura 2: Derivada de uma curva de resfriamento de uma liga Al -Si7%



Fonte: BACKERUD, 1990

Podemos citar desse gráfico que na região 1, onde a derivada muda sua orientação de côncava para baixo para côncava para cima, ocorre o início de solidificação. Na região 2 ocorre o crescimento das dendritas de Alumínio desde a parede do molde em direção ao centro do molde. Na região 3 temos o espaçamento das dendritas. Seguindo, ocorre nucleação dos cristais de Silício na região 4 que aumenta a derivada e esta diminui na região 5. A região 6 nos mostra a nucleação e o crescimento da fase Mg_2Si . E por fim, o ponto 7 que é o último ponto de mínimo representa o fim da solidificação (BACKERUD, 1990).

2.4. FUNDIÇÃO EM MOLDES METÁLICOS E DE AREIA

Quando a fundição ocorre em molde metálico algumas vantagens são alcançadas em relação ao mesmo processo em moldes de areia. Podemos citar : Melhor acabamento superficial, melhores tolerâncias dimensionais, permitem reduzir o sobre-metal de usinagem, melhor qualidade microestrutural (e mecânica) devido a maior velocidade de resfriamento.as

propriedades mecânicas do material são determinadas logo após a solidificação, e essas tem relação essencial com o tamanho da granulação formada, segundo a taxa de resfriamento do fundido. Em molde de areia por ter baixa extração de calor, o tempo de solidificação é maior acarretando uma granulação maior e um pior acabamento superficial (FUOCO, MOREIRA, sem data).

2.5. REFINO DE GRÃOS EM LIGAS DE ALUMÍNIO FUNDIDOS

A velocidade de solidificação do fundido e a quantidade de núcleos em uma liga tem grande razão pelo tamanho de grão das ligas de alumínio fundidas. Portanto, para se diminuir o tamanho de grão o chamado refino de grão em uma liga, pode-se aumentar a quantidade de núcleos no fundido ou se aumentar a velocidade de resfriamento.

O objetivo de se refinar os grãos é reduzir os tamanhos das dendritas (grão da fase α pró-eutética), melhorando as condições de alimentação (e assim, a sanidade e estanquidade das peças fundidas), as propriedades mecânicas (limites de escoamento e de resistência), bem como a tendência a formação de trincas à quente. (FUOCO, MOREIRA, sem data)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS, FUNDIÇÃO E VAZAMENTO

3.1.1. PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE TÉRMICA

O presente trabalho consiste em estudar a liga AA356. Iremos realizar o mesmo trabalho para posterior comparação em dois lingotes distintos, sendo um obtido por molde metálico e outro obtido em molde de areia. Para obtenção dos lingotes a liga AA356 foi concedida pela ALCOA, em lingotes de 20 kg o qual foi cortado em partes menores de modo a caber no cadinho disponível do departamento de matérias e tecnologia - DMT da UNESP – Guaratinguetá para serem posteriormente fundidos em forno. Sendo o lingote de tamanho maior que o disponível na serra de fita, primeiro ele teve cortes mais bruscos na serra hidráulica (figura 1) e então cortes mais finos na serra de fita (figura 2).

Figura 3: Serra hidráulica usada para corte do lingote bruto



Nota: Serra hidráulica do laboratório DMT
Fonte: Autor

Figura 4: Serra de fita para cortes das peças



Nota: Serra de fita do laboratório do DMT

Fonte: Autor

O lingote em pedaços menores foi então colocado no cadinho, como mostra a figura 3.

Figura 5 : Cadinho preenchido com material a ser estudado (liga AA356)



Nota: Cadinho com material a se fundido

Fonte: Autor

Com uso de um forno elétrico (figura 4) o material foi levado à fusão.

Figura 6: Forno elétrico utilizado para fusão do material



Nota: Forno do laboratório do DMT
Fonte: Autor

Nesse trabalho utilizou-se de dois moldes: molde metálico (figura 5) e molde de areia (figura 6). Para confecção do molde de areia foi feita mistura em proporção de 1,5Kg de areia, 20 g de resina e 10g de resina. A utilização de materiais distintos dos moldes é proposital para se alcançar diferentes potenciais de extração de calor do molde / material e por conseqüência alterar a taxa de resfriamento do metal alterando conseqüentemente a velocidade de solidificação do metal e, portanto, a microestrutura dos lingotes.

Figura 7: Molde metálico posicionado para vazamento



Nota: Molde metálico usado para confeccionar lingote
Fonte: Autor

Figura 8: Molde de areia



Nota: Molde de areia usado para confeccionar lingote
Fonte: Autor

Com o material na fase líquida e o molde posicionado para o vazamento, termopares do tipo K conectados a um sistema de aquisição de dados, foram posicionados no centro do molde

objetivando o registro contínuo da temperatura do material desde o vazamento do metal líquido até a sua solidificação e resfriamento do metal.

O material foi fundido em um forno de resistência elétrica e vazado dois molde distintos: molde metálico e molde feito de areia verde com resina de cura a frio. Sendo os moldes cilíndricos, obtivemos lingotes de seção circular. Decorrido o tempo da fusão do material, o cadinho com o material líquido foi retirado do forno com auxílio de uma pinça metálica, e o operador com uso de equipamentos de segurança (avental e luva de proteção térmica) realizou o vazamento (figura 8). Lembrando que instantes ao vazamento, foi-se ligado e calibrado o termopar para registrar a cada segundo a respectiva temperatura do material.

Figura 9: Vazamento de metal líquido



Nota: Material sendo vazado no molde

Fonte: Autor

Os dados registrados são descarregados em um computador como arquivo de excel onde com auxílio do software “Origin”, são plotadas as curvas de resfriamento para os dois tipos de lingotes a serem estudados. Outras informações são alcançadas por meio do software “Origin”: derivada da curva de resfriamento, temperatura inicial e final de solidificação, temperatura eutética da liga, tempo de solidificação.

3.1.2. PROCEDIMENTO PARA MACROGRAFIA

Para a análise macrográfica foi realizada o preparo do material. Esse preparo consiste em cortar os lingotes obtidos na fundição ao meio, ou seja, transversalmente e posteriormente preparo da superfície a ser observada. Essa superfície foi lixada em lixas d'água de 100, 220, 320, 400 e 600 com orientação de 90° da superfície analisada a cada mudança de lixa, e essa superfície lixada foi atacada com solução de 45 ml de HCl, 15 ml de HNO₃, 15 ml de HF e 25 ml de H₂O. A solução foi preparada pelo departamento de química da UNESP – Guaratinguetá, e ela têm o objetivo de atacar a superfície a ser analisada de forma a delinear, ou seja, evidenciar os contornos grãos da liga de modo a ser mais facilmente observado.

3.1.3. PROCEDIMENTO PARA MICROGRAFIA

Nessa etapa também foi preciso se fazer o preparo do material, o qual consistiu em cortar o lingote em peças ainda menores de modo a ser possível seu embutimento e assim obtidos os corpos de prova. A máquina utilizada para embutimento é apresentada da figura 9.

Figura 10: Prensa metalográfica AROTEC PRE 30M



Nota: Máquina embutidora do DMT

Fonte: Autor

A análise microestrutural foi realizada em amostras transversais e longitudinais retiradas dos lingotes que foram cortados, embutidos e lixados utilizando agora a seguinte seqüência de lixas: 100, 220, 320, 400, 600 e 1200. Para caracterização microestrutural foi preciso realizar polimento da superfície. Esse polimento foi realizado com pasta de diamante, completada com solução de OP-S, foi utilizado reagente de solução 0,5% HF. Posteriormente, as amostras foram analisadas e fotografadas em microscópio ótico sendo esse a análise microscópica.

3.1.4. PROCEDIMENTO PARA ENSAIO DE DUREZA

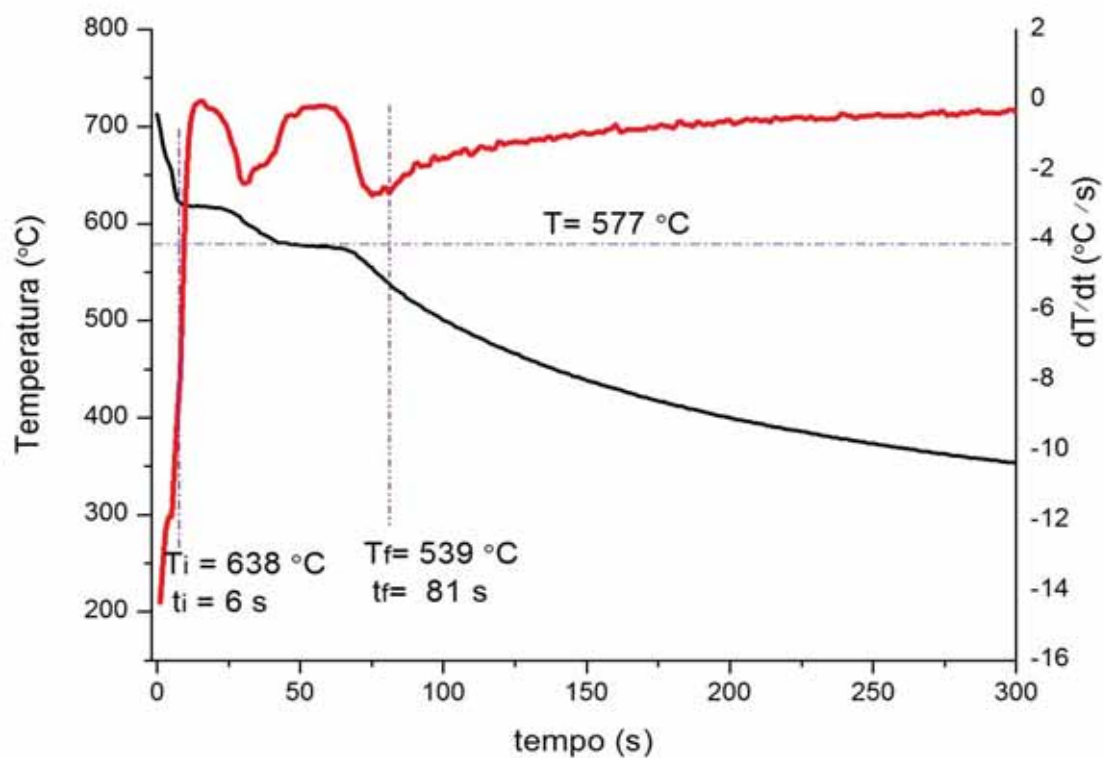
Para caracterização de dureza do material, foi-se utilizada a dureza Brinell. Com a peça embutida após a caracterização microestrutural, os corpos de prova foram levados até a máquina de dureza Brinell. Nesse ensaio uma esfera de 10 mm foi forçada com intensidade de 31,25 Kgf contra a superfície da amostra por 30 segundos deixando uma marca circular onde pela média do diâmetro medido tem-se a respectiva dureza tabelada. Realizada então o ensaio de dureza, a parte experimental desse trabalho encerra-se.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. ANÁLISE TÉRMICA

Os gráficos a seguir representam a análise térmica realizada por meio do software “Origin”. Informações conseguidas por meio do termopar posicionado no centro dos respectivos moldes. Pode ser encontrada nessa análise a curva de resfriamento e a derivada da curva de resfriamento, sendo também identificadas nos gráficos não só as temperaturas iniciais e finais de solidificação, mas também a temperatura eutética da liga. Pode ser encontrada também o tempo de solidificação, sendo que essas análises foram feitas para ambos os casos estudados nesse trabalho.

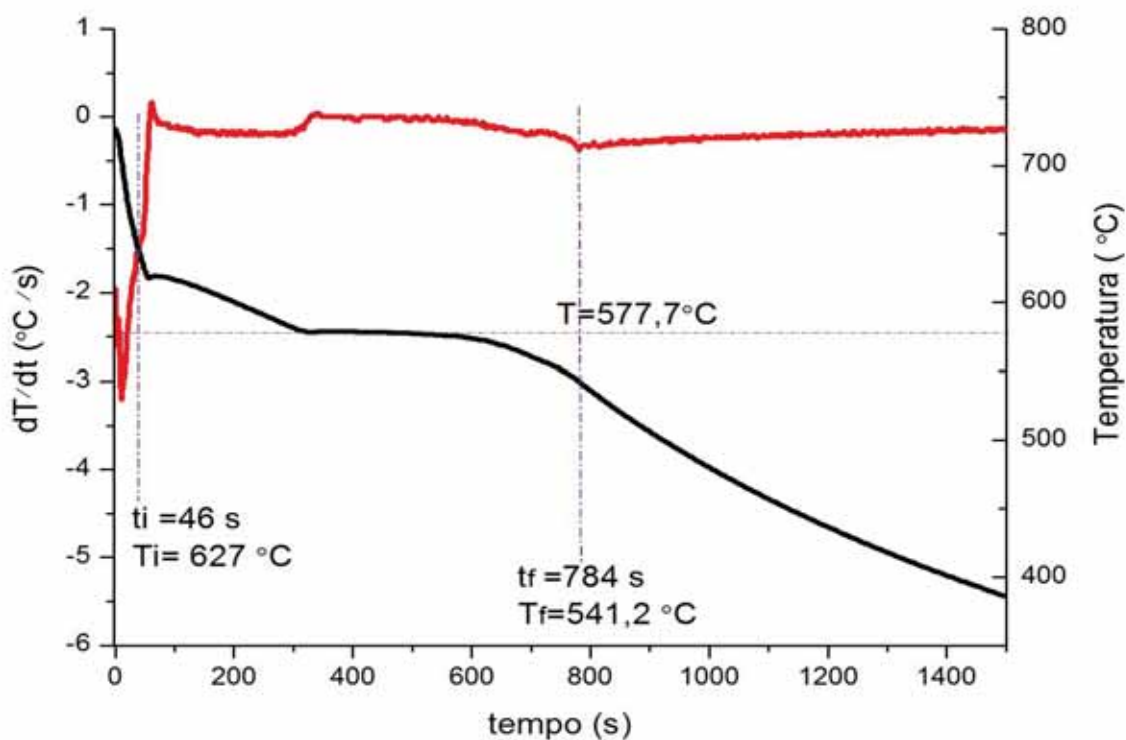
Figura 11: Curva de resfriamento e sua respectiva derivada para molde metálico



Nota: Gráfico construído por meio do software “Origin”
 Fonte: Autor

Na figura 11 podemos encontrar alguns símbolos, os quais são explicados a seguir: T_i significa temperatura inicial de solidificação, T_f significa temperatura final de solidificação, t_i significa o tempo inicial de solidificação, t_f o tempo final de solidificação e dT/dt representa a derivada temporal da curva de resfriamento.

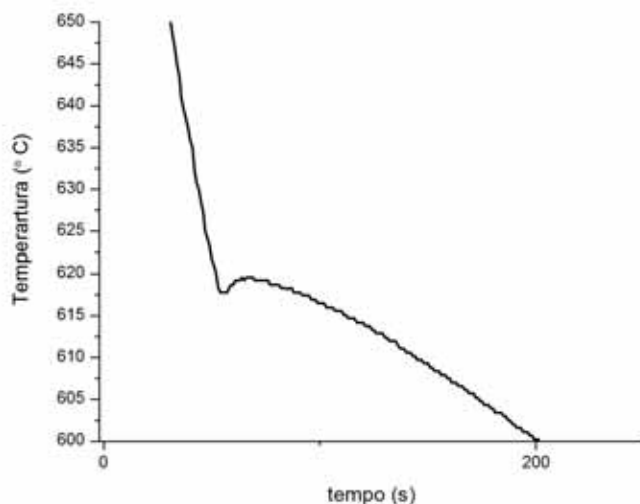
Figura 12: Curva de resfriamento e sua respectiva derivada para molde de areia



Nota: Gráfico construído por meio do software “Origin”
Fonte: Autor

Na figura 12 podemos encontrar alguns símbolos, os quais são explicados a seguir: T_i significa temperatura inicial de solidificação, T_f significa temperatura final de solidificação, t_i significa o tempo inicial de solidificação, t_f o tempo final de solidificação e dT/dt representa a derivada temporal da curva de resfriamento.

Figura 13: Fenômeno de superresfriamento em molde de areia



Nota: Gráfico construído por meio do software “Origin”

Fonte: Autor

De acordo com os resultados da análise térmica observamos que houve algumas diferenças foram encontradas para os procedimentos realizado em molde de areia e metálico. Observamos diferenças no tempo total de solidificação do material, sendo maior o tempo a solidificação do lingote fabricado em molde de areia e destacando também que somente nesse lingote houve a presença do fenômeno de superresfriamento ou recalescência como mostrado na figura 12. Contudo, as características da curva de resfriamento não foram alteradas, obtendo-se valores para as temperaturas de início / fim de solidificação e eutética bem próximos, praticamente iguais nos dois moldes estudados.

Análise térmica é uma ótima ferramenta para determinação de importantes parâmetros do processo de solidificação como: temperatura de início e fim da solidificação, temperatura eutética da liga, tempo de solidificação, taxa de resfriamento, aparecimento de fases que liberam calor.

Com a análise térmica verifica-se que o tipo de molde influenciou significativamente na curva de resfriamento, porém tendo para ambos os casos estudados praticamente os mesmos valores de temperatura de início e fim da solidificação e temperatura eutética. Para o tempo de solidificação o tipo de molde foi fundamental para a diferença obtida entre os casos, observando que em molde de areia ocorreu o fenômeno de superresfriamento por conta da menor taxa de resfriamento oferecida pelo molde de areia não sendo encontrado em molde metálico.

4.2. ANÁLISE MACROSCÓPICA

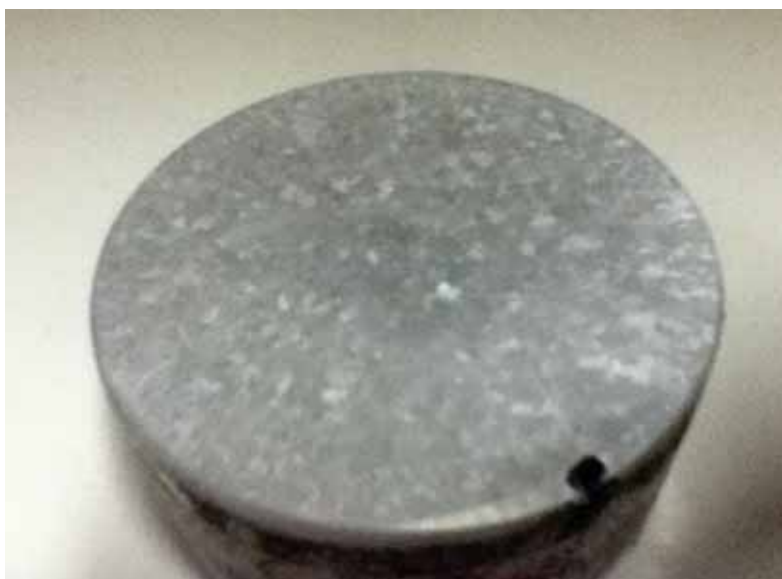
A caracterização macroestrutural realizada foi registrada e encontram-se ilustradas nas figuras 14, 15 e 16. Nessa análise podemos verificar a diferença no tamanho de grãos e no acabamento, homogeneidade das superfícies para os dois casos estudados.

Figura 14: Macrografia no lingote molde de areia



Nota: Lingote feito no molde de areia
Fonte: Autor

Figura 15: Macrografia no molde metálico



Nota: Lingote feito no molde metálico
Fonte: Autor

Figura 16: Comparação entre macrografia dos moldes



Nota: Lingote em comparação
Fonte: Autor

A análise macroscópica mostra que os contornos de grãos na estrutura proveniente do molde de areia são maiores daqueles encontrados por molde metálico. Através do molde metálico

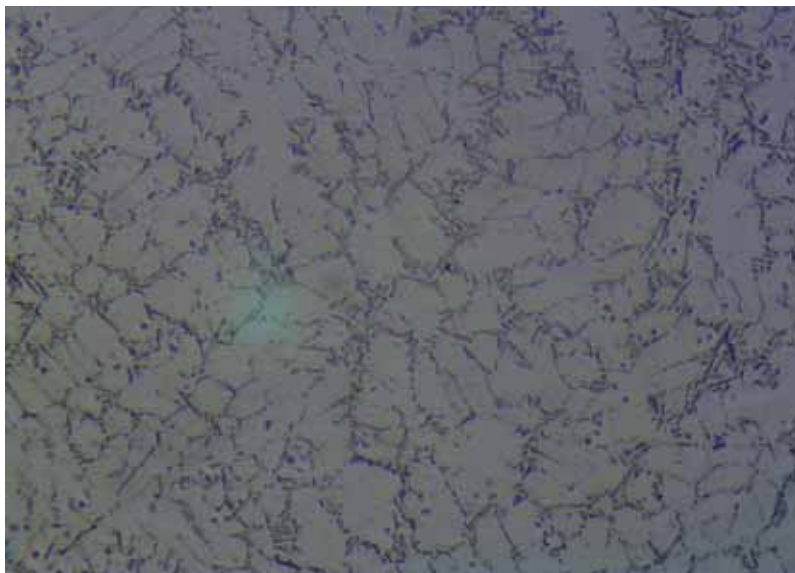
é obtida uma superfície mais bem acabada, livre de poros em sua superfície mostrando uma superfície mais homogênea em relação ao molde de areia. Com moldes distintos, os lingotes experimentaram taxas de resfriamento distintas que proporcionaram fenômenos distintos observados nos lingotes: para molde metálico houve bem definido as três zonas de solidificação na macroestrutura do material e em molde de areia houve o fenômeno do superresfriamento.

4.3. ANÁLISE MICROSCÓPICA

A análise microscópica realizada foi registrada e seus resultados seguem nas figuras a seguir. Para os dois casos analisados, foram realizados os procedimentos bem como os registros considerando a superfície em sua orientação transversal e longitudinal.

Aumento de 50x foram utilizados para obtenção das figuras 17, 18, 19 e 20, e através delas pode ser verificadas algumas diferenças as quais serão discutidas posteriormente.

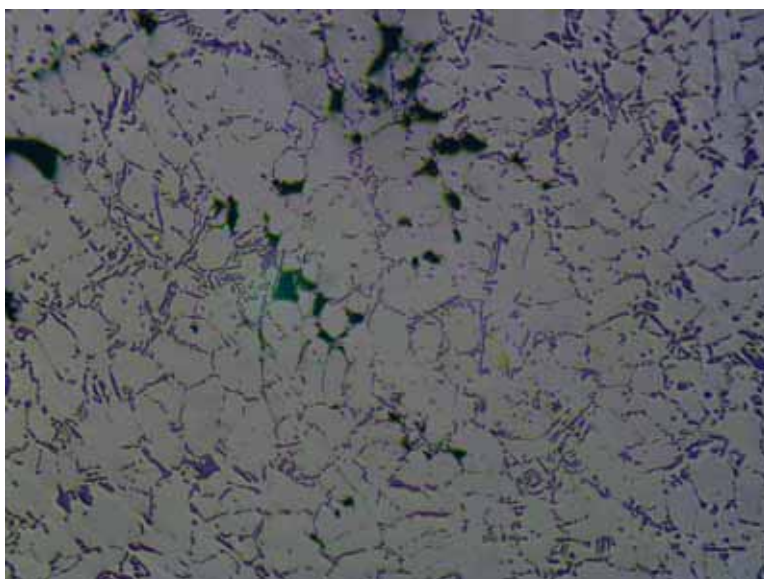
Figura 17: Micrografia transversal (50x) do lingote vazado em molde metálico



Nota: Micrografia transversal do lingote confeccionado em molde metálico

Fonte: Autor

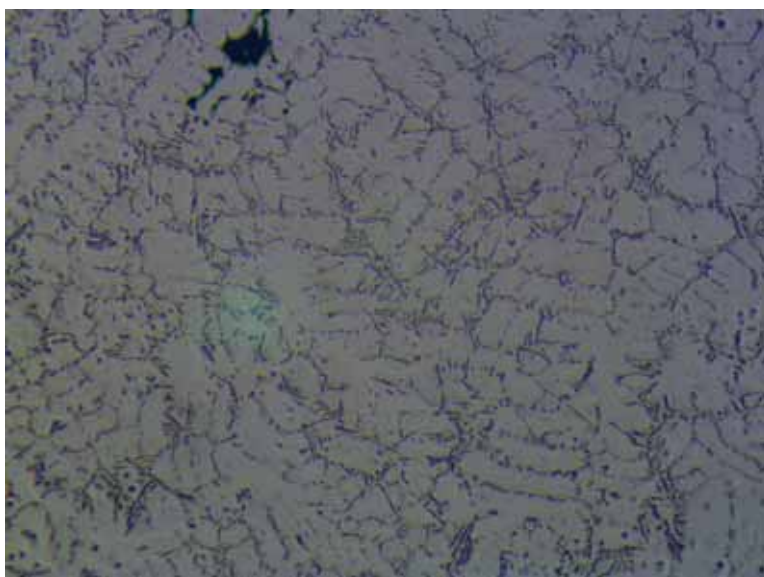
Figura 18: Micrografia transversal (50x) do lingote vazado em molde de areia



Nota: Micrografia transversal do lingote confeccionado em molde de areia

Fonte: Autor

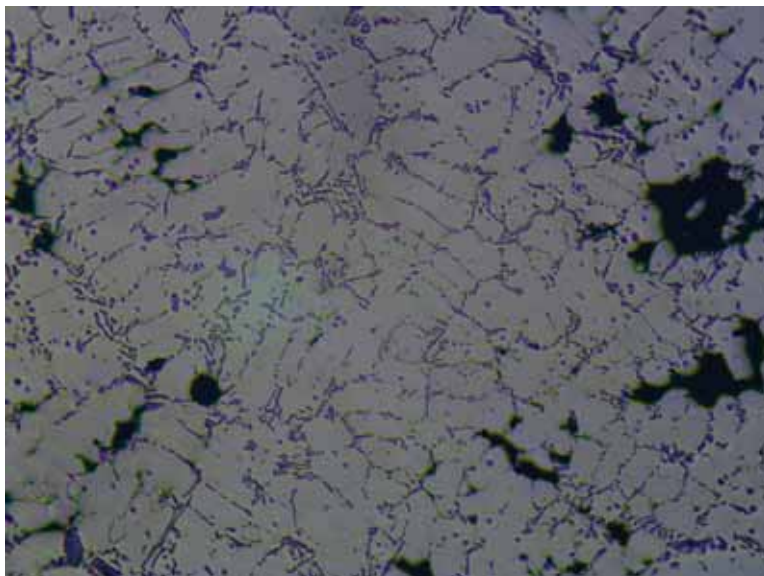
Figura 19: Micrografia longitudinal (50x) do lingote vazado em molde metálico



Nota: Micrografia longitudinal do lingote confeccionado em molde metálico

Fonte: Autor

Figura 20: Micrografia longitudinal (50x) do lingote em molde de areia



Nota: Micrografia longitudinal do lingote confeccionado em molde de areia

Fonte: Autor

Com a análise microscópica pode ser observada melhor a diferença na estrutura entre os lingotes estudados, podendo ser verificada de uma forma mais consistente a existência maior número de poros na estrutura proveniente em molde de areia, e também a melhor homogeneidade da superfície em molde metálico. Outra evidência foi que o tamanho dos grãos nas amostras de molde de areia foram maiores do que de molde metálico. Análise microscópica permite intensificar as proposições sobre as características observadas na análise macroestrutural.

4.4. ENSAIO DE DUREZA

O teste de dureza foi realizado através do ensaio de dureza Brinell. Foram feitas 4 medidas em cada corpo de prova, sendo essas medidas médias de dois testes realizados que por sua vez são médias de duas medidas de diâmetro medidas. Os resultados que seguem na tabela 4 foram médias aritméticas de todas as medidas realizadas:

Tabela 4: Dureza das amostras em molde metálico e de areia, transversal e longitudinal

	Transversal	Longitudinal
Molde metálico	44,5 HB	51,3 HB
Molde de areia	35,6 HB	49,3 HB

Nota: Tabela com valores de dureza dos lingotes

Fonte: Autoria própria

Feito o teste de dureza observamos que em molde metálico os lingotes experimentaram um maior valor de dureza em relação ao molde de areia. Ressaltando também que ambos os casos, em orientação longitudinal o valor de dureza encontrado foi superior ao valor encontrado transversalmente.

Relaciona-se assim, essas propriedades medidas com o procedimento utilizado concluindo que a microestrutura tem influencia nas propriedades de um material, liga. E no caso estudado, a observação é que estruturas mais homogêneas, grãos menores geram propriedades superiores a materiais que possuem granulações maiores. Uma explicação para esse evento seria que grãos vizinhos compartilham orientações cristalográficas diferentes, mas ao mesmo tempo possuem o mesmo contorno de grão. Em um processo de deformação mecânica como o ensaio de dureza, o escorregamento de planos e a movimentação das discordâncias precisam ultrapassar a barreira imposta pelo contorno de grão e continuar no grão ao lado. Essa barreira faz com que se reduza a movimentação das discordâncias, e essa barreira é aumentada à medida que a orientação cristalográfica acentua-se. Sendo assim, grãos menores proporcionam impõem menores barreiras às movimentações das discordâncias gerando assim materiais mais duros e resistentes do que materiais com granulação maior.

5. CONCLUSÕES

Através dos resultados apresentados pode-se obter as seguintes conclusões:

Conclui-se então que a taxa de resfriamento, extração de calor do material em molde metálico foi bem superior ao do molde de areia. Os diferentes moldes utilizados foram fundamentais para os distintos resultados da macroscopia encontrados.

De um modo geral, verifica-se que a taxa de resfriamento na solidificação da liga AA356 tem papel fundamental em sua microestrutura e assim também uma sua propriedade mecânica final.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, G.F.C.et al. **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.

ARAB,N.;NAZARYAN,E.;HABIBI,S.**Evaluation of nucleation in AA-356 aluminum alloy by thermal analysis.**Journal of Non-Ferrous Metals, Rússia, v.51, p.79-84, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO.(ABAL). **Fundamentos e aplicações do alumínio.** São Paulo: ABAL, 2007. 68 p.

BÄCKERUD, L.; CHAI, G.; TAMMINEN, J. **Solidification characteristics of aluminum alloys:** Foundry alloys. Stockholm: AFS/Skanaluminum, 1990. v. 2.

COLUCI, M. A. P. **Tratamento de modificação de eutético da liga AA-356.** 2011. 85 f. Tese (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá – SP, 2011.

EMADI, D. et al; **Applicatuion Of Thermal Analysis In Quality Control Of Solidification Processes.** **Journal of thermal analysis and calorimetry** ,Quebec, Canadá, vol 81, p.233-242, 2003.

FUOCO, R.; MOREIRA, M. F. **Ligas de alumínio fundidas.** Disponível em: <<http://www.dalmolim.com.br/EDUCACAO/MATERIAIS/Bibliomat/aluminiofund.pdf>>. Acesso em: 12 dez.. 2013.

KUMARI et al. **Materials Science and Engineering** Effects of individual and combined additions of Be,Mn,Ca and Sr on the solidification behavior,structure and mechanical properties of Al-7Si-0,3Mg-0,8Fe alloy. A, Kerala, India, v. 460, p.561-573, 2007.

NAFISI, S.; GHOMASHCHI, R.; VALI, H. **Eutectic nucleation in hypoeutectic Al-Si alloys;** Materials characterization. v. 59, p. 1466-1473, 2008.

SILVA, C. C. **Utilização da curva de resfriamento na análise do refino de grão da liga AA 356.** 2012. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.