

CRISTIANE MAYUMI WADA
LIANE SASAKI TUBOZAKA

CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DA LIGA Al - 1%Si

CRISTIANE MAYUMI WADA
LIANE SASAKI TUBOSAKA

Caracterização estrutural da liga de Al – 1%Si

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

Orientador: Prof. Dr. Carlos kiyan

Guaratinguetá

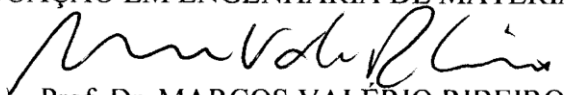
2013

W116c	Wada, Cristiane Mayumi Caracterização estrutural da Liga Al-1%Si / Cristiane Mayumi Wada, Liane Sasaki Tubosaka – Guaratinguetá : [s.n], 2013. 53 f. : il. Bibliografia: f. 53 Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013. Orientador: Prof. Dr. Carlos Kiyan 1. Ligas de alumínio 2. Fundição 3. Curvas – resfriamento I. Tubosaka, Liane Sasaki II. Título CDU 669.715
-------	--

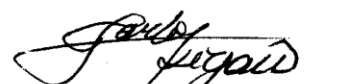
CRISTIANE MAYUMI WADA
LIANE SASAKI TUBOZAKA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE “**GRADUADO EM**
ENGENHARIA DE MATERIAIS”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS.


Prof. Dr. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. CARLOS KIYAN
Orientador UNESP/FEG


Mestre CÁSSIA CAVALCANTI DA SILVA
UNESP/FEG


Mestre ÉRIKA APARECIDA DA SILVA
UNESP/FEG

Dezembro de 2013

DADOS CURRICULARES

CRISTIANE MAYUMI WADA

NASCIMENTO	25/04/1991 – SÃO PAULO / SP
FILIAÇÃO	Carlos Wada Tizuko Ito Wada
2009/2013	Curso de Graduação Engenharia de Materiais – UNESP / Guaratinguetá

LIANE SASAKI TUBOSAKA

NASCIMENTO	12/02/1989 – SÃO PAULO / SP
FILIAÇÃO	Toyoaki Tubosaka Hiroyo Sasaki

De modo especial, aos meus pais que sempre me apoiaram a continuar no curso. A minha formação como profissional não poderia ter sido concretizada sem a ajuda deles.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Carlos kiyan* pela sua orientação e dedicação.

Aos meus pais pela determinação e luta pela minha formação.

Às funcionárias da Biblioteca do campus de Guaratinguetá pela presteza e vontade de ajudar.

Aos meus professores que durante o curso sempre se dedicaram a ensinar os alunos da melhor forma.

Ao *André* por sempre me incentivar.

À *Cássia* pela ajuda e colaboração na solução de dúvidas do meu TCC.

À *Érika* pela vontade de ajudar.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.”

Charles Chaplin

WADA, C. M.; TUBOSAKA, L. S. **CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DA LIGA DE Al – 1% Si**. 2013. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo caracterizar a macroestrutura e microestrutura de lingotes da liga Al – 1% Si obtidos em moldes de areia e moldes metálicos. O Alumínio apresenta boas propriedades mecânicas, mas a adição de silício, mesmo que em pequenas quantidades, produz mudanças na estrutura e ganho no comportamento mecânico. Foram fundidas peças em molde metálico e em molde de areia e pode-se ver a diferença em suas curvas de resfriamento e estruturas, tanto macroscópicas quanto microscópicas. A peça fundida em molde de areia apresenta menor taxa de resfriamento e consequentemente seus grãos são maiores. Devido a menor densidade de contorno de grão sua dureza é menor em relação ao feito em molde metálico que apresenta grãos menores e uma maior dureza. Portanto pode-se concluir que a taxa de resfriamento e elementos de liga influenciam na microestrutura final de uma peça fundida.

PALAVRAS-CHAVE: Liga de Al- 1%Si. Curva de resfriamento. Molde de areia. Molde metálico. Fundição.

WADA, C. M.; TUBOSAKA, L. S. 2013. STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF Al - 1% Si ALLOY. Graduate Work (Graduate in Materials Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

ABSTRACT

The aim of this study is to characterize the macrostructure and microstructure of Al - 1%Si alloy obtained in sand and metallic molds. Aluminium has good mechanical properties, but adding silicon, even in small quantities, can change the microstructure and improves mechanical behavior. Workpieces were castings in metallic and sand molds and one can see a difference in their cooling curve, macroscopic and microscopic structures. The sand mold casting has lower cooling rate and so its grains are larger. Due to the lower concentration of grain boundary, the hardness is lower compared to that found in metallic molds, which has smaller grains and a higher hardness. Therefore, it can be concluded that the cooling rate and alloying elements affect the final microstructure of the workpiece.

KEYWORDS: Al-1% Si Alloy. Cooling curve. Sand mold. Metallic mold. Casting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Elemento alumínio.....	16
Figura 2 – Ligas de Alumínio formadas com os principais elementos de liga comerciais.....	17
Figura 3 – Elemento silício.....	18
Figura 4 – Encadeamento de fenômenos durante a solidificação de um metal.....	19
Figura 5- Casos típicos de curvas de resfriamento: (a) elemento puro com super-resfriamento; (b) mesma situação anterior sem retorno ao ponto de fusão; (c) Sólido amorfo.....	22
Figura 6 – Representação esquemática das zonas estruturais da macroestrutura de fundição (seção transversal de uma peça cilíndrica)	23
Figura 7 – Possíveis variações na macroestrutura de uma mesma peça(seção longitudinal), em função das condições de solidificação: (a) ausência de zona equiaxial central; (b) presença das três zonas; (c) ausência das zonas coquilha e colunar.....	24
Figura 8 – Esquema ilustrativo da emissão de raio-x	25
Figura 9 – Espectro obtido por microanálise de raio-x característicos por EDS com tabela de discriminação dos elementos analisados.....	26
Figura 10 – Endentação do material com uma esfera de aço	27
Figura 11 – Fabricação do molde de areia.....	28
Figura 12 – a) corte do material b) cadinho com a liga a ser derretida.....	29
Figura 13 – a) Molde metálico com termopar b) Molde de areia com termopar	29
Figura 14 – Retirada da escória.....	30
Figura 15 – Aparelho para registro da temperatura durante o resfriamento.....	30
Figura 16 – Microscópio simples utilizado para macrografia.....	30
Figura 17 – Embutidora.....	32
Figura 18 – Politriz	33
Figura 19 – Microscópio óptico utilizado para Micrografia.....	34
Figura 20 – Microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	35
Figura 21 – Durômetro para o ensaio de dureza Brinell.....	35
Figura 22 - curva de resfriamento do molde de areia e sua derivada.....	37
Figura 23 - curva de resfriamento do molde metálico e sua derivada.....	38
Figura 24- Macrografia da peça fundida em molde metálico.....	39
Figura 25– Macrografia da peça fundida em molde de areia.....	40

Figura 26- (a) Peça circular fundida de alumínio puro (b) Peça retangular fundida de alumínio puro.....	40
Figura 27- (a)Peça longitudinal com aumento de 50x em molde de areia (b) Peça longitudinal com aumento de 500x em molde de areia.....	42
Figura 28 –a) Peça transversal com aumento de 50x em molde de areia b) Peça transversal com aumento de 500x em molde de areia.....	43
Figura 29 – a) Peça longitudinal com aumento de 50x em molde de metal b)Peça longitudinal com aumento de 500x em molde de metal.....	44
Figura 30 – (a) Peça transversal com aumento de 50x em molde de metal (b) Peça transversal com aumento de 500x em molde de metal.....	44
Figura 31 – Imagem no MEV da peça feita em molde de areia.....	45
Figura 32 - Espectro obtido por microanálise de raio-x característicos por EDS.....	46
Figura 33 - Imagem no MEV da peça feita em molde de metal.....	47
Figura 34 - Espectro obtido por microanálise de raio-x característicos por EDS.....	48
Figura 35 – Esquema da medição feita na peça realizada do centro para a borda.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS

Al	símbolo do elemento alumínio
%	por cento
D	diâmetro
g	gramas
°C	graus
Km	quilômetro
O	símbolo do elemento oxigênio
s	segundos
Si	símbolo do elemento silício
T	temperatura
t	tempo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	O ALUMÍNIO E SUAS LIGAS	16
2.1.1	Silício	17
2.2	PROCESSOS DE FUNDIÇÃO	18
2.3	NUCLEAÇÃO	20
2.4	TIPOS DE MOLDES	20
2.4.1	Fundição em molde de areia	21
2.4.2	Fundição em molde de metal	21
2.5	CURVA DE RESFRIAMENTO	21
2.6	MACROESTRUTURA DE FUNDIÇÃO	23
2.7	EDS	24
2.8	ENSAIO DE DUREZA	27
3	MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1	FUNDIÇÃO E VAZAMENTO	28
3.2	CURVA DE RESFRIAMENTO	30
3.3	MACROGRAFIA	31
3.4	MICROGRAFIA	32
3.5	EDS	34
3.6	ENSAIO DE DUREZA BRINELL	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1	CURVA DE RESFRIAMENTO	37
4.1.1	Molde de areia	37
4.1.2	Molde de metal	37
4.2	MACROGRAFIA	37
4.2.1	Molde de metal	39
4.2.2	Molde de areia	39
4.2.3	Alumínio puro	40
4.3	MICROGRAFIA	41
4.3.1	Molde de areia	41

4.3.2	Molde de metal.....	43
4.4	EDS.....	45
4.4.1	Molde de areia.....	45
4.4.2	Molde de metal.....	47
4.5	ENSAIO DE DUREZA BRINELL.....	49
5	CONCLUSÕES.....	51
	REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

O alumínio é o elemento metálico mais abundante na crosta terrestre. Seu minério mais importante é a bauxita (PEIXOTO, 2001). O alumínio, apesar de ser o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, é o metal mais jovem usado em escala industrial.

Segundo (ABAL) uma das vantagens mais importantes do alumínio é o fato de poder ser transformado com facilidade. O alumínio pode ser laminado em qualquer espessura e extrudado numa infinidade de perfis de seção transversal constante e grande comprimento. O metal pode ser também, forjado ou impactado. A facilidade e a velocidade com o qual o alumínio pode ser usinado é outro importante fator que contribui para difundir o uso desse material e que também aceita, praticamente, todos os métodos de união, tais como rebiteagem, soldagem, brasagem e colagem. Além disso, para a maioria das aplicações do alumínio não são necessários revestimentos de proteção.

O Silício é o segundo elemento mais abundante na Terra. Quando usado como elemento de liga no alumínio diminui a temperatura de fusão, aumenta a fluidez da liga, aumenta a resistência mecânica e melhora a ductilidade (ZANGRANDI, 2008).

A fundição é um processo de fabricação onde um metal fundido é vazado na cavidade de um molde que possui a forma desejada; com a solidificação, o metal assume o formato do molde (CALLISTER, 2008).

Os moldes para fundição podem ser divididos em moldes temporários, permanentes ou mistos. Como um exemplo de molde temporário temos o de areia verde que possui grande flexibilidade pois o processo é simples, econômico e pode ser utilizado na produção de peças fundidas de grande variedade de tamanhos (CAMPOS FILHO; DAVIES, 1978). Já o molde metálico é do tipo permanente, estes apresentam algumas vantagens sobre os moldes de areia, como, melhor acabamento superficial e melhores tolerâncias dimensionais (MOREIRA; FUOCO, 2009).

Na maioria das situações práticas de solidificação, para que o líquido possa tomar completamente a forma geométrica que se pretende dar ao sólido, é necessário que o vazamento desse líquido ocorra a uma temperatura superior àquela que dá início à transformação líquido sólido, para que o líquido possa escoar e preencher completamente os contornos geométricos da peça. Uma vez iniciada a transformação em sólido, a temperatura do líquido remanescente atinge rapidamente a temperatura de fusão em função do calor latente que é liberado (GARCIA, 2001). A curva de resfriamento é a ferramenta mais

utilizada para o estudo da solidificação, principalmente para determinação das temperaturas de início e término da solidificação.

Uma propriedade mecânica importante é a dureza, que é uma medida da resistência de um material à deformação plástica local. Ao longo dos anos foram desenvolvidas técnicas de dureza quantitativas, nas quais um pequeno endentador é forçado para dentro da superfície de um material a ser testado, sob controladas condições de carga e de taxa de aplicação. É medida a profundidade ou tamanho da resultante, quanto mais macio o material maior a endentação e menos o número índice de dureza.

Nos ensaios de dureza Brinell, um penetrador esférico e duro é forçado contra a superfície do metal a ser testado. O diâmetro do penetrador é de 10 mm e as cargas padrões variam de 500 a 3000 kg, durante o ensaio a carga é aplicada por um tempo específico (entre 10 e 30s) (CALLISTER, 2008).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

O alumínio mostrado na Figura 1 possui uma combinação de propriedades que o tornou um dos metais mais versáteis, econômicos e atrativos para inúmeras aplicações em diversos setores da engenharia (ZANGRANDI, 2008).

Figura 1 – Elemento alumínio

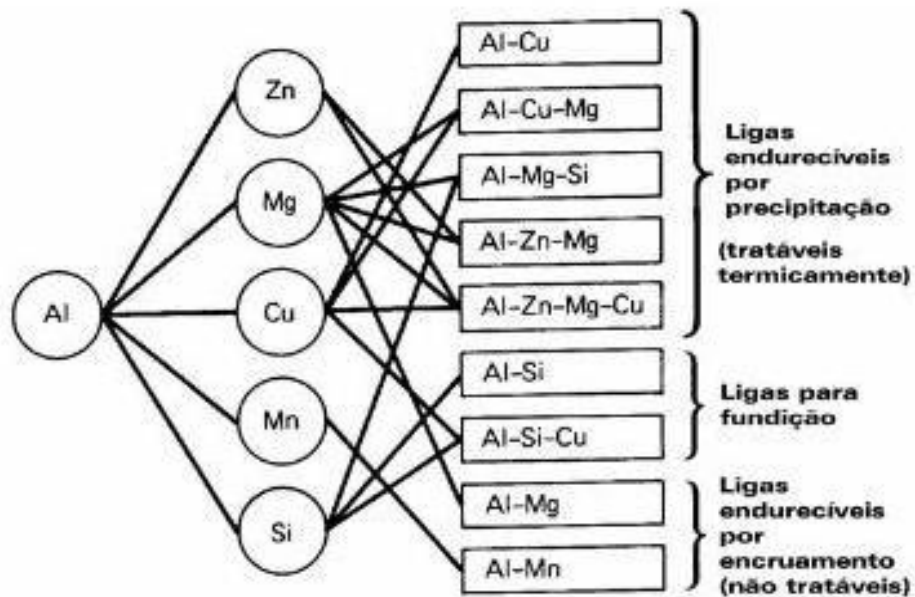


O alumínio e suas ligas são caracterizados por uma densidade relativamente baixa ($2,7 \text{ g/cm}^3$, em comparação com uma densidade de $7,9 \text{ g/cm}^3$ para o aço), condutividade elétrica e térmica elevadas, e uma resistência à corrosão em alguns ambientes comuns, incluindo a atmosfera ambiente (CALLISTER, 2002).

Hoje sabe-se que o alumínio é o elemento metálico mais abundante na crosta terrestre. Seus compostos acham-se concentrados nos 15 km mais externos da crosta e correspondem a cerca de 8% em massa da mesma. Só é menos abundante que o oxigênio e o Silício. Seu minério mais importante é a bauxita (PEIXOTO, 2001).

A Figura 2 mostra um esquema, que ilustra várias combinações do alumínio com alguns dos elementos de liga comerciais e a formação das respectivas ligas (DEAN, 1990).

Figura 2 – Ligas de Alumínio formadas com os principais elementos de liga comerciais



Fonte: (DEAN, 1991, p.201).

As ligas de alumínio, por razões de conveniência, foram divididas em dois grandes grupos, com base no processo de fabricação, ou seja, o grupo das ligas trabalhadas ou dúcteis e o grupo das ligas para fundição ou fundidas (na forma de lingotes ou produtos) (ZANGRANDI, 2008).

2.1.1 Silício

O silício como mostrado na figura 3 ocorre na Natureza combinado com o oxigênio, na forma de dióxido de silício, e com oxigênio e diversos metais, na forma de silicatos, nunca se encontrando isolado. No seu conjunto, os silicatos e a sílica, representam 60 % da crosta terrestre. O tetraedro SiO_4 é a unidade estrutural primária de todas estas substâncias. (TRINDADE; 2002).

Figura 3 – Elemento silício

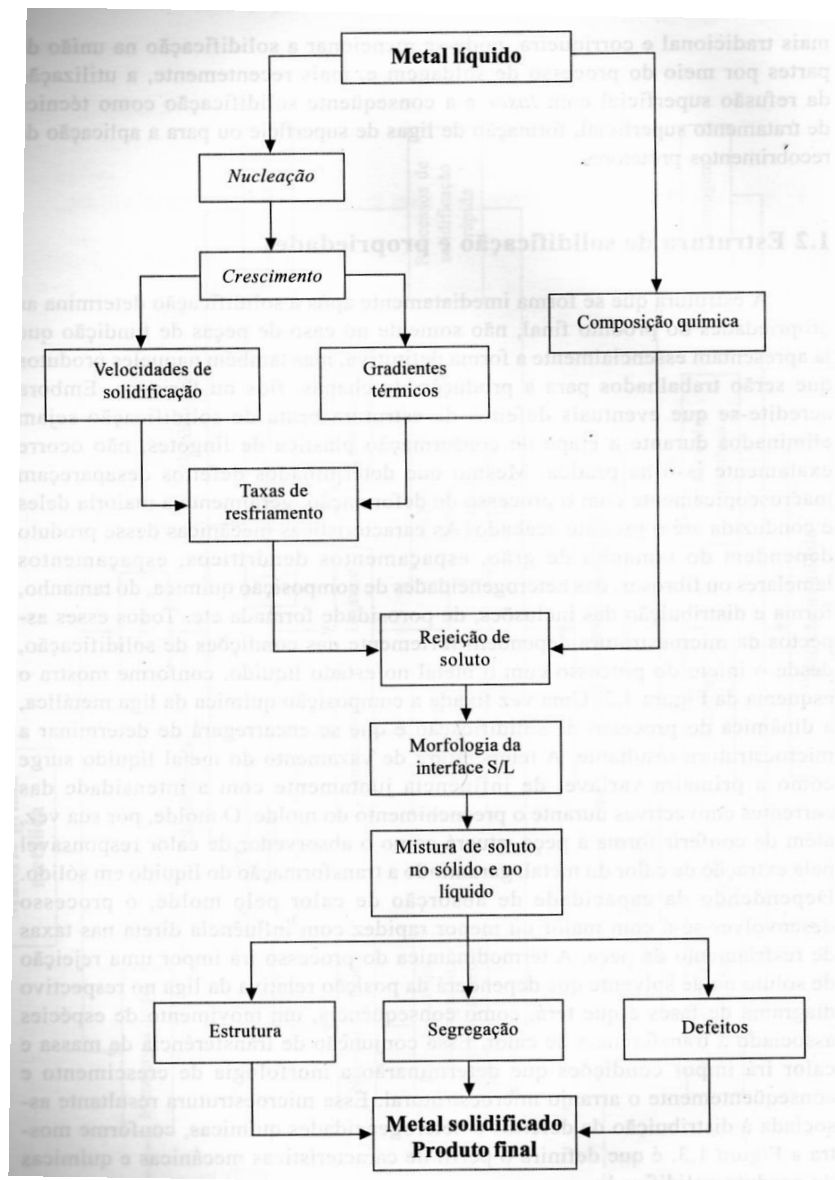


Segundo ZANGRANDI (2008), quando o silício como elemento de liga é adicionado ao alumínio apresenta determinadas características. O silício além de diminuir a temperatura de fusão aumenta a fluidez da liga, aumenta a resistência mecânica e melhora a ductilidade. O silício quando adicionado juntamente com o magnésio propicia o endurecimento por precipitação da liga.

2.2 PROCESSOS DE FUNDIÇÃO

A base de todos os processos de fundição como mostrado na Figura 4 consiste em alimentar o metal líquido, na cavidade de um molde com o formato requerido, seguindo-se um resfriamento, a fim de produzir um objeto sólido resultante de solidificação. Os vários processos diferem, principalmente, na maneira de formar o molde (CAMPOS FILHO; DAVIES, 1978).

Figura 4 – encadeamento de fenômenos durante a solidificação de um metal.



Fonte: (GARCIA, 2007).

As técnicas de fundição são empregadas quando (1) a forma acabada é tão grande ou complicada que qualquer outro método seria impraticável, (2) uma liga específica possui ductilidade tão baixa que a conformação tanto a quente como a frio seria difícil, e (3) em comparação a outros processos de fabricação, a fundição é o processo mais econômico (CALLISTER, 2002).

A estrutura que se forma imediatamente após a solidificação determina as propriedades do produto final, não somente no caso de peças de fundição que já apresentam essencialmente

a forma definitiva, mas também naqueles produtos que serão trabalhados para a produção de chapas, fios ou forjados. As características mecânicas desse produto dependem do tamanho de grão, espaçamentos dendríticos, espaçamentos lamelares ou fibrosos, das heterogeneidades de composição química, do tamanho, forma e distribuição das inclusões, de porosidade formada, etc (GARCIA, 2007).

2.3 NUCLEAÇÃO

A nucleação pode ser definida como a formação de uma nova fase a partir de outra, em posições específicas e caracterizada por contornos bem definidos que a separam do meio que a gerou. No caso da solidificação a nucleação envolve a formação de partículas de sólido envolvidas pelo material líquido. As condições que favorecem a ocorrência da nucleação dependem dos aspectos termodinâmicos e das condições cinéticas da transformação. (GARCIA, 2007).

A nucleação será sempre heterogênea, sendo que as paredes do molde funcionam como ponto de partida para a solidificação. A velocidade de aquecimento, a temperatura e o tempo em que o metal permanece superaquecido podem afetar formação ou dissolução de eventuais núcleos heterogêneos formados a partir de impurezas presentes (SOARES, 2000).

2.4 TIPOS DE MOLDES

Tradicionalmente são utilizados para modelos e caixas de macho, materiais como madeira (cedro, pinho e compensado, entre outros), metais (alumínio e aço, principalmente) e resinas do tipo epóxi (podem ser reforçadas com pó de alumínio, por ex.). Estes materiais diferem entre si quanto ao acabamento e a durabilidade que conferirão ao modelo.

Em primeiro lugar é preciso saber se o processo de moldagem selecionado apresenta alguma exigência em termos de fabricação do molde. Caso não haja restrição quanto ao material do modelo, a escolha dependerá basicamente do lote de peças a fabricar, da tolerância dimensional e acabamentos requeridos para a peça fundida (SOARES, 2000).

2.4.1 Fundição em molde de areia

No caso da fundição em molde de areia, que é o método de fundição mais comumente utilizado, a areia comum é utilizada como material de molde (CALLISTER, 2002). Uma consideração importante é saber qual o tipo de moldagem em areia a ser utilizado. O maior constituinte dos moldes de areia modernos é a sílica (SiO_2). Ela é obtida em depósitos naturais de areia possuindo, normalmente, forma arredondada e tamanho relativamente uniforme. Pode também ser obtida de rochas ou pedra arenosa, através de britagem, sob a forma de partículas angulares e de tamanho não-uniforme.

O processo básico de fundição em areia apresenta muitas vantagens. Possui grande flexibilidade como processo e é simples, econômico e pode ser utilizado na produção de peças fundidas de grande variedade de tamanhos, desde algumas gramas até várias toneladas. As perdas de material do molde são pequenas, já que a areia pode ser recondicionada e reutilizada (CAMPOS FILHO; DAVIES, 1978).

2.4.2 Fundição em molde de metal

Os moldes metálicos apresentam algumas vantagens sobre a fundição em moldes de areia. As principais são: melhor acabamento superficial, melhores tolerâncias dimensionais, permitem reduzir o sobre-metal de usinagem, melhor qualidade microestrutural e mecânica devido a maior velocidade de resfriamento, menor necessidade de operações de limpeza e rebarbação de fundidos (MOREIRA; FUOCO, 2009).

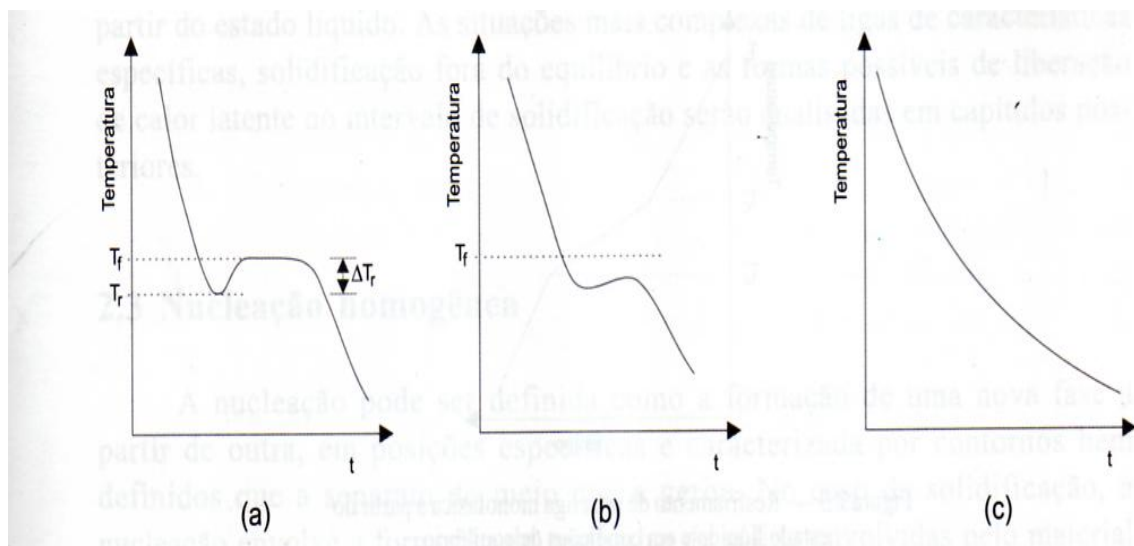
2.5 CURVA DE RESFRIAMENTO

Na maioria das situações práticas de solidificação, para que o líquido possa tomar completamente a forma geométrica que se pretende dar ao sólido, é necessário que o vazamento desse líquido ocorra a uma temperatura superior àquela que dá início à transformação líquido-sólido, para que o líquido possa escoar e preencher completamente os

contornos geométricos da peça. A diferença entre essa temperatura de vazamento, e a temperatura de transformação denomina-se superaquecimento.

A Figura 5 a) apresenta alguns casos típicos de curvas de resfriamento a partir da monitoração da temperatura de uma certa massa de líquido. O caso a) mostra que, quando o líquido atinge a temperatura T_R , esse se encontra super-resfriado, mas, uma vez iniciada a transformação em sólido, a temperatura do líquido remanescente atinge rapidamente a temperatura de fusão em função do calor latente que é liberado. Quando a quantidade de líquido analisada for muito pequena, o calor latente liberado pode não ser suficiente para conduzir a temperatura de volta ao ponto de fusão, e a curva de resfriamento teria o aspecto mostrado na Figura 5 b) .Alguns materiais não formam um sólido cristalino, mas se solidificam na forma de um sólido amorfo. Esses sólidos apresentam uma estrutura similar à de um líquido super-resfriado, e, como não ocorre uma mudança na ordenação atômica, o calor latente não é liberado, e a curva de resfriamento correspondente assemelha-se à apresentada na Figura 5 c). (GARCIA,2001).

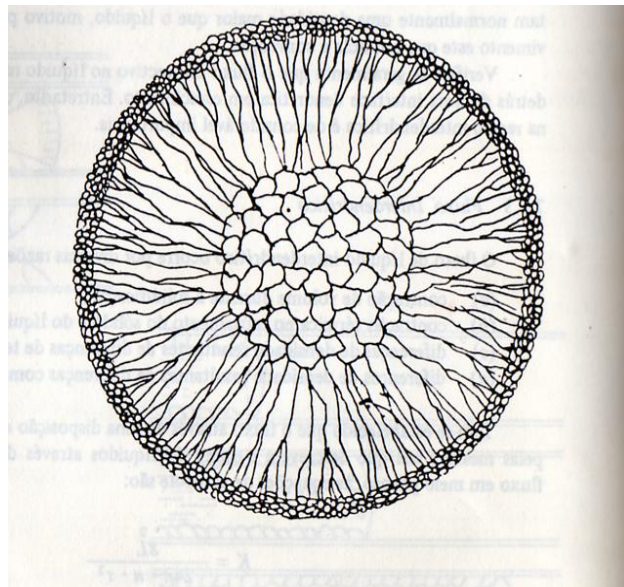
Figura 5 – Casos típicos de curvas de resfriamento: (a) elemento puro com super-resfriamento; (b) mesma situação anterior sem retorno ao ponto de fusão; (c) Sólido amorfo.



2.6 MACROESTRUTURA DE FUNDIÇÃO

Segundo Campos filho e Davies (1978), as peças fundidas podem apresentar três zonas distintas em sua macroestrutura, como se vê na figura 6, quais sejam:

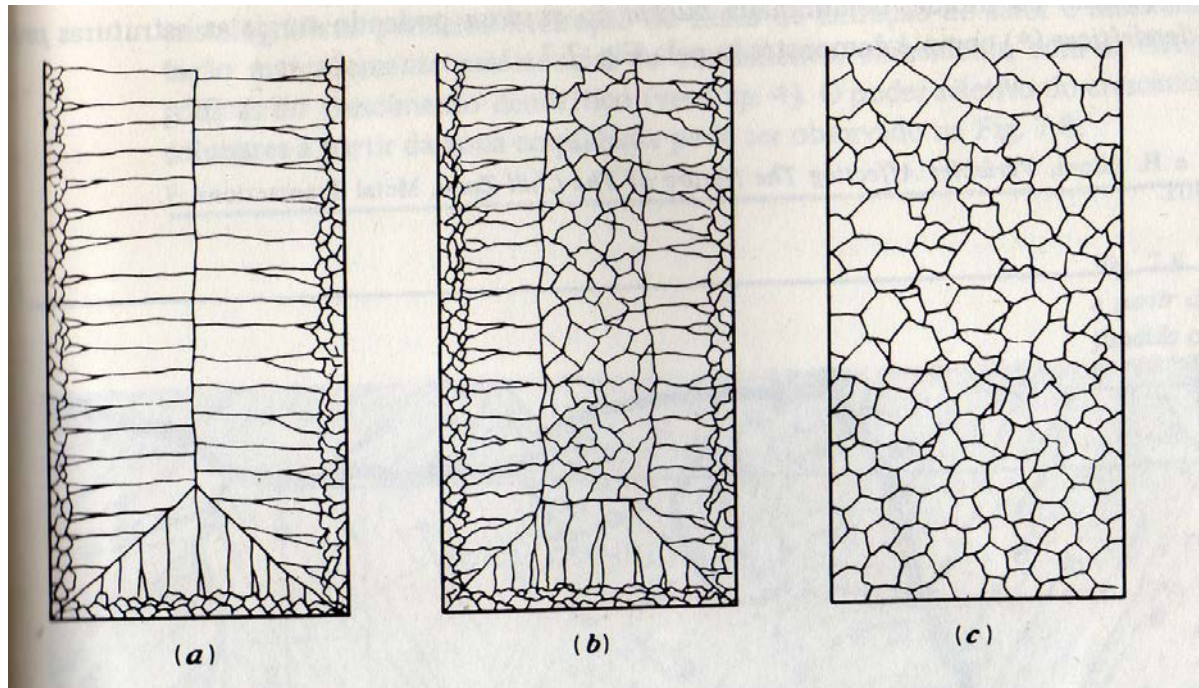
Figura 6 – representação esquemática das zonas estruturais da macroestrutura de fundição (seção transversal de uma peça cilíndrica)



Fonte: (Campos filho; Davies, 1978)

- Zona coquilhada, que forma uma camada periférica de pequenos grãos equiaxiais, isto é, com orientação cristalográfica aleatória;
- Zona colunar, formada por grãos alongados que se alinham paralelamente à direção do fluxo de calor;
- Zona equiaxial central, formada por grãos equiaxiais de orientação cristalográfica aleatória. Como se vê na figura 7, através da variação dos diferentes parâmetros do processo de solidificação, a macroestrutura poderá apresentar uma, ou mais, das zonas acima descritas. Para se entender esse fato, torna-se necessário o conhecimento da origem e dos mecanismos de formação das três diferentes zonas de macroestrutura.

Figura 7 – possíveis variações na macroestrutura de uma mesma peça (seção longitudinal), em função das condições de solidificação: (a) ausência de zona equiaxial central; (b) presença das três zonas; (c) ausência das zonas coquilhadas e colunar



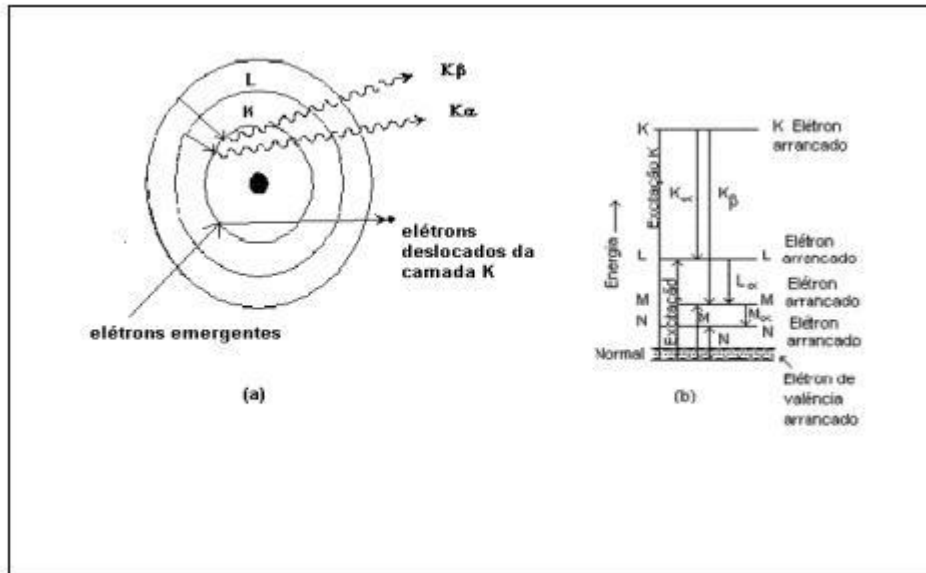
Fonte: (Campos filho; Davies, 1978)

2.7 EDS

A microanálise eletrônica consiste na medida de raios-X característicos emitidos de uma região microscópica da amostra bombardeada por um feixe de elétrons. As linhas de raios-X característicos são específicas do número atômico da amostra e, o seu comprimento de onda ou sua energia podem ser utilizados para identificar o elemento que está emitindo a radiação.

Espectros de raios-X podem ser obtidos para todos os elementos da tabela periódica, com exceção do hidrogênio. Entretanto, a emissão dos primeiros dez elementos de baixo número atômico consiste de bandas na região de baixa energia onde as perdas por absorção na amostra são grandes. Assim, elementos como carbono, oxigênio e nitrogênio são frequentemente determinados por estequiometria (Figura 8).

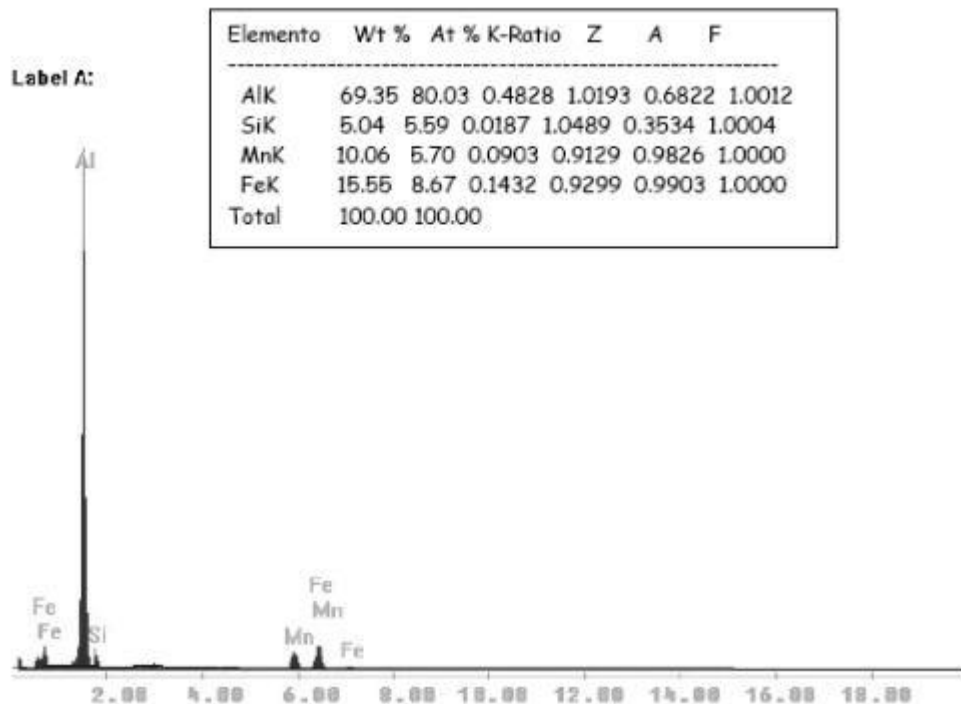
Figura 8 – Esquema ilustrativo da emissão de raios-x



FONTE: (DEDAVID;GOMES;MACHADO; 2007).

Dois tipos de detectores que captam raios-X característicos podem ser utilizados: por dispersão de energia (EDS) (Figura 9) ou por dispersão em comprimento de onda (WDS).

Figura 9 – Espectro obtido por microanálise de raio-x característicos por EDS com tabela de discriminação dos elementos analisados.

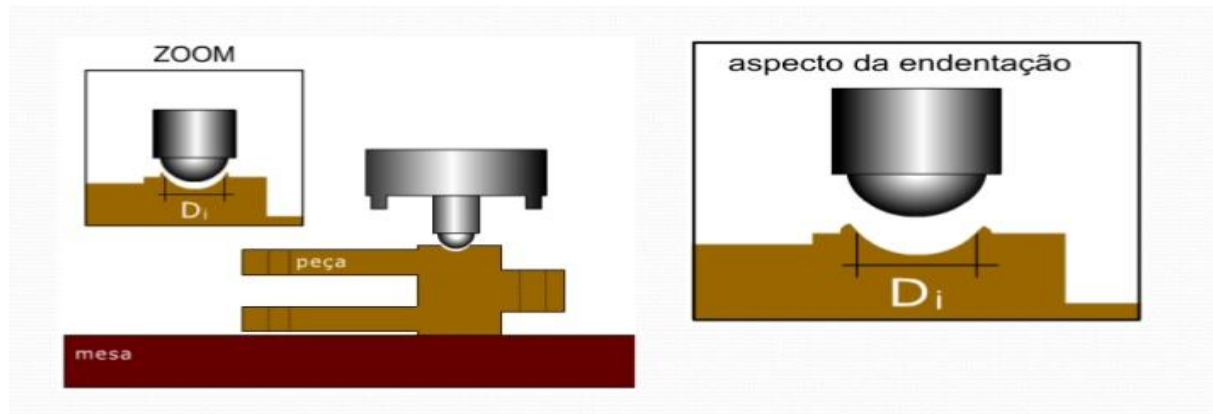


A interpretação dos espectros é facilitada por uma base de dados que contém, para cada elemento, as energias e a intensidade das raia que as produziu. É possível localizar, para cada energia do espectro, a lista dos elementos que possuem uma raia neste domínio energético. E, também para cada elemento, fazer aparecer sobre o espectro um diagrama em barras representando a posição e as energias das raia deste elemento (DEDAVID;GOMES;MACHADO; 2007).

2.8 ENSAIO DE DUREZA

O ensaio de dureza Brinell consiste em endentar o material com uma esfera de aço endurecido ou metal duro com 10 mm de diâmetro com uma carga de 3000 Kg (figura 10). Para materiais mais moles, a carga pode ser reduzida para 1500 Kg ou 500 Kg para reduzir a endentação excessiva.

Figura 10– endentação do material com uma esfera de aço



Fonte: (PARCEIROS; 2012).

A norma brasileira para realização do ensaio é a NBR 6394 e a norma internacional de maior utilização no país é a ASTM E10-93.

Comparada a outros métodos, a amostra do teste Brinell provoca a endentação mais profunda e mais larga. Com isto a dureza medida no teste abrange uma porção maior de material, resultando numa média de medição mais precisa, tendo em conta possíveis estruturas policristalinas e heterogeneidades do material.

Este método é o melhor para medição da macrodureza de um material, especialmente para materiais com estruturas heterogêneas (PARCEIROS; 2012)

3 MATERIAS E MÉTODOS

3.1 FUNDIÇÃO E VAZAMENTO

- Lingotes da liga Al-1%Si;
- Serra de fita;
- Cadinhos;
- Forno;
- Molde metálico;
- Molde;
- Areia verde;
- Termopar.

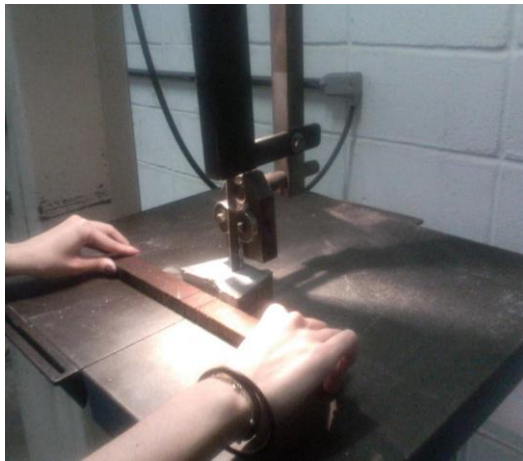
Inicialmente foi preparado o molde de areia usando areia verde, nesta foi adicionado água, aglomerante e aditivos e compactada para que tomasse a forma, e então esperou-se para a secagem formando o molde (figura 11).

Figura 11 – Fabricação do molde de areia



Os lingotes da liga Al-1%Si foram cortados em pedaços menores (Figura 12a) para que coubesse a quantidade necessária nos cadinhos, como mostra a Figura 12b), então estes foram levados ao forno a uma temperatura por volta de 700°C por um tempo suficiente para fundição total do material.

Figura 12 – a) corte do material b) cadinho com a liga a ser fundida



(a)



(b)

Os moldes foram posicionados para a vazão do líquido e em ambos foram colocados os termopares (Figura 13), no centro do molde, para obtenção dos dados de resfriamento.

Figura 13 – a) Molde metálico com termopar b) Molde de areia com termopar



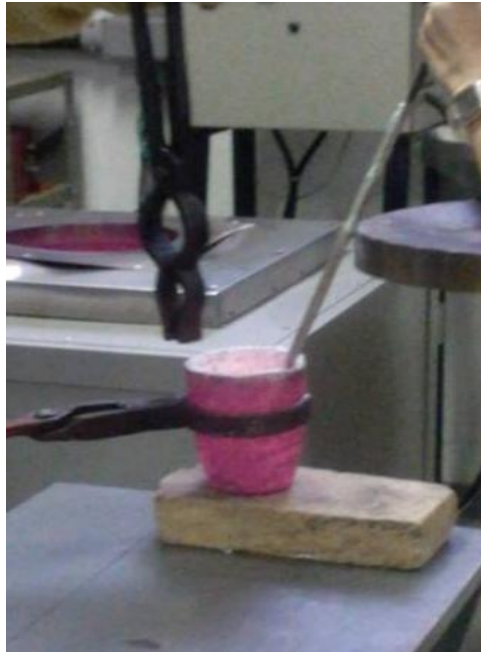
(a)



(b)

Após a liga se liquefazer por completo, foi retirada a escória e o líquido foi vazado nos moldes (Figura 14).

Figura 14 – Retirada da escória



As temperaturas durante o resfriamento foram armazenadas (figura15) até a solidificação do material. Após o resfriamento o molde de areia é destruído para retirada da peça.

Figura 15 – Aparelho para registro da temperatura durante o resfriamento



3.2 CURVA DE RESFRIAMENTO

- 3.2 Dados registrados
- Software gráfico Origin

As curvas de resfriamento, temperatura x tempo, dos dois tipos de moldes foram obtidos através dos dados medidos pelo termopar. Foi traçado a primeira derivada de ambas as curvas para facilitar na determinação das temperaturas de início e término da solidificação, conhecidas como temperatura liquidus e solidus, respectivamente.

3.3 MACROGRAFIA

- Lixas (100, 220, 320, 400 e 600);
- Ataque (45 ml de HCl (conc), 15 ml de HNO₃(conc), 15 ml de HF (48%) e 25 ml de H₂O).
- Microscópio Olympus;

As peças de ambos os tipos de moldes foram cortados na transversal e estes foram passados pelas lixas de malha 100, 220, 320, 400 e 600. Após o lixamento foi feito o ataque com 45 ml de HCl (conc.), 15 ml de HNO₃(conc), 15 ml de HF (48%) e 25 ml de H₂O, durante 15 segundos. O material foi observado através do microscópio simples (Figura 16) com um aumento de 6.7x até 45x e fotografado.

Figura 16 – Microscópio simples utilizado para macrografia



3.4 MICROGRAFIA

- Embutidora Arotec Pre30Mi;
- Baquelite;
- Lixas (100, 220, 320, 400, 600, 1000, 1200 e 1500);
- Alumina 0,1 μm ;
- Sílica 0,05 μm ;
- Máquina para polimento Arotec;
- Disco de polimento;
- Ataque (2 ml HF(conc.), 3 ml HCl(conc.), 5 ml HNO₃(conc.) e 190 ml H₂O);
- Microscópio Olympus;

Pedaços menores foram cortados de forma a poder se observar os grãos nas direções transversais e longitudinais. As peças foram embutidas na embutidora (Figura17).

Figura 17 - Embutidora



As peças embutidas foram passadas pelas lixas de malha 100, 220, 320, 400, 600, 1000, 1200 e 1500 e polidas com alumina 0,1 μm e Sílica 0,05 μm em um disco de polimento na máquina Arotec (Figura 18).

Figura 18 – Politriz



Após o polimento foi feito o ataque com 2 ml HF(conc.), 3 ml HCl(conc.), 5 ml HNO₃(conc.) e 190 ml H₂O por esfregamento com algodão durante 20 segundos. E pôde ser analisado com um aumento de 50x, 100x, 200x, 500x, 1000x em microscópio óptico (Figura 19) e fotografado.

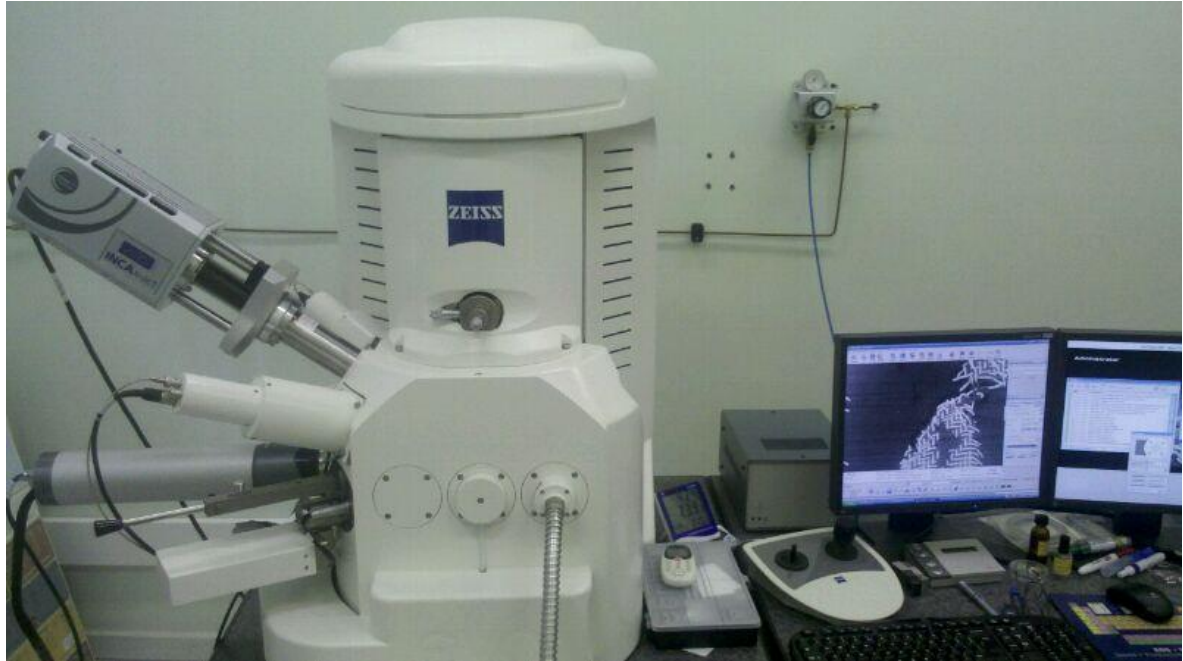
Figura 19 – Microscópio óptico utilizado para Micrografia



3.5 EDS

Com uma peça na longitudinal e outra na transversal fez-se o embutimento, lixou as peças nas malhas 100, 220, 320, 400, 600, 1000, 1200 e 1500 e polidas com alumina 0,1 μm e Sílica 0,05 μm em uma politriz. Após o polimento foi feito o ataque com 2 ml HF(conc.), 3 ml HCl(conc.), 5 ml HNO₃(conc.) e 190 ml H₂O durante 20 segundos. Em seguida fez-se o desembutimento das peças. Colocou-se a peça no MEV (Figura 20). Fez-se vácuo dentro da camara e insidiu-se o feixe de elétron na amostra e foi usado o receptor de energia dispersiva (EDS) para captar os raios-x produzidos pelo choque dos elétrons . Cada elemento presente na amostra produzirá um comprimento de raio-x diferente. Esses comprimentos são representados pelo aparelho como picos em uma curva.

Figura 20 – Microscópio eletrônico de varredura (MEV)



3.6 ENSAIO DE DUREZA BRINELL

- Durômetro para ensaio de dureza Brinell (Figura 21);

Figura 21 – Durômetro para o ensaio de dureza Brinell



No ensaio de dureza Brinell foram feitos vinte pontos nas peças de ambos os moldes, do centro até a borda para uma comparação de dureza por toda a peça.

Este método consiste em uma esfera de aço endurecido ou metal duro com 10 mm de diâmetro aplicando uma carga de 15,625 Kp.

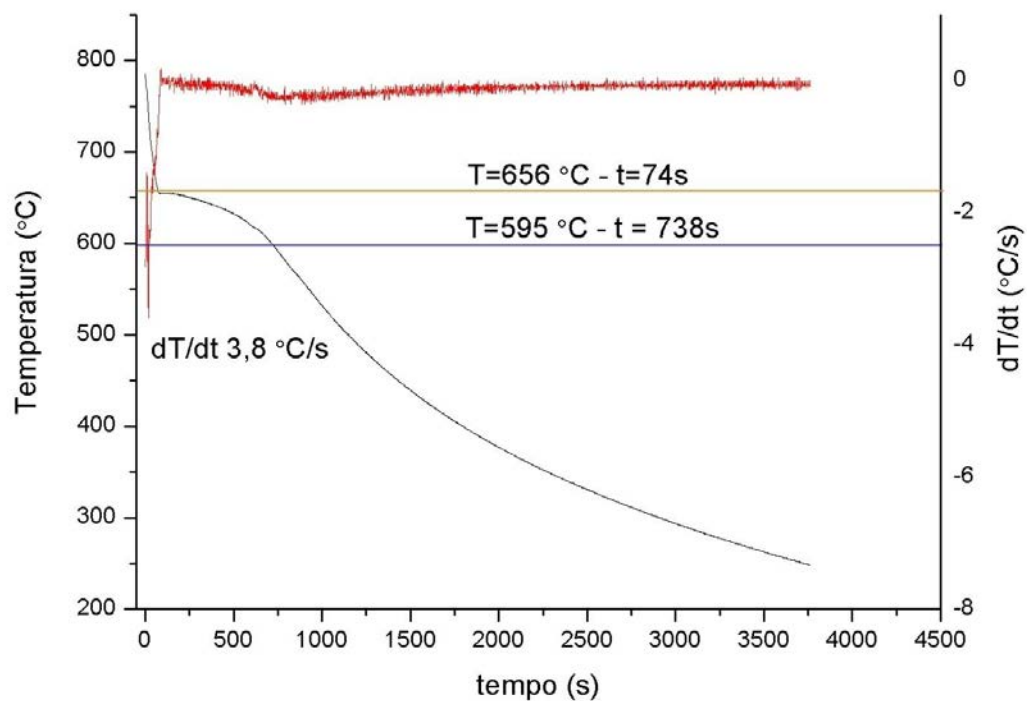
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CURVA DE RESFRIAMENTO

4.1.1 Molde de areia

Na Figura 22 temos a curva de resfriamento do molde de areia e sua taxa de resfriamento. A temperatura liquidus foi em torno de 656 °C no tempo de 74s. A temperatura solidus foi de 595 °C em torno de 738s. E a maior taxa de resfriamento é de 3,8 °C/s.

Figura 22 - curva de resfriamento do molde de areia e sua derivada

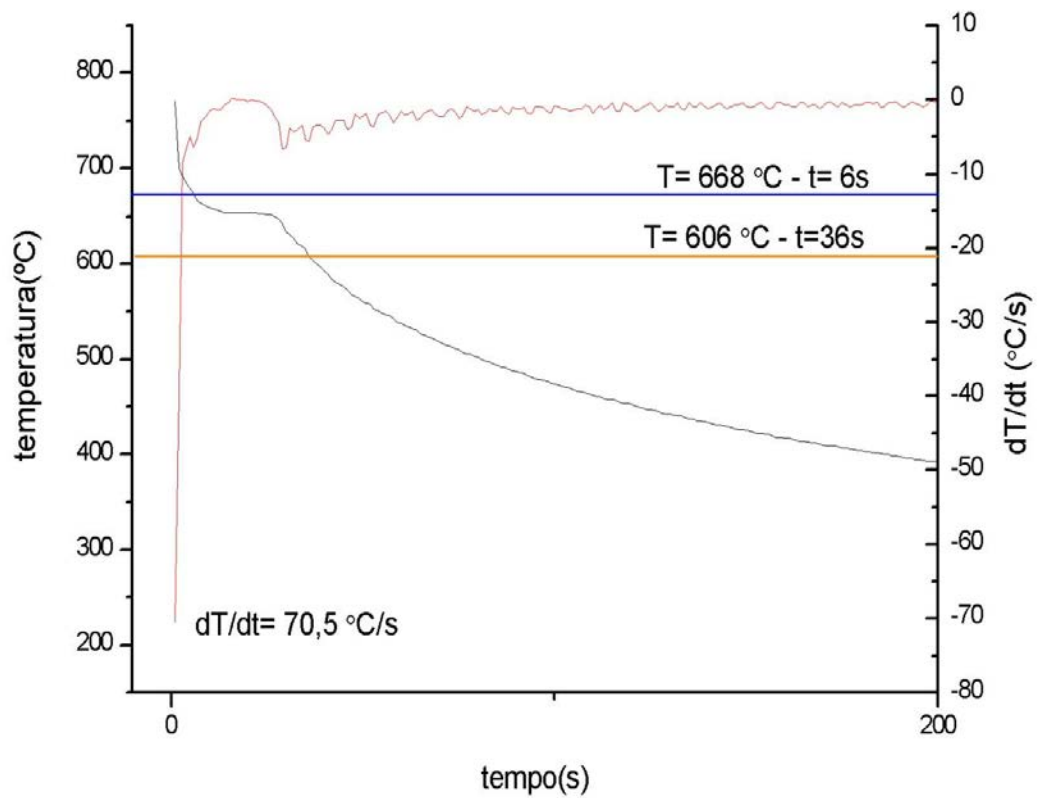


4.1.2 Molde de metal

No Figura 23 temos a curva de resfriamento do molde metálico e sua taxa de resfriamento. A temperatura liquidus onde começa a solidificação é de 668° C em 6s e a temperatura solidus onde tem o final da solidificação é de 606° C em 36s. Na temperatura de

653,55°C começa uma mudança de fase devido à liberação do calor latente em um tempo em torno de 20s. A maior taxa de resfriamento é de 70,5 °C /s.

Figura 23: curva de resfriamento do molde metálico e sua derivada



4.2 MACROGRAFIA

4.2.1 Molde de metal

Na figura 24 é observada a macrografia da peça fundida em molde metálico. Como podemos observar a estrutura do molde metálico contém grãos pequenos, pois apresenta um resfriamento rápido. E só há a presença da zona equiaxial, pois a zona colunar não aparece.

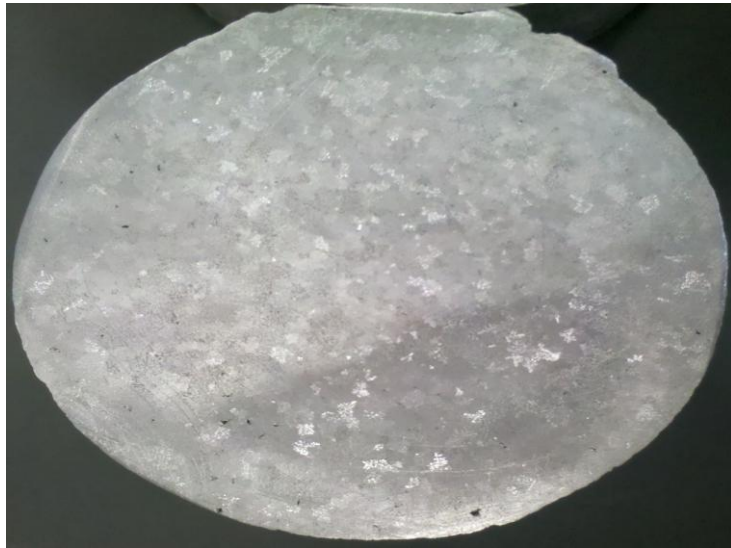
Figura 24 - macrografia da peça fundida em molde metálico



4.2.2 Molde de areia

Na figura 25 temos a macrografia da peça fundida em molde de areia. A peça apresenta grãos ligeiramente grandes devido ao seu resfriamento lento. E não contém zona colunar, apenas a zona equiaxial.

Figura 25 – macrografia da peça fundida em molde de areia



Comparando as peças fundidas em molde de metal e molde de areia verificamos uma grande diferença no tamanho de grão. Isso implica nas propriedades do material.

4.2.3 Alumínio puro

O resfriamento ocorre de fora para dentro e como podemos observar na figura 26 o alumínio puro apresenta uma granulação diferente do Al-1% Si. O alumínio puro apresenta a zona coquilhada, zona colunar e a zona central.

Figura 26 (a) peça circular fundida de alumínio puro



(a)

Figura 26 (b) peça retangular fundida de alumínio puro



(b)

4.3 MICROGRAFIA

4.3.1 Molde de areia

Como podemos observar na figura 27 (a) temos a microestrutura longitudinal da peça feita em molde de areia apresenta grãos relativamente grandes, mas também apresenta muitos poros devido ao seu resfriamento lento. A microestrutura mostra dendritas de alumínio com

silício nos espaços interdendríticos. Na figura 27 (b) temos a ampliação da morfologia do silício eutético .

Figura 27 – (a) Peça longitudinal com aumento de 50x em molde de areia (b) Peça longitudinal com aumento de 500x em molde de areia



(a)



(b)

Na figura 28 (a) temos a microestrutura transversal da peça feita em molde de areia. E na figura (b) a morfologia do silício eutético. A peça apresenta muitos poros o que dificulta o seu lixamento e polimento.

Figura 28 - (a) Peça transversal com aumento de 50x em molde de areia (b) Peça transversal com aumento de 500x em molde de areia



(a)

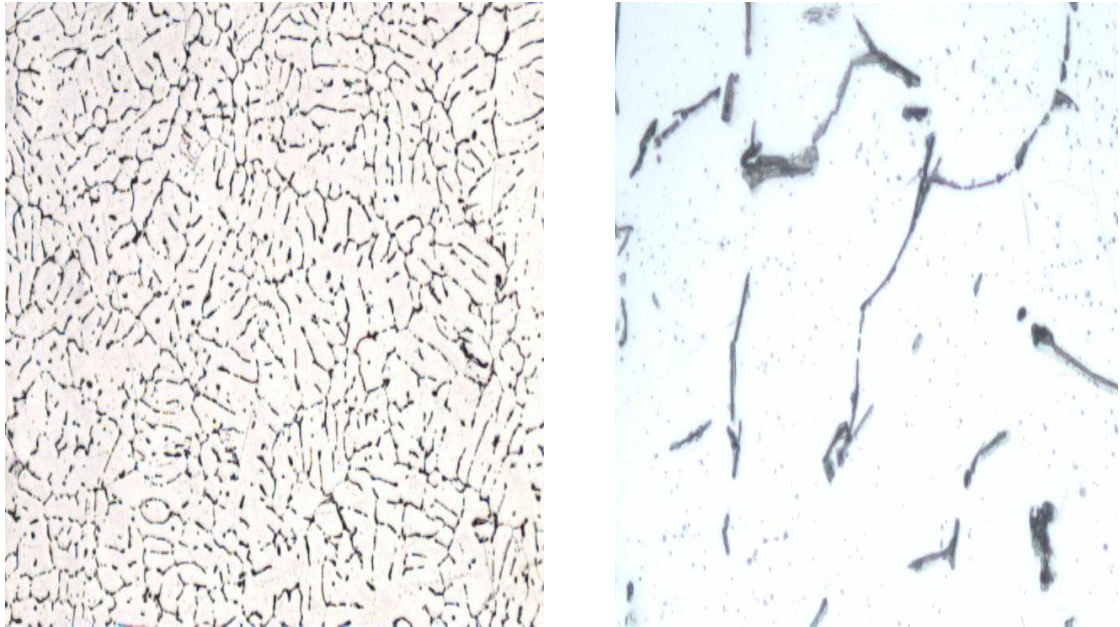


(b)

4.3.2 Molde de metal

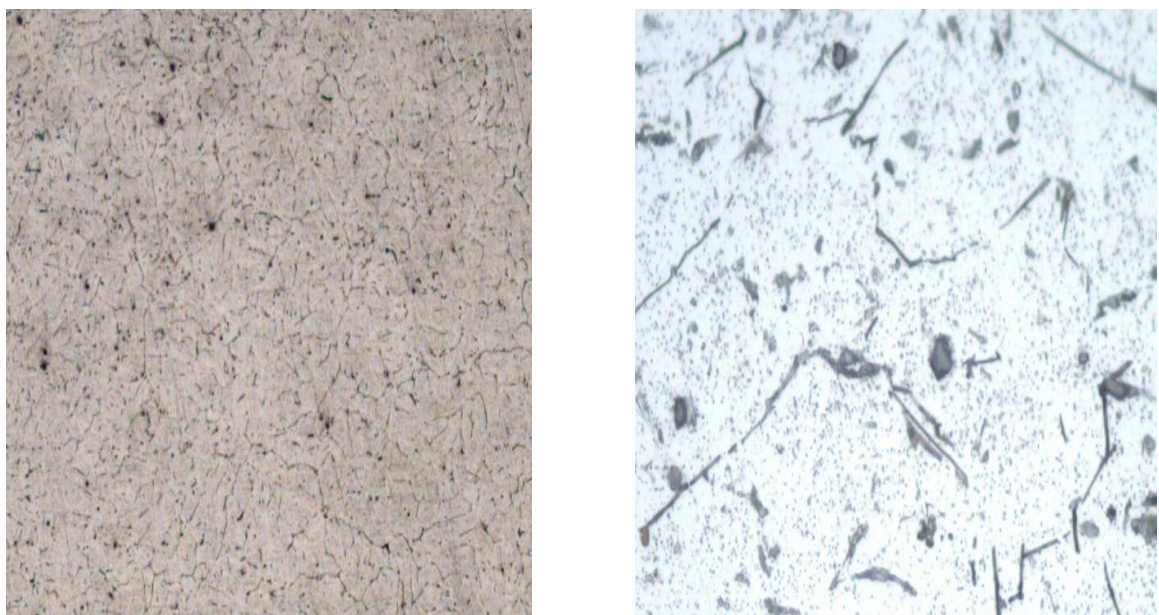
Pode-se observar na Figura 29 (a) a microestrutura longitudinal da peça feita em molde de metal que apresenta grãos pequenos e não apresenta muitos poros devido ao seu resfriamento rápido. A microestrutura mostra dendritas de alumínio com silício nos espaços interdendríticos. Na Figura 29 (b) temos a ampliação da morfologia do silício eutético.

Figura 29 – (a) Peça longitudinal com aumento de 50x em molde de metal b) Peça longitudinal com aumento de 500x em molde de metal



Na figura 30 (a) a microestrutura transversal da peça feita em molde de metal. E na Figura 30 (b) a morfologia do silício eutético. A peça apresenta poucos poros o que facilita o seu lixamento e polimento.

Figura 30 – (a) Peça transversal com aumento de 50x em molde de metal (b) Peça transversal com aumento de 500x em molde de metal



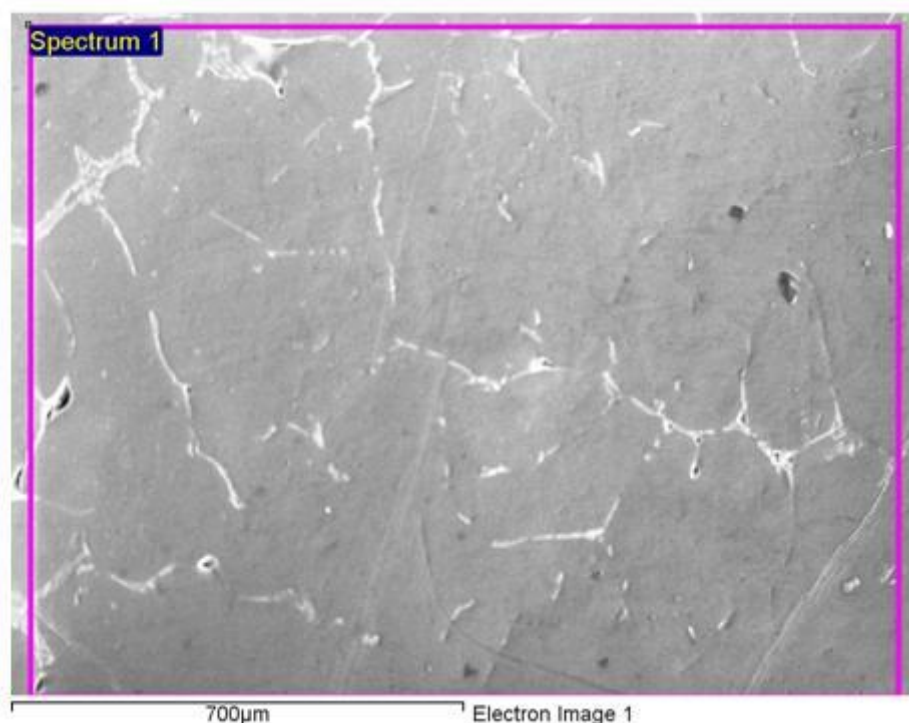
Fazendo uma comparação pode-se observar que a estrutura de molde de areia apresenta grãos maiores que o solidificado em molde de metal.

4.4 EDS

4.4.1 Molde de areia

Pode-se observar na figura 31 que a imagem no MEV nos mostra duas fases a de alumínio e a de silício em branco. O contorno de grão se apresenta em um tamanho relativamente grande devido ao seu resfriamento lento.

Figura 31 – Imagem no MEV da peça feita em molde de areia



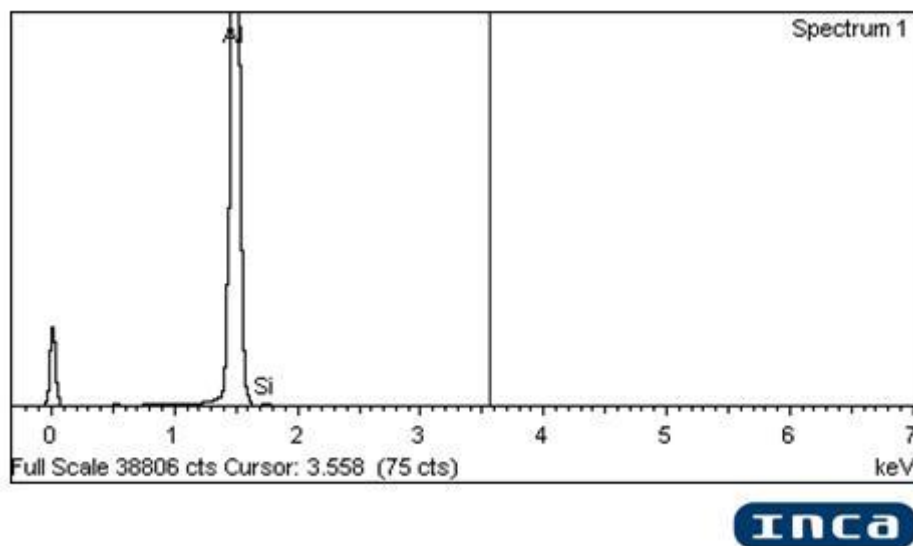
Na tabela 1 podemos observar os elementos presentes na amostra como o alumínio, o silício e o ferro. Como no molde de areia seu resfriamento é mais lento alguma impureza pode ter se difundido na superfície do material e por isso o ferro apareceu como um dos elementos.

Tabela 1 – Elementos presentes na amostra

Element	Weight%	Atomic%
Al K	98.49	98.68
Si K	1.24	1.19
Fe K	0.27	0.13
Totals	100.00	

Na Figura 32 o espectro que nos mostra os picos com os elementos presentes na amostra.

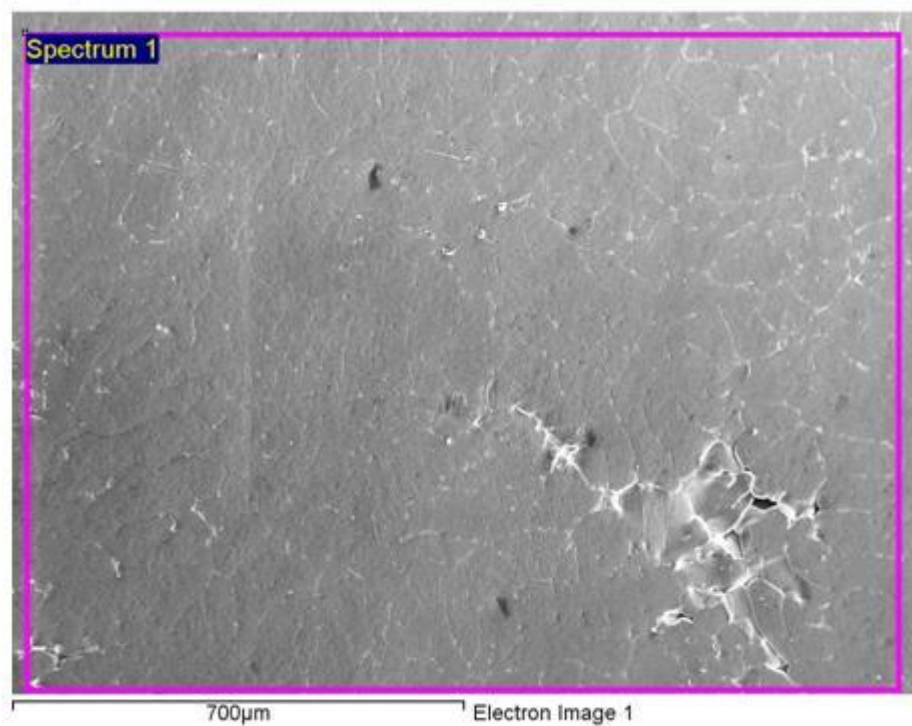
Figura 32 - Espectro obtido por microanálise de raio-x característicos por EDS



4.4.2 Molde de metal

Pode-se observar na figura 33 que a imagem no MEV nos mostra duas fases distintas a de alumínio e a fase eutética onde os contornos de grãos apresentam silício. Há a presença de pequenos contornos de grãos devido ao seu resfriamento rápido.

Figura 33 - Imagem no MEV da peça feita em molde de metal



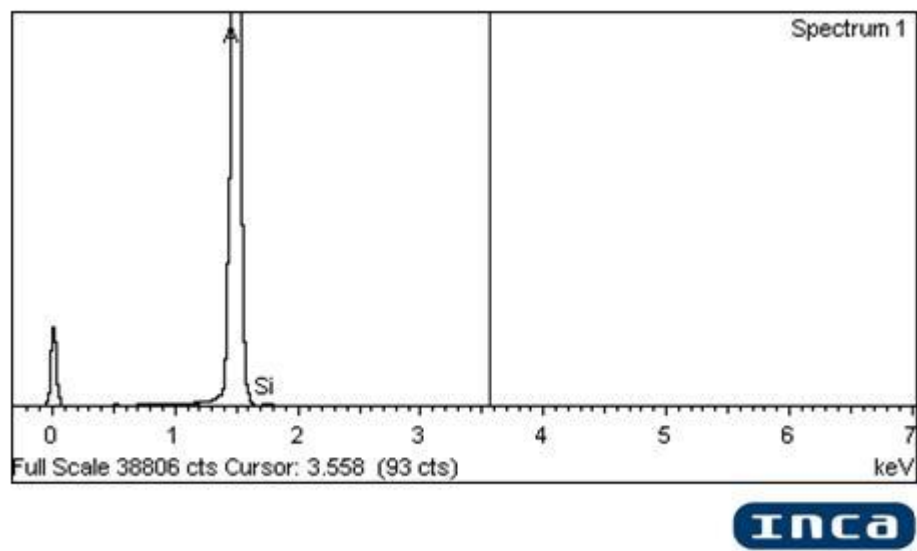
Na tabela 2 pode-se observar os elementos presentes na amostra como o alumínio e o silício. No caso da peça feita em molde de metal não teve nenhuma impureza na superfície do material.

Tabela 2 - Elementos presentes na amostra

Element	Weight%	Atomic%
Al K	98.93	98.97
Si K	1.07	1.03
Totals	100.00	

Na Figura 34 temos o espectro com os elementos presentes na amostra.

Figura 34 - Espectro obtido por microanálise de raio-x característicos por EDS



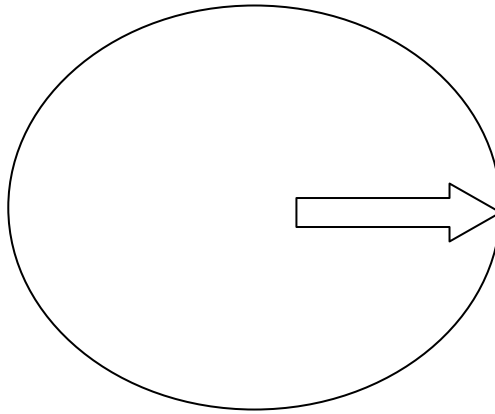
4.5 ENSAIO DE DUREZA BRINELL

Foi realizado o ensaio de dureza Brinell e os dados obtidos estão na tabela 3. Este ensaio teve por objetivo comparar os valores de dureza do material fundido em molde de areia e em molde de metal. Como podemos observar a peça feita em molde de metal apresenta uma maior dureza com uma média de HB de 39,35 devido ao tamanho dos grãos que são pequenos e assim possuem maior número de contornos de grãos. Esse tamanho de grão se deve devido ao seu resfriamento rápido diferentemente da peça em molde de areia que tem um resfriamento lento e por isso apresenta grãos maiores com uma média de HB de 36,42. A medida que foi feita da borda para centro como esquematizada na Figura 35 nos mostra que a dureza também varia na mesma peça só que em regiões diferentes. O resfriamento da peça ocorre da borda para o centro, então a borda da peça apresenta uma maior dureza. Mas podemos observar que essa variação não foi tão significativa.

Tabela 3- Tabela de dureza Brinell com a medida do centro para a borda

	AREIA			METAL		
	D_1	D_2	HB	D_1	D_2	HB
1	0,86	0,87	25,50	0,74	0,75	35,70
2	0,80	0,76	31,90	0,74	0,69	37,70
3	0,74	0,74	32,80	0,72	0,76	36,60
4	0,87	0,84	26,10	0,77	0,65	41,00
5	0,76	0,74	34,60	0,78	0,69	37,40
6	0,75	0,76	35,50	0,75	0,66	38,70
7	0,75	0,75	34,60	0,75	0,69	35,50
8	0,69	0,68	45,50	0,70	0,75	37,80
9	0,82	0,75	31,10	0,73	0,66	36,50
10	0,80	0,67	35,50	0,75	0,73	39,60
11	0,75	0,68	41,00	0,73	0,73	38,70
12	0,80	0,70	34,60	0,73	0,62	34,70
13	0,85	0,84	41,00	0,71	0,69	38,10
14	0,70	0,67	36,50	0,68	0,85	41,00
15	0,75	0,70	46,30	0,63	0,64	42,20
16	0,70	0,60	50,30	0,70	0,62	46,30
17	0,70	0,50	58,30	0,63	0,65	47,70
18	0,80	0,85	28,10	0,70	0,65	42,20
19	0,79	0,78	31,10	0,82	0,67	39,80
20	0,85	0,82	28,10	0,73	0,67	39,80
Média			36,42			39,35

Figura 35 – Esquema da medição feita na peça realizada do centro para a borda



5 CONCLUSÃO

Concluimos que a taxa de resfriamento e elementos de liga influenciam na microestrutura final da peça e que taxas mais baixas propiciam crescimento maior do grão. As peças fundidas em moldes de areia apresentam menores taxas de resfriamento do que as que são feitas em moldes metálicos. E devido ao resfriamento rápido e menores tamanhos de grãos, as peças feitas em moldes metálicos apresentam maior dureza. E numa mesma peça, a dureza aumenta do centro para a borda. Portanto, concluimos que o molde pode influenciar nas propriedades do material e de acordo com o objetivo que se deseja aplicar pode-se usar o molde de areia ou o de metal.

REFERÊNCIAS

CALLISTER Jr, WILLIAM D. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. 5. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 246 p.

CALLISTER Jr, WILLIAM D. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. 7. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 280 p.

CAMPOS FILHO, M.P.; DAVIES, G.J. **Solidificação e fundição de metais e suas ligas**. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos, 1978. 129 p.

DEDAVID, B.A.; GOMES, C.I.; MACHADO, G. **Microscopia Eletrônica de Varredura: Aplicações e preparação de amostras**. 1. Ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. 19 p. Disponível em : <<http://www.pucrs.br/edipucrs/online/microscopia.pdf>>. Acesso em : 27 set. 2013.

GARCIA, A. **Solidificação: Fundamentos e aplicações**. 1.Ed. Campinas,SP: Editora da UNICAMP, 2007. 33 p.

PARCEIROS: Escola profissionalizante. **Ensaio de dureza**. 1. Ed. 2012 21 p. Disponível em:< <http://www.slideshare.net/alexleal3720/aula-4-ensaios-de-dureza>>. Acesso em: 7 out. 2013.

TRINDADE, J. A. P.F. **Silício**. 2002. Disponível em:< <http://nautilus.fis.uc.pt/st2.5/scenes-p/elem/e01420.html>>. Acesso em: 18 ago. 2013.

ZANGRANDI, A. **Alumínio e suas ligas: Fundamentos metalúrgicos e tecnológicos**. 1.Ed. Lorena: Instituto Santa Teresa, 2008. 16-17 p.