

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Rafael Mouco de Lucca Braga

ANÁLISE METALOGRÁFICA DO ALUMÍNIO SOB DIFERENTES FORMAS DE
SOLIDIFICAÇÃO PELO PROCESSO DE FUNDIÇÃO

BELO HORIZONTE

2015

RAFAEL MOUCO DE LUCCA BRAGA

ANÁLISE METALOGRÁFICA DO ALUMÍNIO SOB DIFERENTES FORMAS DE
SOLIDIFICAÇÃO PELO PROCESSO DE FUNDIÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: João Bosco dos Santos

BELO HORIZONTE

2015

RAFAEL MOUCO DE LUCCA BRAGA

ANÁLISE METALOGRÁFICA DO ALUMÍNIO SOB DIFERENTES FORMAS DE
SOLIDIFICAÇÃO PELO PROCESSO DE FUNDIÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Prof. João Bosco dos Santos – Orientador

Profa. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Prof. Cláudio Turani Vaz

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus familiares pela confiança dedicada, a Deus e a todos os envolvidos direta e indiretamente com o trabalho.

Agradeço ao Prof. João Bosco dos Santos, pela dedicação e paciência ímpar durante o trabalho e pelo conhecimento disponibilizado.

E por fim, agradeço a Profa. Elaine Carballo S. Corrêa pela atenção e disponibilização total do Laboratório de Metalografia com dicas pontuais.

RESUMO

Este trabalho teve como finalidade investigar a influência que os diferentes modos de resfriamento exercem, durante a solidificação no processo de fundição, na microestrutura de ligas de alumínio; estudar o efeito da utilização do titânio como refinador de grão, e as prováveis consequências acarretadas para as propriedades mecânicas do fundido. As amostras foram fundidas em três tipos de moldes diferentes: molde metálico, molde de areia verde e molde de areia química. Todas as amostras foram analisadas sem a aplicação de tratamentos térmicos. Revelou-se que as amostras fundidas em molde metálico e com titânio como refinador foram as que apresentaram uma microestrutura mais refinada, o que permite a obtenção de melhores propriedades mecânicas. Uma outra observação foi a menor presença de poros nas amostras solidificadas em molde metálico. Estes resultados experimentais comprovam que uma maior velocidade de solidificação proporciona uma estrutura mais refinada e, possivelmente, um melhor comportamento mecânico.

Palavras-chave: Solidificação. Fundição. Alumínio. Moldes.

ABSTRACT

The current exercise was intended to describe the influence that different cooling modes of influence, during solidification in the casting process, the microstructure of aluminum alloys; study the effect of using titanium as a grain refiner; and brought about the likely consequences for the mechanical properties of the material. Samples were cast into three different types of molds: metal mold, green sand mold and sand mold chemical. All samples were analyzed without the application of heat treatments. It was revealed that the samples cast in metal mold and titanium as a refiner showed the a more refined microstructure which, subjectively, allows to obtain better mechanical properties. Another observation was the smallest presence of pores in the solidified samples in metal mold. These experimental results show that a higher solidification rate provides a finer structure and possibly a better mechanical behavior.

Keywords: Solidification. Foundry. Aluminum. Mold.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma fundição

Figura 2 – Divisões dos tipos de fundição

Figura 3 – Processo de nucleação e crescimento

Figura 4 – Zona coquilhada (C), colunar (B) e equiaxial (E)

Figura 5 – Macroestrutura de lingote de alumínio sem (A) e com (B) adição de inoculante titânio-boro

Figura 6 – Características da superfície na utilização do microscópio

Figura 7 – Diagrama de fases Alumínio-Titânio

Figura 8 – Desenho do modelo utilizado para confecção dos moldes

Figura 9 – Desenho das extremidades do molde

Figura 10 – Moldes metálico (A), em areia verde (B) e areia química (C)

Figura 11 – Cavaco de titânio

Figura 12 – Fornos utilizados

Figura 13 – Pirômetro na temperatura ambiente (A) e nas temperaturas de vazamento de cada liga (B) e (C)

Figura 14 – Amostras em processo de solidificação em seus moldes, sendo da esquerda para direita, respectivamente os moldes: A, B e C

Figura 15 – Espectrômetro de emissão ótica

Figura 16 – Amostras utilizadas na análise da composição química

Figura 17 – Equipamentos utilizados para corte e fresagem das amostras

Figura 18 – Fluxograma das etapas de preparação das amostras

Figura 19 – Amostra após a fresagem e sendo lixada

Figura 20 – Seção retirada para análise metalográfica

Figura 21 – Amostra cortada, embutida e sendo lixada

Figura 22 – Amostras A1 e A2 da Macrografia

Figura 23 – Amostras B1 e B2 da Macrografia

Figura 24 – Amostras C1 e C2 da Macrografia

Figura 25 – Amostras A1 com ampliação de 100 vezes

Figura 26 – Amostra A1 com ampliação de 200 vezes

Figura 27 – Amostra A1 com ampliação de 400 vezes

Figura 28 – Amostras A2 com ampliação de 100 vezes

Figura 29 – Amostra A2 com ampliação de 200 vezes

Figura 30 – Amostra A2 com ampliação de 400 vezes

Figura 31 – Amostras B1 com ampliação de 100 vezes

Figura 32 – Amostra B1 com ampliação de 200 vezes

Figura 33 – Amostra B1 com ampliação de 400 vezes

Figura 34 – Amostras B2 com ampliação de 100 vezes

Figura 35 – Amostra B2 com ampliação de 200 vezes

Figura 36 – Amostra B2 com ampliação de 400 vezes

Figura 37 – Amostras C1 com ampliação de 100 vezes

Figura 38 – Amostra C1 com ampliação de 200 vezes

Figura 39 – Amostra C1 com ampliação de 400 vezes

Figura 40 – Amostras C2 com ampliação de 100 vezes

Figura 41 – Amostra C2 com ampliação de 200 vezes

Figura 42 – Amostra C2 com ampliação de 400 vezes

Figura 43 – MEV com ampliação de 100 vezes da amostra A1

Figura 44 – Composição química de um ponto presente no contorno de grão

Figura 45 – Composição química localizada dentro do contorno de grão

Figura 46 – MEV com ampliação de 100 vezes da amostra A2

Figura 47 – Composição química de um ponto presente no contorno de grão

Figura 48 – Composição química localizada dentro do contorno de grão

Figura 49 – MEV com ampliação de 100 vezes da amostra B1

Figura 50 – Composição química de um ponto presente no contorno de grão

Figura 51 – Composição química localizada dentro do contorno de grão

Figura 52 – MEV com ampliação de 100 vezes da amostra B2

Figura 53 – Composição química de um ponto presente no contorno de grão

Figura 54 – Composição química localizada dentro do contorno de grão

Figura 55 – MEV com ampliação de 100 vezes da amostra C1

Figura 56 – Composição química de um ponto presente no contorno de grão

Figura 57 – Composição química localizada dentro do contorno de grão

Figura 58 – MEV com ampliação de 100 vezes da amostra C2

Figura 59 – Composição química de um ponto presente no contorno de grão

Figura 60 – Composição química localizada dentro do contorno de grão

Figura 61 – Valores obtidos com a Microdureza

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Elementos da liga de Alumínio

Tabela 2 – Inoculantes para refino de grão e respectivas eficiências

Tabela 3 – Detalhamento da denominação feita para as amostras

Tabela 4 – Análise química da liga de Alumínio

Tabela 5 – Análise química da liga de Alumínio e Titânio com 0,18%

Tabela 6 – Elementos presentes no contorno e interior de grão de cada amostra por meio do MEV e EDS

Tabela 7 – Valores da Microdureza Vickers das amostras (HV)

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Considerações Iniciais	13
1.2 Objetivo Geral	13
1.3 Objetivos Específicos	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 ENGENHARIA DE MATERIAIS	14
2.2 FUNDIÇÃO	14
2.2.1 Processo e Tipos de Fundição	15
2.2.2 Solidificação	17
2.2.3 Nucleação e Zonas (Coquilhada, Colunar e Equiaxial).....	19
2.3 ALUMÍNIO	21
2.3.1 Ligas de Alumínio	22
2.3.2 Refinadores de Grão	24
2.4 METALOGRAFIA.....	25
2.4.1 Análises Metalográficas	25
2.4.2 Diagrama de Fases.....	27
2.4.3 Microdureza.....	29
3. METODOLOGIA.....	30
3.1 Estruturação	30
3.2 Procedimentos	30
3.2.1 Fundição	30
3.2.2 Composição Química	35
3.2.3 Preparações das Amostras e Metalografia.....	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
4.1 Análise Química	40

4.2 Macrografia	41
4.3 Micrografia	42
4.4 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	51
4.5 Microdureza.....	61
4.5 Porosidade	63
5. CONCLUSÕES	64
6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Vive-se um crescente avanço em ligas metálicas com elevadas propriedades e o presente trabalho vem ao encontro desse desenvolvimento para analisar as mudanças nas propriedades que a adição de titânio como inoculante produz em uma liga de alumínio, e também como essa liga solidifica em distintos moldes.

O alumínio puro, entre diversos fatores, é pouco utilizado devido à sua baixa moldabilidade, baixa resistência mecânica, e sua ductilidade, apesar de que nessa forma pura o alumínio apresenta uma boa condutividade elétrica e bom acabamento. Por esse motivo a adição de elementos de liga é bastante utilizada e permite uma mudança nas características do fundido e propriedades mecânicas (BRADASCHIA, 1989).

Em se tratar do ramo da fundição, tem-se estudos provando que as ligas de alumínio são as mais versáteis dentre as ligas empregadas (FUOCO; MOREIRA, 2015)

1.2 Objetivo Geral

Estudar a solidificação do alumínio sob diferentes frentes de solidificação.

1.3 Objetivos Específicos

Avaliar como os modos de solidificação influenciam nas estruturas e propriedades de uma liga. Nessa etapa a intenção é verificar como as estruturas de solidificação são formadas, pois cada molde tem suas propriedades e sua velocidade de solidificação.

Um outro fator que é discutido no trabalho se baseia em quais propriedades a adição do elemento titânio, como inoculante, acarreta na liga inicial (97% de alumínio). A intenção dessa etapa é comprovar que a utilização desse material realmente modifica as propriedades da liga, como tamanho de grãos (estrutura) e sua dureza (propriedade).

A partir desse ponto inicial, análises como macrografia, micrografia, MEV e microdureza são efetuadas e com essas verificam-se e comprovam-se as mudanças nas propriedades do material.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ENGENHARIA DE MATERIAIS

Classicamente o conceito de ciência dos materiais envolve a investigação das relações que existem entre as estruturas e as propriedades dos materiais, e com isso é idealizado que a engenharia dos materiais se baseia nessas relações de estrutura e propriedade e também no projeto de engenharia estrutural de um material para obter um conjunto predeterminado de propriedades (CALLISTER, 2006).

Essas definições feitas por Callister (2006) se explicam, pois a estrutura de um material se refere ao arranjo dos seus componentes internos e que a propriedade consiste em uma particularidade desse dado material que está sendo analisado em termos do tipo e da sua resposta a um estímulo que lhe é imposto.

Outros dois componentes importantes são processamento e desempenho. Eles estão expressamente ligados aos componentes anteriores, onde a estrutura de um material depende de como ele é processado, e outrora o desempenho depende das propriedades do material (CALLISTER, 2006).

Saindo um pouco da área que trata dos componentes da engenharia de materiais para as classificações desses materiais, temos de forma simplificada um agrupamento para essas categorias, que são nominadas por metais, cerâmicas e polímeros, onde também pode-se colocar mais dois grupos importantes que são os compósitos, definidos pela combinação de dois ou mais diferentes materiais, e os semicondutores que são utilizados devido as suas características elétricas não usuais (CALLISTER, 2006).

Como o enfoque do trabalho é voltado para os materiais metálicos, apenas será abordada essa categoria, onde se tem que os metais são normalmente combinações de elementos metálicos e têm grande número de elétrons livres, que atribuem muitas propriedades para essa categoria de material. São extremamente bons condutores de calor e de eletricidade e uma outra propriedade importante é que não são transparentes à luz visível (CALLISTER, 2006).

2.2 FUNDIÇÃO

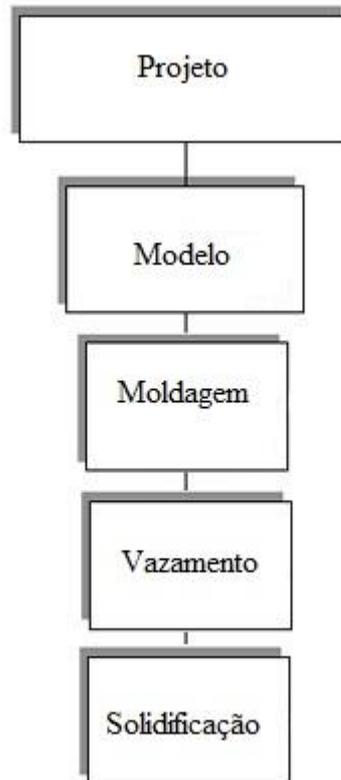
A definição de fundição varia de autor para autor, mas de uma forma resumida tem-se que fundição é composta por métodos, processos e técnicas para conformação de metais

fundidos, e para a solidificação controlada, com objetivo de obter a peça definida (BALDAM, 2014).

O produto final desse processo varia muito, e entre eles tem-se lingotes, tarugos, bases de máquinas, carcaças de máquinas, blocos de motores, rodas e polias, corpos de prova, entre outros (CHRISTIENSEN, 1978).

2.2.1 Processo e Tipos de Fundição

O processo de fundição, devido à sua complexidade, pode ser dividido em diversas etapas, e cada ramificação dessa possui diferentes importâncias onde o não comprometimento de uma dessas pode ocasionar na perda e/ou defeitos no resultado final. Uma das formas de divisão do processo de fabricação de uma peça fundida parte inicialmente do desenho técnico ou até mesmo de uma réplica da peça final. Após efetuada essa parte é realizado o projeto que define todo o desenvolvimento de fabricação na fundição. O próximo passo é o modelo, que pode possuir algumas alterações como as marcações de macho. Começa então a primeira etapa da moldagem, que possui diversas variedades, que serão discutidas posteriormente. Com o molde pronto, inclusive seus canais de enchimento, canais de saída de gases, macho, e todos os dispositivos necessários, tem-se o vazamento do metal líquido e a solidificação do metal. Tem-se então a peça acabada ou semiacabada, onde essa poderá passar por alguns processos ainda para chegar na peça final esperada, como usinagem. Na figura 1, apresenta-se um organograma dessas divisões (BALDAM, 2014).

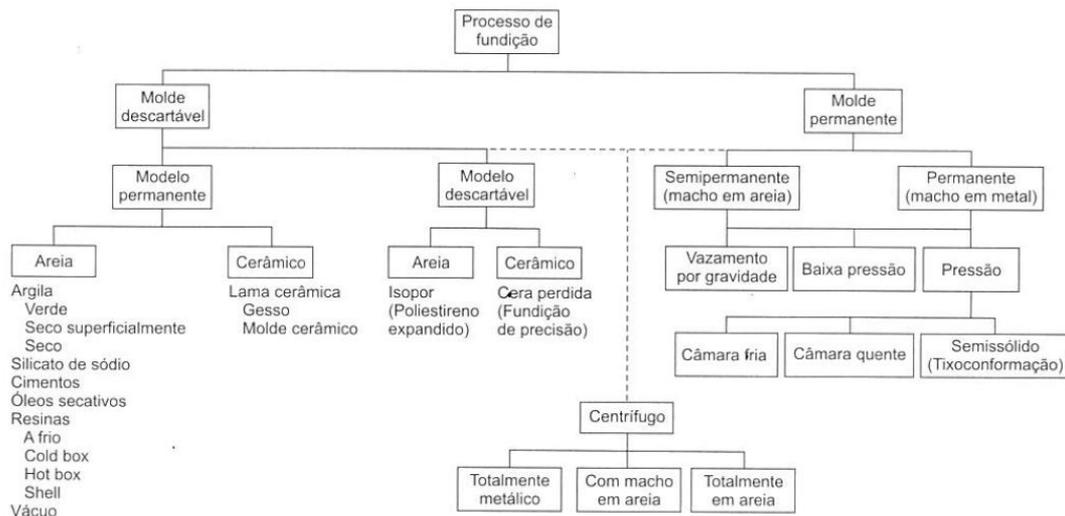
Figura 1 – Fluxograma fundição

Fonte: Elaborado pelo autor

Existem diversos tipos ou maneiras de se desenvolver um processo de fundição, e uma forma de distinguir os processos de fundição está pelo tipo de molde que é requerido no projeto. Partindo do molde temporário, temos: molde de areia de fundição (areia verde, areia-seca, areia-cimento); moldagem em casca; fundição por cera perdida. Na utilização do molde permanente, temos: molde metálico; fundição por centrifugação; fundição sob pressão; fundição contínua. Um terceiro caso seria a mistura dos dois anteriores e com isso temos os moldes mistos com partes permanentes e partes temporárias (BALDAM, 2014).

Na figura 2 apresenta-se uma divisão com diversas maneiras que a fundição pode proporcionar.

Figura 2 – Divisões dos tipos de fundição



Fonte: BALDAM, 2014

Variáveis como acabamento superficial, tolerâncias dimensionais, sobre-metal de usinagem, qualidade microestrutural, devem ser analisadas na escolha do tipo de molde a ser utilizado, pois cada escolha terá uma velocidade de resfriamento peculiar, o que acarreta produtos finais com diferentes propriedades (FUOCO; MOREIRA, 2015)

2.2.2 Solidificação

O processo de solidificação pode ser definido como o processo inverso à fusão e este se dá pela transição de estado de um material, passando do seu estado líquido para o sólido (BALDAM, 2014).

O principal fenômeno de solidificação que dá origem à característica do produto siderúrgico é a contração de volume associada à mudança de estado físico. O produto de lingotamento ideal seria homogêneo física e quimicamente, com estrutura fixa, equiaxial e isenta de segregação, porosidade, cavidades e inclusões não-metálicas, entretanto isso não é possível, pois tem-se imperfeições internas e também superficiais como dobras e trincas (COLPAERT, 2008).

No estado sólido o metal é composto por cristais formados durante a solidificação que se constituem de átomos e obedecem a distribuições geométricas definidas, denominadas “rede”. A velocidade de resfriamento correlaciona a forma desses cristais que podem ter dois

aspectos: cristais poliédricos ou convexas; e as dendritas, que é o aspecto mais comum em ligas metálicas (BALDAM, 2014).

O início do processo de solidificação se dá com a nucleação e crescimento. Os processos de solidificação e fusão são parecidos mas apesar disso a nucleação de cristais sólidos na massa líquida dos metais é um processo mais instável do que a formação de núcleos de liquefação durante a fusão (BALDAM, 2014).

Na solidificação do metal líquido, os núcleos começam a se formar próximos às paredes do molde, onde há maior transferência de calor. Esses núcleos agregam novos átomos por meio do processo de difusão fazendo com que ocorra a expansão, ou crescimento, da região sólida até a total solidificação da peça (CALLISTER, 2006).

A solidificação é também muito influenciada devido ao tipo de molde utilizado, pois a velocidade de resfriamento até à temperatura do início da solidificação determina o número total de núcleos ativos que podem crescer durante a transição de fases. Quanto maior for o resfriamento, maior será o número de núcleos e maior será o refinamento da estrutura (SOARES, 2000).

A resistência de uma peça fundida é inversamente proporcional ao tamanho médio dos grãos cristalinos, e de outra forma, tem-se que quanto menores, ou mais refinados os grãos, melhor serão as propriedades mecânicas do material (FILHO, 1978).

Tem-se na equação de Hall Petch uma relação do tamanho do grão com o limite de escoamento de um material:

Equação 1 – Equação de Hall Petch

$$LE = \sigma_0 + k_y \cdot d^{(-1/2)}$$

Sendo:

σ_0 : tensão de atrito na malha cristalina

k_y : constante

d : diâmetro do grão

Moldes metálicos (moldes permanentes) são os preferidos para grandes produções por minimizarem os custos de moldagem e permitirem a obtenção de um excelente acabamento

superficial. Para menores volumes temos a utilização de processos em areia, gesso e moldes cerâmicos, porém nesses processos tem-se uma menor velocidade de resfriamento, menor extração de calor por tempo do fundido das ligas e que desenvolve microestruturas grosseiras e o aumento do volume de microporosidades, causando uma qualidade metalúrgica inferior dos seus componentes (FUOCO; MOREIRA, 2015).

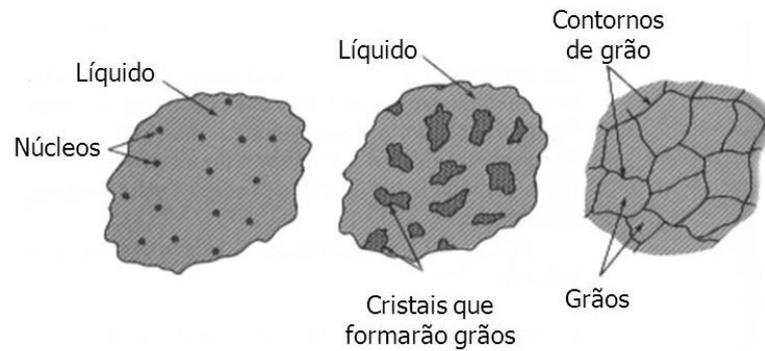
A porosidade encontrada em uma liga de alumínio fundida está diretamente relacionada com a sua solidificação, pois os gases que originam a porosidade são oriundos, por exemplo, da reação do alumínio com a umidade. Tem-se que quanto maior a velocidade de resfriamento, menores serão as porosidades. Além disso, quanto maior for a temperatura de vazamento, maior será essa formação de gases, uma vez que o alumínio permanecerá por mais tempo no estado líquido dentro do molde, propicia-se a ocorrência da reação química entre o metal e vapor de água (BRADASCHIA, 1989).

2.2.3 Nucleação e Zonas (Coquilhada, Colunar e Equiaxial)

Classicamente, o conceito de nucleação em fundição é definido como o surgimento da fase sólida de maneira estável dentro da fase líquida, na forma de pequenos núcleos que vão crescer e formar cristais. São subdivididas em duas, denominadas nucleação homogênea e heterogênea (BALDAM, 2014).

A nucleação homogênea, ocorre dentro da fase líquida e não se tem interferência ou contribuição de elementos estranhos ao sistema. A nucleação heterogênea se caracteriza pela presença de outros elementos no sistema, chamados de substratos, cuja energia de superfície ou tensão superficial participa do balanço energético dando sobrevivência ao embrião sob a forma de núcleo sólido. Esse embrião surge na superfície do substrato e se beneficia da energia de superfície presente. A representação do processo de nucleação e crescimento é apresentada na figura 3 (BALDAM, 2014).

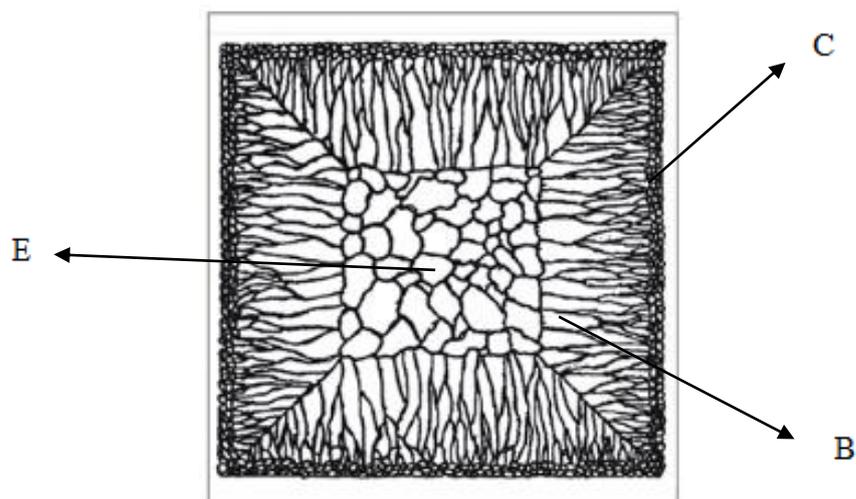
Figura 3 – Processo de nucleação e crescimento



Fonte: BALDAM, 2014

Quando um metal líquido é vazado em um molde, independentemente da natureza deste, os cristais que se formam a partir das paredes do molde podem criar três tipos de regiões distintas, que são: zona coquilhada, colunar e equiaxial. A figura 4 apresenta cada uma dessas regiões (BALDAM, 2014).

Figura 4 – Zona coquilhada (C), colunar (B) e equiaxial (E)



Fonte: BALDAM, 2014

A zona denominada coquilhada (C), consiste na camada que após o vazamento tem o primeiro contato do metal fundido com as paredes do molde. É uma camada periférica em que os grãos são nucleados na parede e crescem, competindo uns com os outros. Como a troca de calor nessa região é rápida, a taxa de nucleação é alta e, portanto os cristais são finos e crescem

aleatoriamente. Essa zona possui grãos bastantes refinados e esses nucleiam de modo heterogêneo (BALDAM, 2014).

A região seguinte é denominada de zona colunar (B), e nela devido ao fluxo de calor proposto, cristais crescem em direção ao seio do líquido, por esse motivo os grãos dessa região são grandes e alongados. Esses cristais são desenvolvidos a partir dos grãos coquilhados por meio de crescimento seletivo e preferências. (BALDAM, 2014).

Na zona equiaxial (E) a transferência de calor se dá em todas as direções com praticamente a mesma intensidade, por isso os grãos dessa região assumem a morfologia chamada de equiaxial central. Essa zona se encontra basicamente no núcleo da peça. Entretanto, a taxa de nucleação é menor que nas outras regiões e por isso os grãos são mais grosseiros e maiores quando comparado a zona coquilhada, por exemplo. É nessa região que acontece um dos maiores defeitos da solidificação, denominado rechupe (BALDAM, 2014).

2.3 ALUMÍNIO

Alguns teóricos estimam que 90% das argilas que formam parte da crosta terrestre possuem alumínio em sua composição, e todavia a indústria obtém esse material da forma mais econômica possível sendo proveniente da bauxita, um minério de cor vermelha formada principalmente por óxido de alumínio e outros compostos em menores quantidades, como: sílica, dióxido de titânio, óxidos de ferro e silicato de alumínio (CHRISTIENSEN, 1978).

O processo de obtenção do alumínio parte da extração do minério de bauxita, este material é moído e misturado com uma solução de soda cáustica. Essa mistura é aquecida sob pressão elevada. Após esta etapa a alumina é dissolvida, até que a sílica presente em sua composição seja eliminada. A obtenção do alumínio ocorre pela redução da alumina calcinada em cubas eletrolíticas, a altas temperaturas, no processo conhecido como Hall-Héroult. São necessárias aproximadamente duas toneladas de alumina para produzir uma tonelada de metal primário pelo processo de Redução (ABAL, 2015)

Segundo a ABAL, o alumínio começou a ser produzido comercialmente há cerca de 150 anos e sua produção atual supera a soma de todos os outros metais ferrosos. Suas principais características são diversas e algumas delas são a baixa temperatura de fusão, uma forte tendência à oxidação, baixa densidade, alta condutividade térmica e elevado coeficiente de dilatação.

O alumínio e suas ligas constituem um dos materiais metálicos mais versáteis, econômicos e atrativos para uma vasta série de aplicações. Sua aplicação como metal estrutural só é menor que a dos aços. O alumínio possui uma densidade de $2,7\text{g/cm}^3$, aproximadamente um terço do aço e funde aos 660°C . Possui cor branca brilhante, que é muito parecido com a da prata, porém em contato com a umidade do ar recobre-se de uma camada muito fina de óxido que esconde seu brilho (COUTINHO, 1980).

As vantagens do alumínio são inúmeras, tratando-se de um metal não magnético, possui elevadas condutividades térmica e elétrica e não tóxico, possui uma resistência à oxidação progressiva, já que os átomos da sua superfície combinam com o oxigênio da atmosfera, formando uma camada de óxido protetor que impede a progressão da deterioração do material, além de possuir um baixo peso específico, apresenta grande capacidade de reciclagem. Quando submetido a determinados tratamentos e/ou adicionado outros elementos de liga, ele se torna resistente a corrosão em meios mais agressivos (CHRISTIENSEN, 1978).

2.3.1 Ligas de Alumínio

De acordo com a ABAL, um dos aspectos que tornam as ligas de alumínio tão atraentes como materiais de construção mecânica é o fato do alumínio combinar-se com a maioria dos metais de engenharia, chamados de elementos de liga. Com essas associações, é possível obter características tecnológicas ajustadas de acordo com a aplicação do produto final. Mas para isso, é preciso conhecer bem as vantagens e limitações de cada elemento para fazer a melhor seleção.

A função de cada elemento da liga se altera de acordo com a quantidade dos elementos presentes na liga e com a sua interação com outros elementos. Em geral, pode-se dividir os elementos entre elementos que conferem à liga a sua característica principal (resistência mecânica, resistência à corrosão, fluidez no preenchimento de moldes) e elementos que têm função acessória, como o controle de microestrutura, de impurezas e traços que prejudicam a fabricação ou a aplicação do produto, os quais devem ser controlados no seu teor máximo (ABAL, 2015).

Os elementos de liga mais comumente encontrados em ligas de alumínio comerciais são o silício, o cobre, o magnésio e o zinco. Com exceção do silício, todos esses elementos apresentam altos valores de solubilidade no alumínio (FERRARINI, 2005).

A partir dessas principais ligas comerciais, pode-se citar as características que a adição desses promove:

- grupo Al-Cu (série 200): apresentam alta resistência mecânica, apresentam resistência à corrosão limitada, conformabilidade limitada, exceto no estado recozido.
- grupo Al-Si (série 300 e 400): apresenta baixo ponto de fusão, boa fluidez, boa soldabilidade, elevada resistência à corrosão, aplicações arquitetônicas.
- grupo Al-Mg (série 500): apresenta elevada resistência à corrosão e excelente usinabilidade, a mais favorável combinação de resistência mecânica, resistência à corrosão, ductilidade

Outros elementos de ligas interessantes que podem ser introduzir ao alumínio são o titânio e boro, que atuam como refinadores de grãos e se utilizados de maneira adequada, tendem a melhorar as propriedades mecânicas do produto final. (COUTINHO, 1980).

Conforme Baldam, as ligas de alumínio para fundição são classificadas segundo seus elementos de liga majoritários, conforme apresentado na tabela 1:

Tabela 1 – Elementos da liga de Alumínio

série	Composição Química	Aplicações Principais
1xxx.X	Al Comercialmente puro	Contatos Elétricos
2xxx.X	Al-Cu e Al-Cu-Mg	Indústria Aeronautica
3xxx.X	Al-Si-Mg e Al-Si-Cu	Várias
4xxx.X	Al-Si	Pistões Fundidos de Motores
5xxx.X	Al-Mg	Aplicações Náuticas (Navios e Barcos)
6xxx.X	Não existe esse sistema	Não especificado por não existir esse sistema
7xxx.X	Al-Zn e Al-Zn-Mg	Indústria aeronáuticas
8xxx.X	Al-Sn	Várias, para ligas com baixo ponto de fusão

Fonte: BALDAM, 2014

O primeiro dígito representa o elemento de liga majoritário presente. O segundo e o terceiro dígitos não possuem significado numérico, apenas identificam as demais ligas no grupo. Já o último dígito, localizado logo após o ponto decimal, indica a forma do produto, sendo 0 – peças fundidas; 1 – lingotes convencionais; e 2 – lingotes com faixas de composições mais restritas que aquelas dos lingotes convencionais (BALDAM, 2014).

2.3.2 Refinadores de Grão

Classicamente, para se ter um bom desempenho mecânico é importante que uma liga possua o tamanho de grãos pequeno, e conseqüentemente a resistência mecânica do material é aumentada. Sendo os grãos menores, maior será a densidade de contornos, e maior a densidade de área superficial de grãos por unidade de volume, e como o contorno é uma barreira para o deslocamento das discordâncias, a deformação plástica é restrita. O refinamento se dá por causa do aumento da frequência de nucleação é aumentada, e conseqüentemente o tamanho médio dos cristais sólidos são minimizados (BALDAM, 2014).

O objetivo de refinar grãos é reduzir os tamanhos das dendritas, alterando as condições de alimentação e um procedimento que permite favorecer o refino é a adição ao metal líquido de substratos heterogêneos com alto poder de nucleação na forma de partículas finamente divididas, antes da solidificação. Essas adições, chamadas de inoculantes, são dispersas uniformemente no metal líquido e assim cada partícula atua como um substrato localizado para nuclear a fase sólida (FUOCO; MOREIRA, 2015).

No caso específico do alumínio, tem-se que os inoculantes mais comuns e que se dispõem de boa eficiência são o Titânio, Boro e o Nióbio, como apresentado na tabela 2.

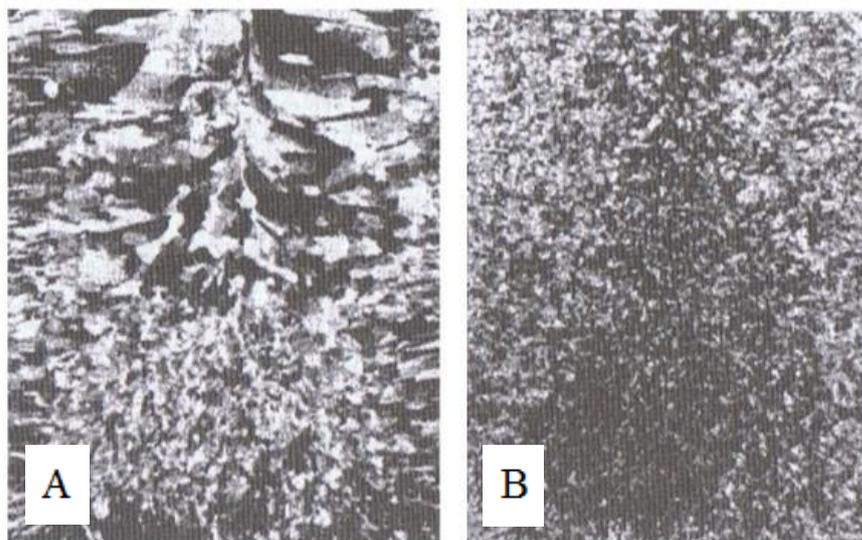
Tabela 2 – Inoculantes para refino de grão e respectivas eficiências

Metais e ligas	Inoculantes	Eficiência relativa
Alumínio e suas ligas	Titânio	Alta
	Boro	Alta
	Nióbio	Moderada

Fonte: BALDAM, 2014

O aspecto de uma macroestrutura com refinador de grão é visível, pois muda-se completamente a estrutura de grãos. Na figura 5, apresenta-se imagens (macrografias) de materiais inoculados (B) e não inoculados (A).

Figura 5 – Macroestrutura de lingote de alumínio sem (A) e com (B) adição de inoculante titânio-boro



Fonte: BALDAM, 2014

Essa adição de inoculante na liga mãe segue uma porcentagem teórica em relação ao peso, como no caso do Titânio cuja porcentagem de adição varia entre 0,05-0,2%, e repercute em uma melhora da resistência à tração, ductilidade além da diminuição da condutividade térmica; no caso do Boro com uma porcentagem de até 0,1% que torna mais duradouro o efeito do titânio em refusões, aumenta a resistência à tração, a ductilidade e ainda diminui a condutividade térmica; e no caso do Ferro com porcentagem variando entre 0,15-1,2% que reduz a contração, atua como refinador de grão (exceto nas ligas de Silício), diminui a adesão à matriz em fundição sob pressão (BALDAM, 2014).

2.4 METALOGRAFIA

Segundo Coutinho (1980), a metalografia estuda a constituição, a estrutura e a textura dos metais e permite seu relacionamento com as propriedades mecânicas, físicas, químicas e processos de fabricação. As diferenças principais nas técnicas metalográficas dos não-ferrosos se dá pela preparação meticulosa, junto da total atenção e paciência do preparador.

2.4.1 Análises Metalográficas

Um dos problemas mais interessantes que a avaliação de macro e microestruturas de metais propiciam é que as técnicas analíticas disponíveis permitem a observação de seções

bidimensionais de estruturas que possuem características tridimensionais, onde cuidados devem ser tomados, desde a seleção das seções a estudar até a avaliação criteriosa dos resultados obtidos. As análises dessas avaliações partem do estudo dos grãos formados nos materiais durante sua solidificação. Esses grãos que serão analisados partem da definição de uma região contínua com uma mesma orientação cristalográfica, onde a região de transição entre um grão e um outro é chamada de “contorno de grão” (COLPAERT, 2008).

Classicamente a macrografia é definida pelo exame do aspecto de uma peça ou amostra metálica, com a abrangência de preparação desta bem estipulada como uma seção plana, devidamente polida e, normalmente, atacada por um reativo apropriado, sendo o resultado dessa avaliação nominado de macroestrutura. Nessa análise, que pode ser feita a olho nu ou com ampliação máxima de dez vezes utilizando microscópios estéreos, são observados a forma e o tamanho ou diâmetro médio dos grãos. Esse método disponibiliza a determinação de diversas características do material, como a determinação das causas de fraturas, desgastes prematuros e outros tipos de falhas (COUTINHO, 1980).

Segundo Colpaert (2008), a preparação das amostras na macrografia, tem-se que em casos de amostras provenientes de fundição o corte longitudinal é preferido, pois abrange toda a geometria regular analisável. Quanto ao ataque da superfície, tem-se uma gama de reagentes que variam de acordo com o material da amostra, sendo os utilizados para Alumínio e suas ligas o reagente denominado Keller, que constitui de 10 ml de ácido fluorídrico, 15 ml de ácido clorídrico concentrado, 25 ml de ácido nítrico concentrado, 50 ml de água destilada. O contato do corpo-de-prova com o reativo pode ser realizado de três maneiras: ataque por imersão, por aplicação e por impressão direta de Baumann, efetuado por 20 - 30 segundos.

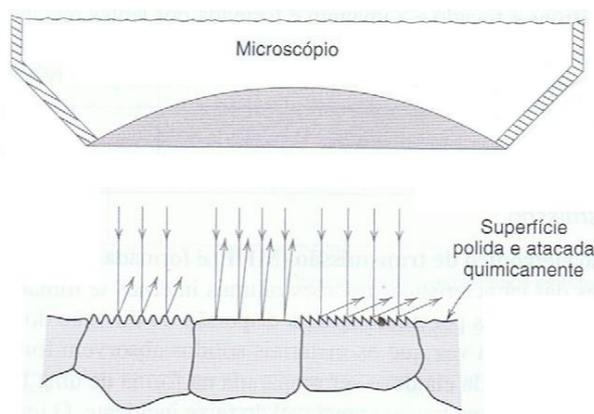
Outra análise abordada, que é a análise da microestrutura, se dá pelo fato dos materiais possuírem dimensões microscópicas, e por isso é feita em um microscópio com aumentos que normalmente variam entre 50 a 2500 vezes. Este equipamento possui baixo campo focal, e com isso permite apenas a observação de superfícies perfeitamente planas e polidas. Pelos motivos citados, a preparação correta das amostras a serem analisadas se torna importantíssima para a qualidade final dos resultados. (CALLISTER, 2006).

A preparação para a micrografia se inicia com a escolha da localização a ser estudada, corte dessa região, lixamento, polimento e ataque com reagente químico específico para o material, sendo os utilizados para Alumínio e suas ligas as soluções de soda cáustica diluída e

ácidos nítrico e fluorídrico, para que com isso revele as interfaces entre os diferentes constituintes que compõe o metal, e a partir disso é feito o exame ao microscópio para a observação da microestrutura (COLPAERT, 2008).

A figura 6 representa as interferências que a superfície do material não estando bem preparada ocasiona nos resultados obtidos pelo microscópio.

Figura 6 – Características da superfície na utilização do microscópio



Fonte: CALLISTER, 2006

Uma terceira possibilidade de análise que é abordada no trabalho é a utilização de um microscópio capaz de promover ampliações muito maiores, e um exemplo desse caso é o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Nesse microscópio a superfície da amostra é varrida com um feixe que é coletado para ser exibido na mesma taxa de varredura, sobre um tubo de raios catódicos. A imagem que é disponibilizada na tela representa as características simplesmente da superfície do material por mais que pareça ser uma imagem em três dimensões. O material a ser analisado deve ser condutor de eletricidade e por esse motivo um revestimento metálico muito fino, muitas vezes feito com ouro em pó, é aplicado sobre os materiais não-condutores. As ampliações do MEV variam entre 10 e 50.000 vezes e com adição de alguns equipamentos acessórios é permitido análises qualitativas e semiquantitativas da composição de elementos em áreas bem localizadas da superfície (CALLISTER, 2006).

2.4.2 Diagrama de Fases

No estudo das transformações de fase, mudanças podem ocorrer dentro de um determinado sistema, por exemplo, uma liga que pode existir como uma mistura de uma ou mais fases. A fase, classicamente, é definida como uma porção do sistema, cujas propriedades e composição são homogêneas e que é fisicamente distinta de outras partes do sistema. Os

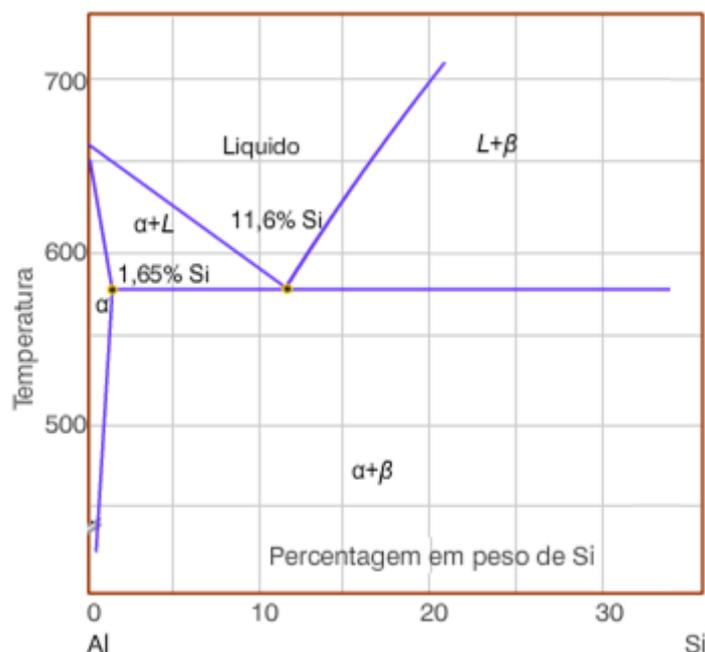
componentes de um dado sistema são os diferentes elementos ou compostos químicos que os compõem, e a composição de uma fase ou sistema pode ser descrita indicando as quantidades relativas de cada componente (PORTER, 2009).

Um diagrama de fase tanto em físico-química, engenharia e ciência dos materiais é uma representação gráfica que demonstra as condições de equilíbrio entre as fases termodinamicamente distintas (PORTER, 2009).

Alguns componentes são comuns em diagramas de fases, como exemplo deles podem ser mencionadas as linhas de equilíbrio, que referem-se as linhas que marcam condições sob as quais múltiplas fases podem coexistir e equilíbrio, que é onde as transições de fase ocorrem. Um outro são os pontos triplos que é onde linhas de equilíbrio se interceptam e marcam condições nas quais três fases diferentes podem coexistir (PORTER, 2009).

Na figura 7 tem-se um exemplo de diagrama de fases binário, da liga Alumínio-Silício, onde pode-se observar alguns pontos, como as linhas de equilíbrio e o ponto triplo, que foram abordados anteriormente.

Figura 7 – Diagrama de fases Alumínio - Silício



Fonte: COUTINHO, 1980

As ligas Al-Si com porcentagem de Si igual a 11,6% são denominadas ligas eutéticas. As ligas com teor de Si < 11,6% são conhecidas como ligas hipoeutéticas e aquelas com teor de Si > 11,6% como hipereutéticas (COUTINHO, 1980).

2.4.3 Microdureza

Os ensaios de dureza existentes possibilitam uma excelente cobertura de todas as gamas usuais encontradas, e sendo escolhido e interpretado corretamente uma excelente ferramenta para controle indireto das propriedades mecânicas (SILVA, 2010).

O termo, teste da microdureza, classicamente é utilizado para indentações estáticas provocadas por cargas menores que 1 kgf e o indentador que é utilizado para tal teste pode variar sua estrutura (SILVA, 2010).

O procedimento de teste é muito semelhante ao do teste padrão Vickers, a diferença é que esse teste é feito em escala microscópica, e com instrumentos de maior precisão. A superfície a ser testada requer um acabamento metalográfico, sendo que a preparação das amostras devem passar por um lixamento e polimento, e essa região esteja perfeitamente plana. Uma relação para esse teste é que quanto menor a carga utilizada, maior será o grau de acabamento superficial necessário (SILVA, 2010).

3. METODOLOGIA

3.1 Estruturação

Para uma divisão mais coesa e melhor compreensão durante o trabalho, este foi dividido em quatro etapas, e essas estão detalhadas a seguir:

1ª Etapa: Processo de desenvolvimento do projeto, preparação do modelo, confecção dos moldes (areia verde, areia química e metálico), fusão da liga metálica, vazamento nos diferentes moldes e retirada do corpo de prova do molde.

2ª Etapa: Preparação das amostras, (usinagem, embutimento, lixamento, polimento, fresagem, ataque químico, dentre outras), para as análises posteriores.

3ª Etapa: A partir da obtenção e preparação das amostras, foram realizadas análises como macrografia, micrografia, microdureza e MEV da propriedade formada em função da estrutura observada.

4ª Etapa: Etapa final do experimento, onde os corpos de prova foram comparados entre eles e com os dados empíricos.

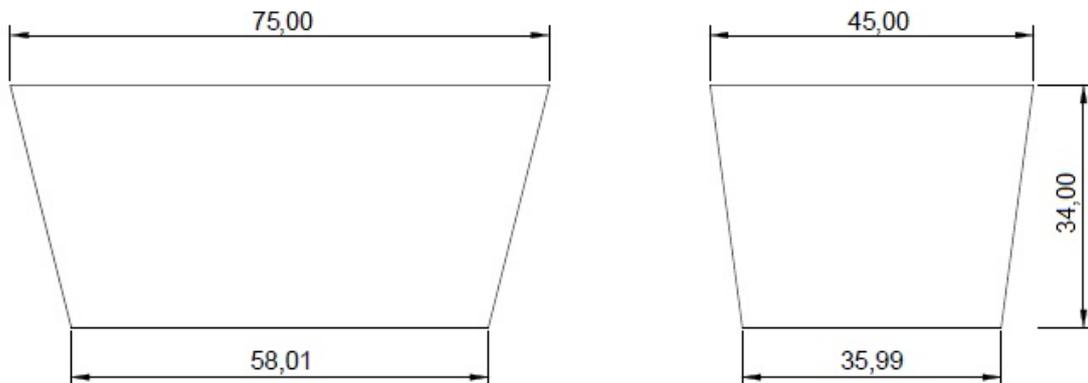
3.2 Procedimentos

Os procedimentos foram divididos pelos setores em que o trabalho foi desenvolvido, passando por fundição, composição química e preparação das amostras.

3.2.1 Fundição

Durante a primeira etapa, onde toda a revisão bibliográfica foi efetuada e todas as definições do projeto desenvolvidas, foram determinadas as dimensões do modelo metálico para confecção dos moldes, e esse tem as seguintes dimensões, em milímetros, conforme apresentado na figura 8.

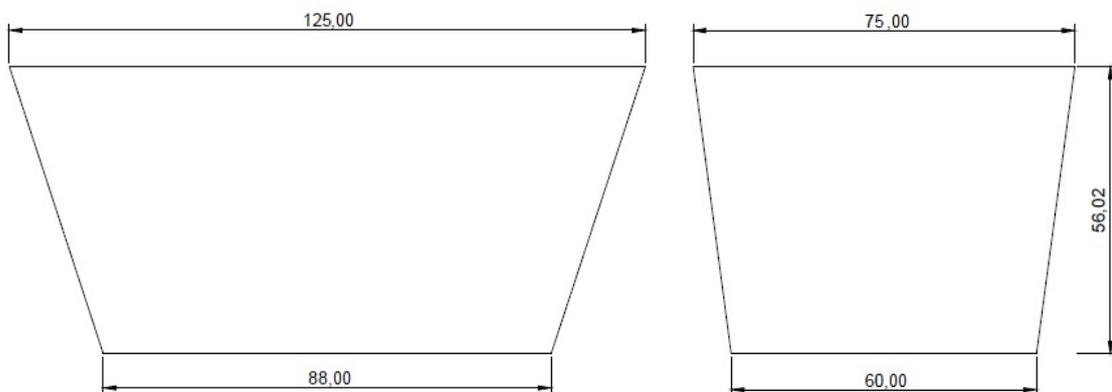
Figura 8 – Desenho do modelo utilizado para confecção dos moldes



Fonte: Elaborado pelo autor

Os moldes foram desenvolvidos com as seguintes divisões: Molde metálico, molde em areia verde e molde em areia química, como apresenta-se na figura 9 com suas extremidades estabelecidas.

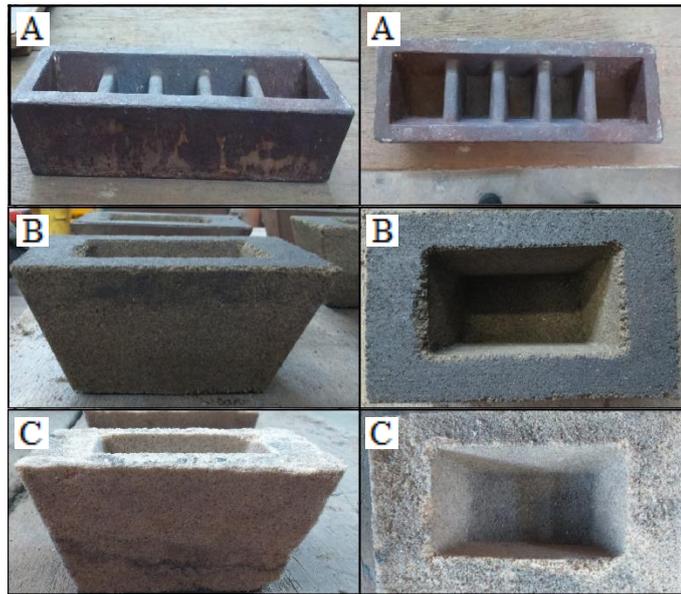
Figura 9 – Desenho das extremidades do molde



Fonte: Elaborado pelo autor

Após os dimensionamentos tanto do modelo e do molde, preparou-se os moldes no laboratório de fundição, como representado na figura 10.

Figura 10 – Moldes metálico (A), em areia verde (B) e areia química (C)



Fonte: Elaborado pelo autor

Em cada molde, tanto em areia verde como em areia química, tem-se uma composição da mistura específica. No molde em areia verde: 86% de areia de sílica; 3% de água; 10% de bentonita e 1% de carvão; no caso da areia química: 96% de areia de sílica e 4% de silicato de sódio.

A confecção do molde em areia química foi efetuada com um dia de antecedência ao vazamento, devido à indisponibilidade de dióxido de carbono no laboratório, onde esse tem o papel de catalisador no endurecimento da mistura de areia de sílica e silicato de sódio. Por esse motivo o endurecimento foi feito naturalmente, e com um gasto maior de tempo.

Com o desenvolvimento dos moldes, o próximo passo foi a preparação da liga metálica que inicialmente foi trabalhada sem a presença de titânio e em seguida esse elemento foi adicionado à liga mãe até possuir uma porcentagem de 0,16% do total, que por estudo prévio foi verificado que a porcentagem ideal da adição de titânio para trabalhar como refinador de grão varia entre 0,05 e 0,2%.

A obtenção do titânio veio por meio do reaproveitamento na forma de cavaco desse material que anteriormente foi utilizado em uma pesquisa desenvolvida no CEFET-MG. O cavaco, que é apresentado na figura 11, foi integrado em uma liga de Alumínio e posteriormente adicionado a liga inicial do trabalho.

Figura 11 – Cavaco de titânio



Fonte: Elaborado pelo autor

As fundições dos materiais foram realizadas em um forno a gás GLP de cadinho, marca Grion, e pelo forno de cadinho a gás GLP, apresentados na figura 12.

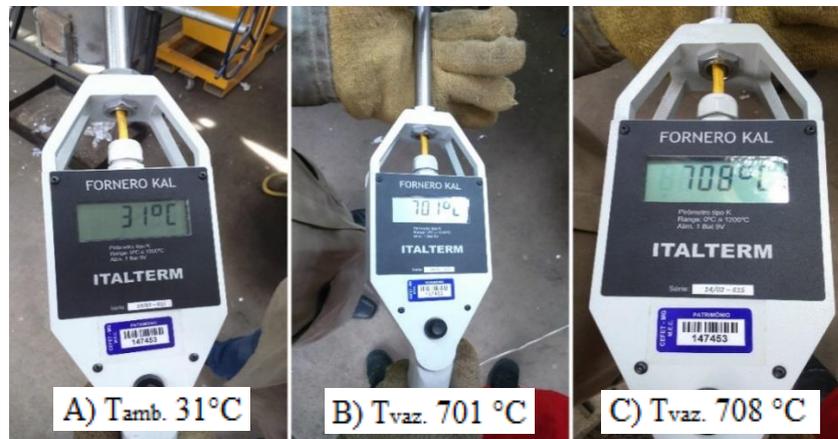
Figura 12 – Fornos utilizados



Fonte: Elaborado pelo autor

As ligas foram vazadas nas temperaturas de 701°C e 708°C. Essas foram obtidas por meio de um pirômetro, que mede a irradiação térmica da superfície de um objeto e informa a sua temperatura. Na figura 13 tem-se a imagem do pirômetro marcando a temperatura antes de ser introduzido no metal fundido e com as temperaturas encontradas no instante de cada vazamento.

Figura 13 – Pirômetro na temperatura ambiente (A) e nas temperaturas de vazamento de cada liga (B) e (C)

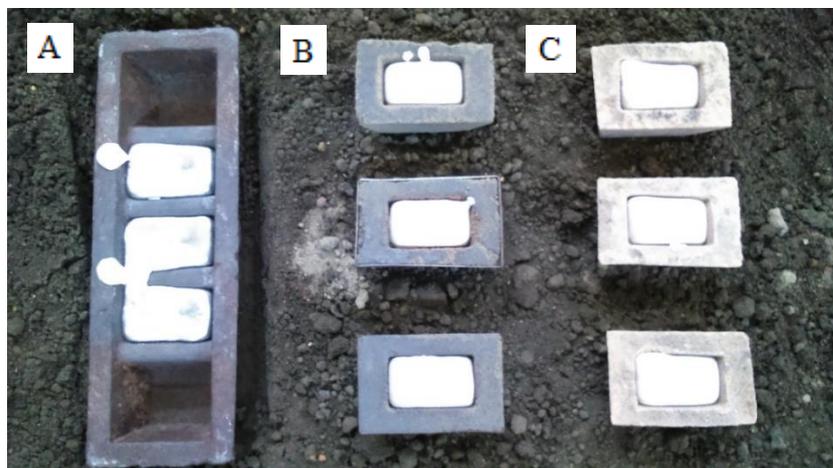


Fonte: Elaborado pelo autor

Após esses passos foi realizado o vazamento do metal fundido nos moldes e a sua solidificação foi observada em seguida. O número de amostras produzidas para cada uma das duas ligas, foi de três réplicas de cada molde citado, totalizando dezoito amostras, sendo nove de cada liga.

Na figura 14, apresenta-se o metal nos respectivos moldes em processo de solidificação. Esse valor de três réplicas para cada processo se dá devido a teoria de distribuição retangular e triangular para obter uma confiança maior nos resultados.

Figura 14 – Amostras em processo de solidificação em seus moldes, sendo da esquerda para direita, respectivamente os moldes: A, B e C



Fonte: Elaborado pelo autor

As seguintes ligas e moldes foram identificadas, para um melhor entendimento e facilitação na hora da preparação das amostras, sendo: (Molde metálico = A; Molde em areia verde = B; Molde em areia química = C). Quanto aos tipos de ligas temos que o número 1 significa a liga com alumínio “puro” e o número 2 sendo a liga com a adição de titânio. Na tabela 3, tem-se a representação dessa denominação.

Tabela 3 – Detalhamento da denominação feita para as amostras

		Liga Al	Liga Al-Ti
		1	2
Molde metálico	A	<u><i>Al</i></u>	<u><i>A2</i></u>
Molde areia verde	B	<u><i>B1</i></u>	<u><i>B2</i></u>
Molde areia química	C	<u><i>C1</i></u>	<u><i>C2</i></u>

Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.2 Composição Química

A composição química das ligas descritas durante o trabalho, tanto Alumínio “puro” e Alumínio com adição de Titânio, foram determinadas com a utilização do espectrômetro de emissão ótica modelo Foundry Master Xpert da Oxford Instruments, que se encontra no Laboratório de Fundição do CEFET-MG e apresenta-se na figura 15.

Figura 15 – Espectrômetro de emissão ótica



Fonte: Elaborado pelo autor

A estrutura do espectrômetro se resume na existência de uma rede de difração e um captador e esse permite a identificação dos elementos presentes no material por meio da excitação do corpo de prova por meio de uma tensão elétrica. Para se ter uma confiança nos resultados, três queimas são efetuadas em cada amostra e a média desses valores torna-se o resultado final. Na figura 16, apresenta-se as amostras após a queima.

Figura 16 – Amostras utilizadas na análise da composição química



Fonte: Elaborado pelo autor

Dessa queima obteve-se o resultado impresso pelo equipamento que corresponde ao percentual de cada elemento presente nas ligas trabalhadas.

3.2.3 Preparações das Amostras e Metalografia

Na etapa das preparações das amostras, seguiu-se uma sequência de procedimentos previamente estudados para os casos do trabalho, iniciando com o corte longitudinal de cada amostra.

Com todas as amostras cortadas ao meio, cada metade seguiu um caminho distinto, onde uma metade foi para a fresagem com o intuito de deixar a peça plana e a outra metade cortada para a retirada de um quadrado com 1cm² aproximadamente, do lado esquerdo e com 1 cm de distância das extremidades laterais, com o intuito de buscar uma região que sofreu uma solidificação mais branda, como visto na revisão bibliográfica. Tem-se na figura 17, os equipamentos utilizados para o corte (marca Arotec, modelo arocor 80) e fresagem (marca MEZ BRNO CSSR n.p.) das amostras.

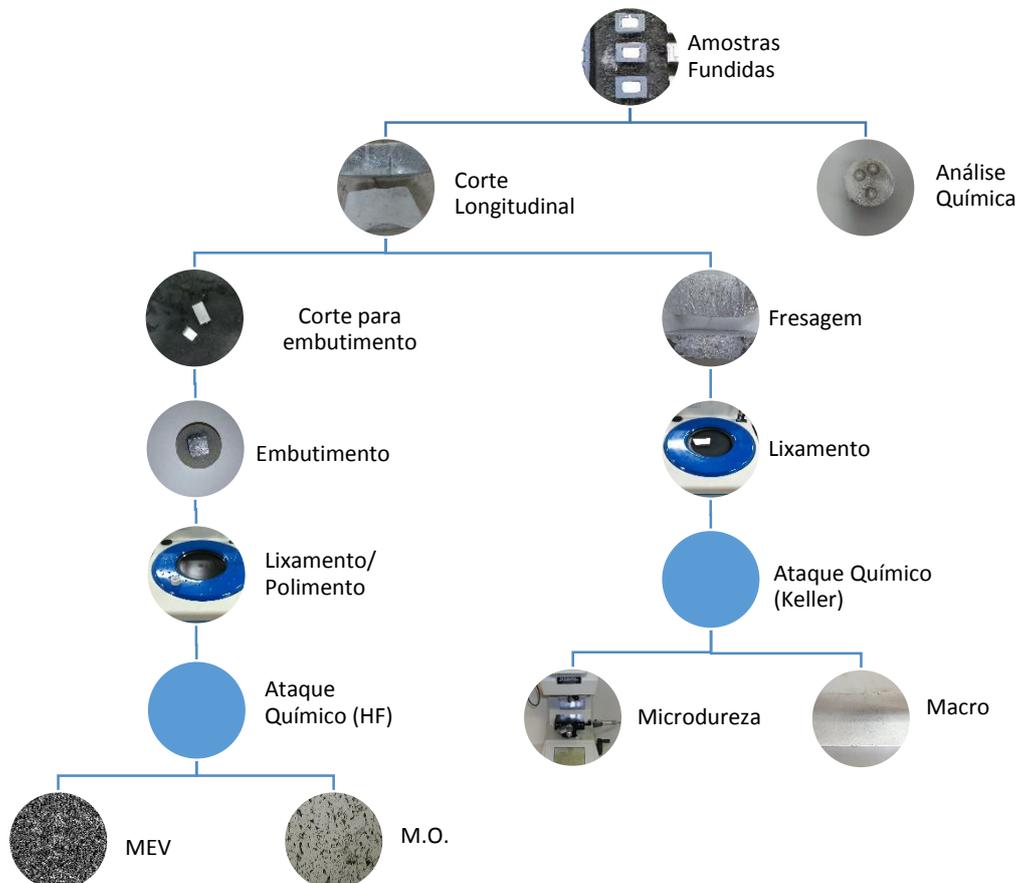
Figura 17 – Equipamentos utilizados para corte e fresagem das amostras



Fonte: Elaborado pelo autor

O organograma apresentado na figura 18 representa de forma objetiva e sequenciada as etapas da metodologia.

Figura 18 – Fluxograma das etapas de preparação das amostras



Fonte: Elaborado pelo autor

A metade fresada, posteriormente foi lixada pelo equipamento Arotec modelo Aropol-VV, como objetivo de eliminar os riscos e marcas mais profundas existentes na amostra, iniciando na lixa de 80mesh e passando pelas lixas de 120, 180, 320, 400 e 600 mesh. Ao final do lixamento essas amostras foram atacadas com o ácido “Keller”, realizado com um algodão embebido no ácido durante 30 segundos conforme previsto na metodologia. Entretanto ao contrário do esperado não foi revelada sua macroestrutura. Assim a amostra foi atacada por um tempo maior (60 segundos).

Figura 19 – Amostra após a fresagem e sendo lixada

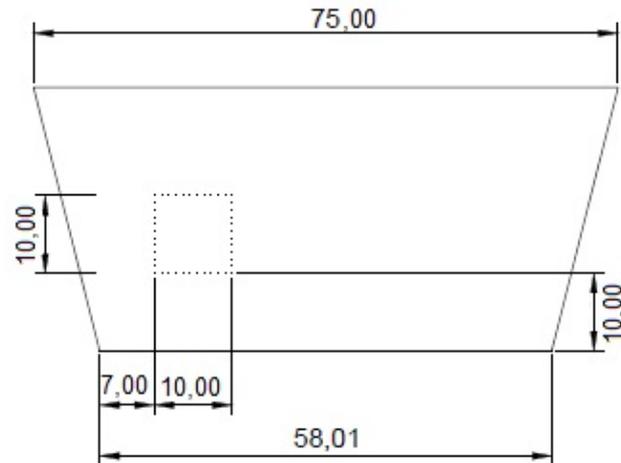


Fonte: Elaborado pelo autor

As mesmas amostras que sofreram ataque químico com Keller foram utilizadas para a análise de microdureza, que foi realizada com o intuito de obter dados mais significativos quanto as propriedades das amostras.

De volta para a preparação da outra metade da amostra, tem-se que o corte foi realizado com seções quadradas de 10 mm x 10 mm, retiradas como apresentado na figura 20.

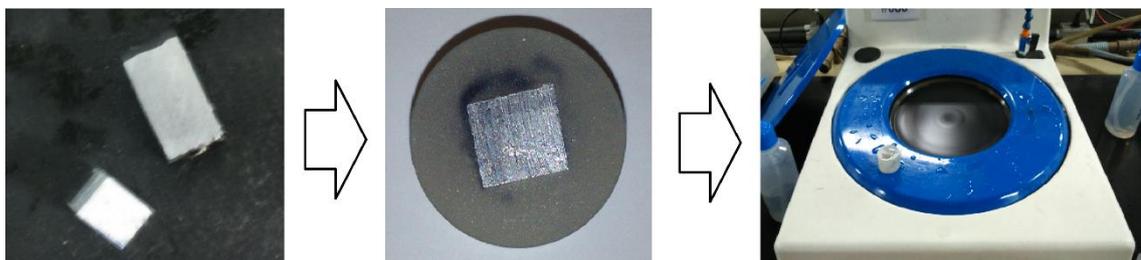
Figura 20 – Seção retirada para análise metalográfica



Fonte: Elaborado pelo autor

Após a retirada das amostras fez-se o embutimento a frio para análises de micrografia e MEV. O material embutido passou pelas lixas de 120, 180, 20, 400 e 600 mesh no equipamento Arotec modelo Aropol-VV, e por polimento com pano para materiais não ferrosos com pasta de diamante cujas granulometrias eram de $9\mu\text{m}$, $3\mu\text{m}$ e $1\mu\text{m}$, no equipamento politrizes Arotec, modelo Aropol 2V. Após polida a peça sofreu um ataque ácido com HF (ácido fluorídrico) diluído com 0,5% de concentração e sua microestrutura pôde ser analisada com microscópio onde imagens foram capturadas.

Figura 21 – Amostra cortada, embutida e sendo lixada



Fonte: Elaborado pelo autor

As amostras que sofreram ataque químico com HF foram destinadas também para o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), onde sua microestrutura foi revelada pelo

aparelho e análises pontuais dos elementos constituintes no interior e no contorno do grão foram efetuadas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise Química

Com as queimas efetuadas pelo espectrômetro, tem-se o percentual dos elementos presentes no material, e apresenta-se nas tabelas 4 e 5 esse resultado.

Tabela 4 – Análise química da liga de Alumínio

	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr
1	97,8	0,498	0,503	0,132	0,115	0,508	0,197	0,0194
2	97,8	0,481	0,463	0,150	0,121	0,665	0,150	0,0152
3	97,6	0,495	0,467	0,156	0,125	0,631	0,153	0,0159
Ave	97,7	0,491	0,478	0,146	0,120	0,618	0,166	0,0168

	Ni	Ti	Be	Ca	Li	Pb	Sn	Sr
1	0,0220	0,0276	0,0004	0,0005	0,0001	0,0528	0,0005	0,0011
2	0,0153	0,0210	0,0004	0,0005	0,0001	0,0718	0,0005	0,0009
3	0,0161	0,0205	0,0004	0,0005	0,0001	0,0799	0,1130	0,0009
Ave	0,0178	0,0230	0,0004	0,0005	0,0001	0,0681	0,0376	0,0010

	V	Na	Bi	Zr	B	Ga	Cd	Co
1	0,0078	0,0015	0,0008	0,0036	0,0007	0,0126	0,0003	0,0061
2	0,0049	0,0006	0,0008	0,0015	0,0005	0,0091	0,0003	0,0005
3	0,0038	0,0004	0,0008	0,0010	0,0002	0,0093	0,0003	0,0005
Ave	0,0055	0,0008	0,0008	0,0020	0,0005	0,0104	0,0003	0,0021

	Ag	Hg	In	Sb	P	Ce	La
1	0,0017	0,0010	0,0133	0,0862	0,0046	0,0006	0,0019
2	0,0012	0,0010	0,0005	0,0441	0,0020	0,0006	0,0040
3	0,0010	0,0010	0,0005	0,0572	0,0020	0,0006	0,0020
Ave	0,0013	0,0010	0,0044	0,0625	0,0021	0,0006	0,0008

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 5 – Análise química da liga de Alumínio e Titânio com 0,18%

	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr
1	98,2	0,661	0,288	0,106	0,0557	0,328	0,0353	0,0051
2	98,2	0,680	0,295	0,109	0,0579	0,334	0,036	0,0052
3	98,2	0,664	0,281	0,111	0,0570	0,340	0,0326	0,0050
Ave	98,2	0,668	0,288	0,109	0,0569	0,334	0,0346	0,0051

	Ni	Ti	Be	Ca	Li	Pb	Sn	Sr
1	0,0039	0,1870	0,0001	0,0001	0,0001	0,0312	0,0005	0,001
2	0,0042	0,2030	0,0001	0,0001	0,0001	0,0329	0,0005	0,0009
3	0,0040	0,1750	0,0001	0,0001	0,0001	0,0306	0,0005	0,0009
Ave	0,0040	0,1880	0,0001	0,0001	0,0001	0,0316	0,0005	0,0010

	V	Na	Bi	Zr	B	Ga	Cd	Co
1	0,0207	0,0010	0,0008	0,0012	0,0001	0,0155	0,0003	0,001
2	0,0201	0,0007	0,0008	0,0011	0,0001	0,015	0,0003	0,0012
3	0,0187	0,0012	0,0008	0,0009	0,0001	0,0137	0,0003	0,0005
Ave	0,0198	0,0010	0,0008	0,0011	0,0001	0,0147	0,0003	0,0009

	Ag	Hg	In	Sb	P	Ce	La
1	0,0016	0,0005	0,0005	0,0050	0,0020	0,0010	0,0009
2	0,0017	0,0005	0,0005	0,0050	0,0020	0,0010	0,0012
3	0,0015	0,0005	0,0005	0,0050	0,0020	0,0010	0,0006
Ave	0,0016	0,0005	0,0005	0,0050	0,0020	0,0010	0,0009

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 Macrografia

Com a macrografia, inicialmente, não se obteve uma revelação de grãos como era o esperado no início do trabalho. Tentativas de ataques iniciais com Keller foram efetuadas e não houve revelação dos grãos. O tempo de ataque foi aumentado e com isso pode-se observar algumas propriedades visualmente e após isso imagens foram capturadas. Tentativa de ataques com o ácido HF também foram efetuadas, mas os grãos não foram revelados. Os resultados obtidos foram considerados inconclusivos. A Figura 22 apresenta as amostras A1 e A2 observadas após o ataque químico com Keller.

Figura 22 – Amostras A1 e A2 da Macrografia



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 23 apresenta-se as amostras B1 e B2 observadas após o ataque químico com Keller.

Figura 23 – Amostras B1 e B2 da Macrografia



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 24 apresenta-se as amostras C1 e C2 observada após o ataque químico com Keller.

Figura 24 – Amostras C1 e C2 da Macrografia



Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 Micrografia

Nesta seção são apresentadas as microestruturas observadas por meio de um microscópio óptico. Foi esperado um melhor refinamento de grão para as ligas com a adição do titânio como inoculante nas comparações diretas com a liga sem esse elemento, e foi possível visualizar tal comportamento pelas imagens de micrografia, onde tem-se um melhor refinamento nas ligas Al-Ti em comparação a outra liga.

Nas relações dos três tipos de molde para cada liga, tem-se que o molde metálico é o caso mais refinado em comparação aos moldes em areias, tendo também a observação do molde em areia química possuir um refinamento levemente superior quando se comparado ao molde em areia verde. Isso se dá devido as diferentes velocidades de solidificação que cada molde proporciona.

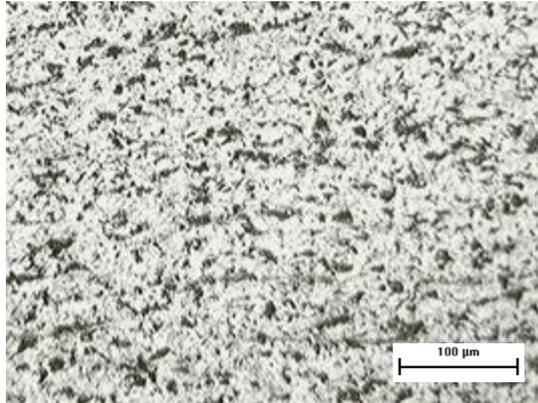
Com essas observações, pode-se deduzir que a amostra da liga Al-Ti em molde metálico possui propriedades mecânicas superiores as demais, de acordo com a equação de Hall Petch.

As imagens apresentadas a seguir representam a microestrutura de todas as amostras do trabalho por meio de imagens capturadas de um microscópio óptico seguindo a sequência de ampliação 100X, 200X e 400X para cada uma.

Amostra A1 – Liga Alumínio “puro” Molde Metálico

A Figura 25 apresenta a amostra A1 observada por meio de um microscópio óptico com uma ampliação de 100x.

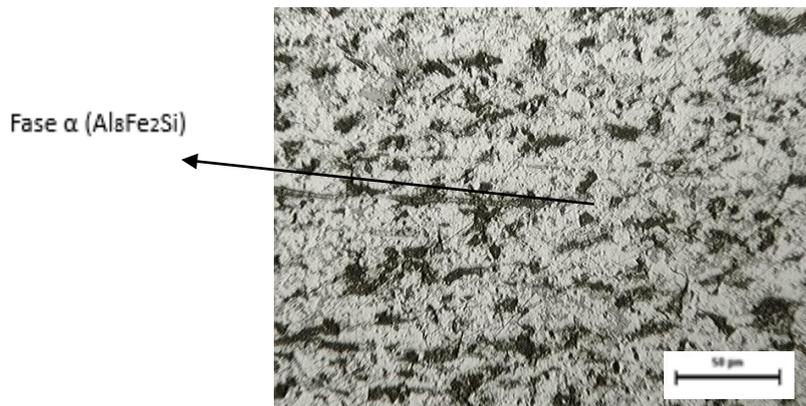
Figura 25 – Amostra A1 com ampliação de 100 vezes



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 26 apresenta a amostra A1 observada por meio de um microscópio óptico com uma ampliação de 200x.

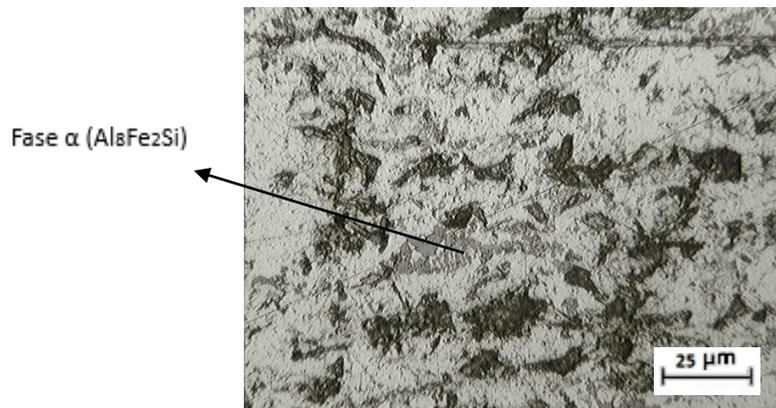
Figura 26 – Amostra A1 com ampliação de 200 vezes



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 27 apresenta a amostra A1 observada por meio de um microscópio óptico com uma ampliação de 400x. Pode-se verificar nessa imagem a fase α , que além de aparecer em “escrita chinesa” (chinese script), aparece também como partículas arredondadas muito pequenas, sendo esse último caso o mais favorável às propriedades mecânicas. Essa fase α constitui teoricamente de Al₈Fe₂Si.

Figura 27 – Amostra A1 com ampliação de 400 vezes

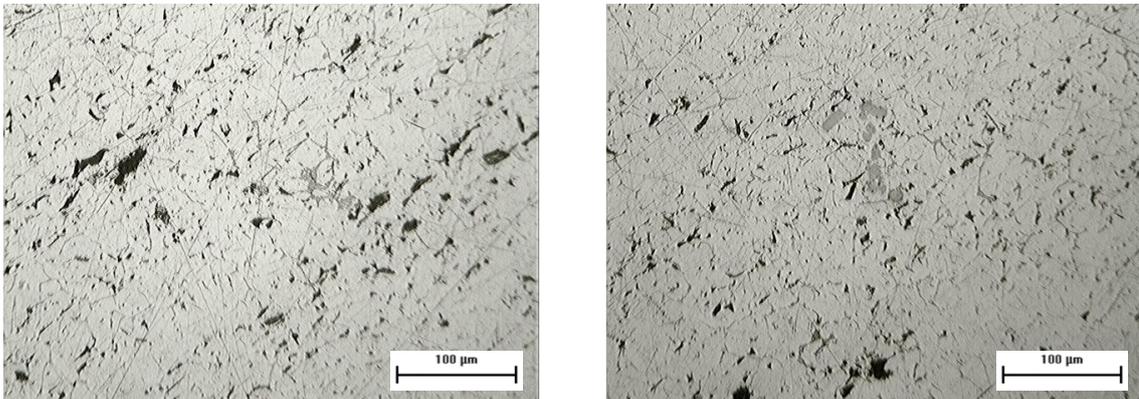


Fonte: Elaborado pelo autor

Amostra A2 – Liga Alumínio - Titânio Molde Metálico

A Figura 28 apresenta a amostra A2 observada por meio de um microscópio óptico com uma ampliação de 100x. Essa figura nos permite visualizar os contornos de grão da amostra, e uma possibilidade da fase β (Al_5FeSi) que é visualizada por meio de plaquetas, onde essa será confirmado na ampliação de 400x.

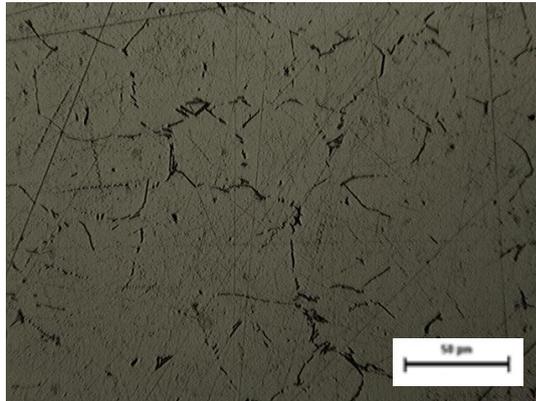
Figura 28 – Amostras A2 com ampliação de 100 vezes



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 29 apresenta a amostra A2 observada por meio de um microscópio óptico com uma ampliação de 200x. Essa figura nos permite visualizar de uma forma mais aproximada os contornos de grãos da amostra.

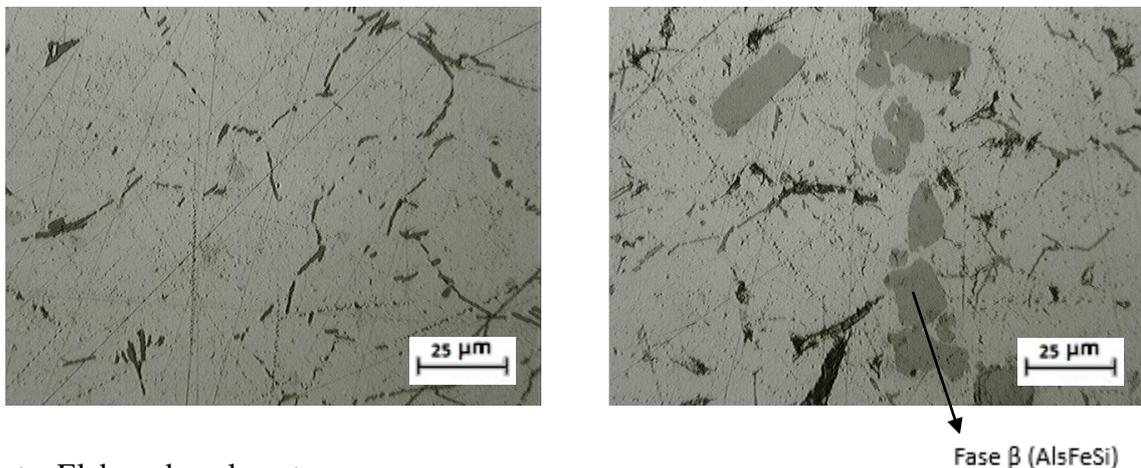
Figura 29 – Amostra A2 com ampliação de 200 vezes



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 30 apresenta a amostra A2 observada por meio de um microscópio óptico com uma ampliação de 400x. Essa figura nos permite visualizar claramente os formatos dos grãos da amostra, onde o tamanho do grão é considerado pequeno, o que define uma operação de refino. E permite também a confirmação da visualização da fase β (Al₅FeSi) por meio de plaquetas, sendo em geral mais nocivas às propriedades mecânicas das ligas de alumínio.

Figura 30 – Amostra A2 com ampliação de 400 vezes

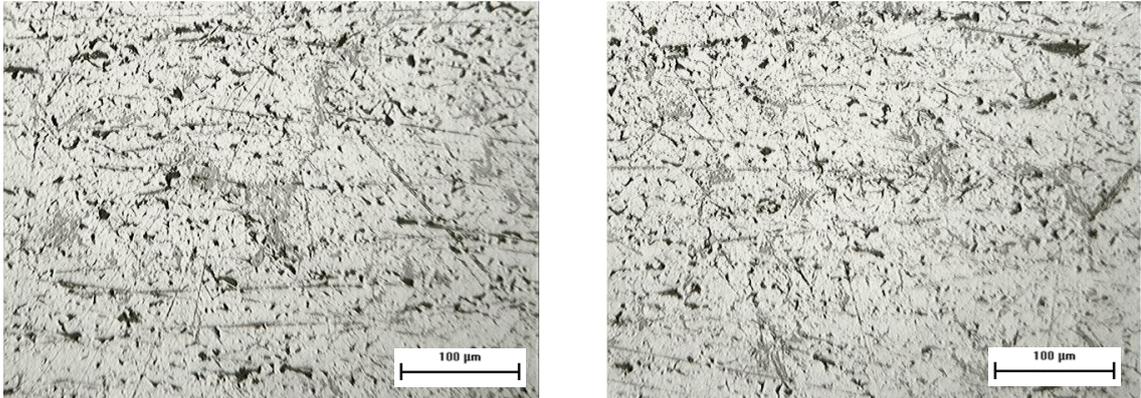


Fonte: Elaborado pelo autor

Amostra B1 – Liga Alumínio “puro” Molde em Areia Verde

A Figura 31 apresenta a amostra B1 observada por meio de um microscópio óptico com uma ampliação de 100x.

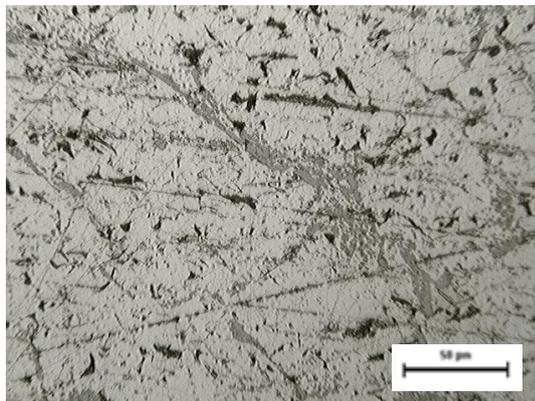
Figura 31– Amostras B1 com ampliação de 100 vezes



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 32 apresenta a amostra B1 observada por meio de um microscópio ótico com uma ampliação de 200x.

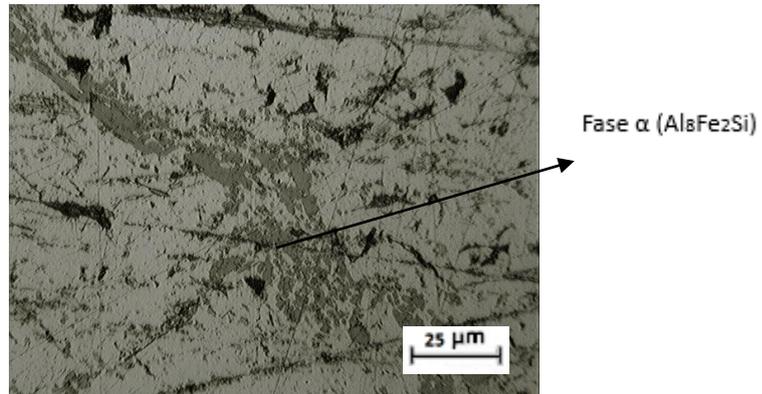
Figura 32 – Amostra B1 com ampliação de 200 vezes



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 33 apresenta a amostra B1 observada por meio de um microscópio ótico com uma ampliação de 400x. Pode-se verificar a fase α ($\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$) que aparece geralmente sob a forma de “escrita chinesa” (chinese script).

Figura 33 – Amostra B1 com ampliação de 400 vezes

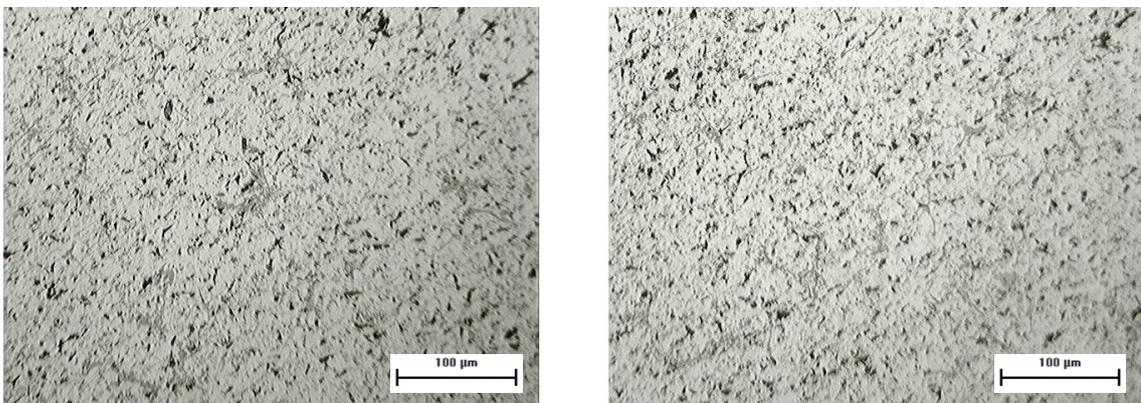


Fonte: Elaborado pelo autor

Amostra B2 – Liga Alumínio - Titânio Molde em Areia Verde

A Figura 34 apresenta a amostra B2 observada por meio de um microscópio ótico com uma ampliação de 100x.

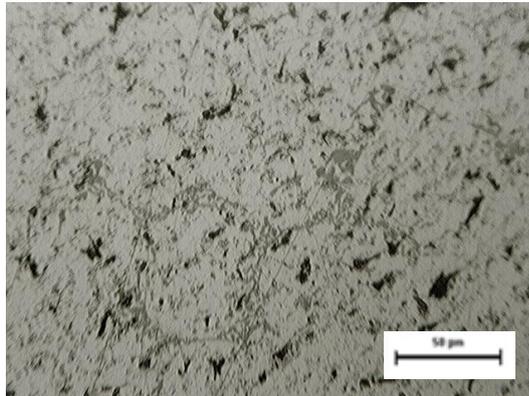
Figura 34 – Amostras B2 com ampliação de 100 vezes



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 35 apresenta a amostra B2 observada por meio de um microscópio ótico com uma ampliação de 200x. Essa figura nos permite visualizar um contorno de grão mais refinado quando comparada ao mesmo molde da outra liga.

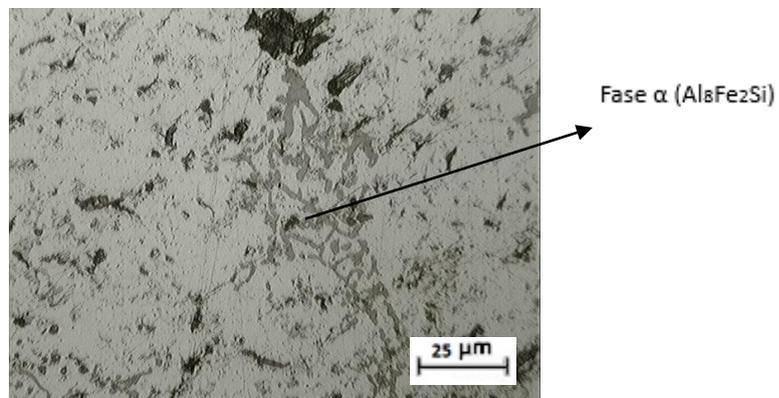
Figura 35 – Amostra B2 com ampliação de 200 vezes



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 36 apresenta a amostra B2 observada por meio de um microscópio óptico com uma ampliação de 400x. Essa figura nos permite visualizar novamente a escrita chinesa, que representa a fase α (Al_8Fe_2Si).

Figura 36 – Amostra B2 com ampliação de 400 vezes

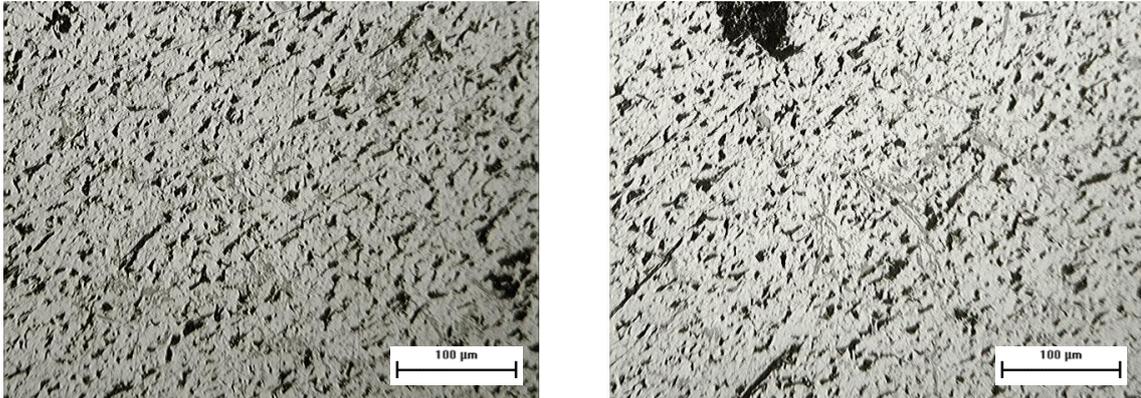


Fonte: Elaborado pelo autor

Amostra C1 – Liga Alumínio “puro” Molde em Areia Química

A Figura 37 apresenta a amostra C1 observada por meio de um microscópio óptico com uma ampliação de 100x.

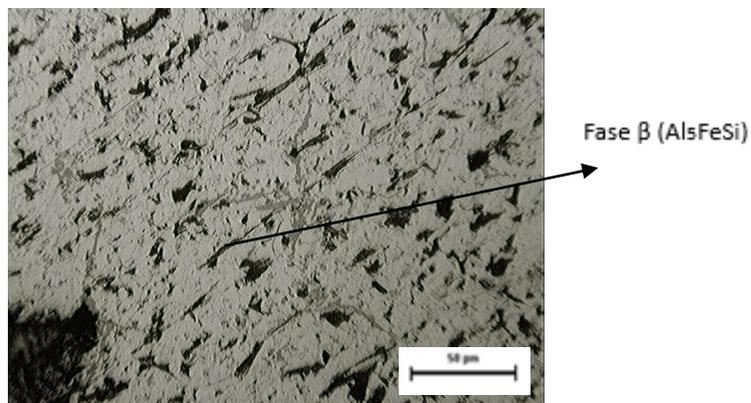
Figura 37 – Amostras C1 com ampliação de 100 vezes



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 38 apresenta a amostra C1 observada por meio de um microscópio óptico com uma ampliação de 200x. Essa figura nos permite visualizar claramente a fase β (Al₅FeSi) por meio de agulhas finas e compridas.

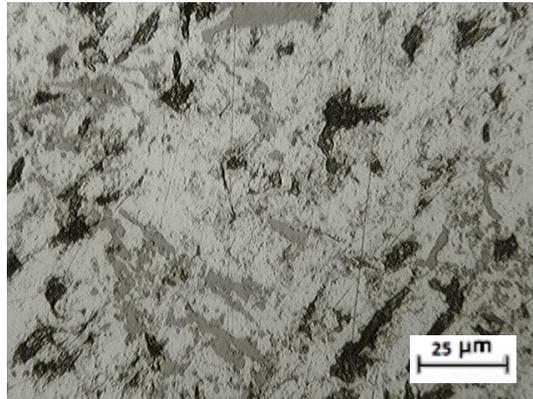
Figura 38 – Amostra C1 com ampliação de 200 vezes



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 39 apresenta a amostra C1 observada por meio de um microscópio óptico com uma ampliação de 400x. Essa figura nos permite visualizar a fase β (Al₅FeSi) por meio de plaquetas.

Figura 39 – Amostra C1 com ampliação de 400 vezes

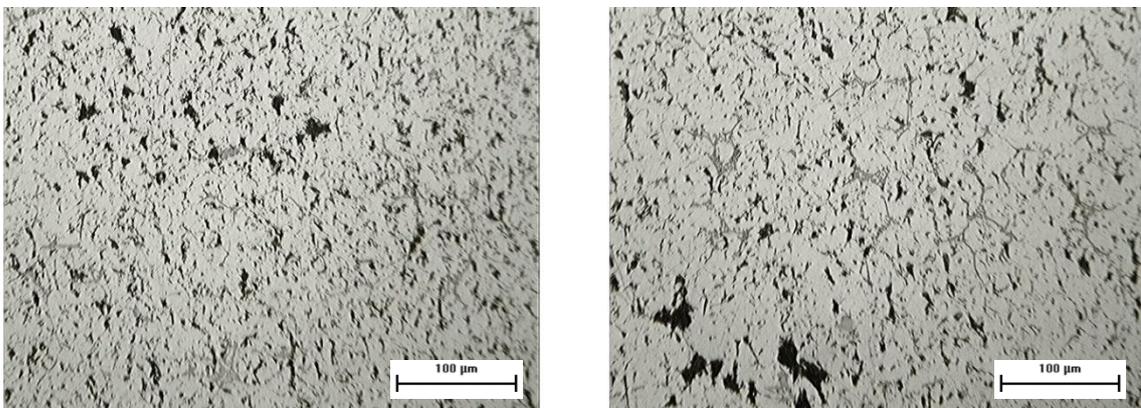


Fonte: Elaborado pelo autor

Amostra C2 – Liga Alumínio - Titânio Molde em Areia Química

A Figura 40 apresenta a amostra C2 observada por meio de um microscópio óptico com uma ampliação de 100x.

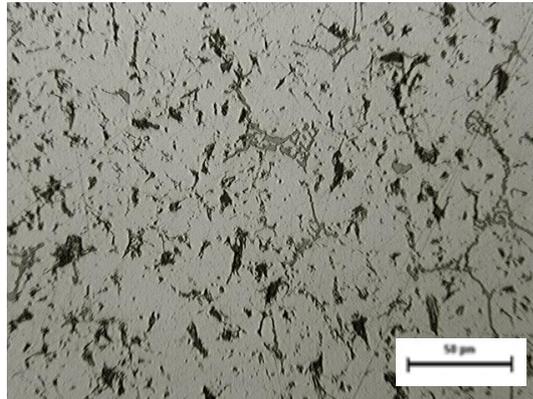
Figura 40 – Amostras C2 com ampliação de 100 vezes



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 41 apresenta a amostra C2 observada por meio de um microscópio óptico com uma ampliação de 200x. Essa figura nos permite visualizar um refinamento de grão bastante elevado quando se comparada a amostra C1.

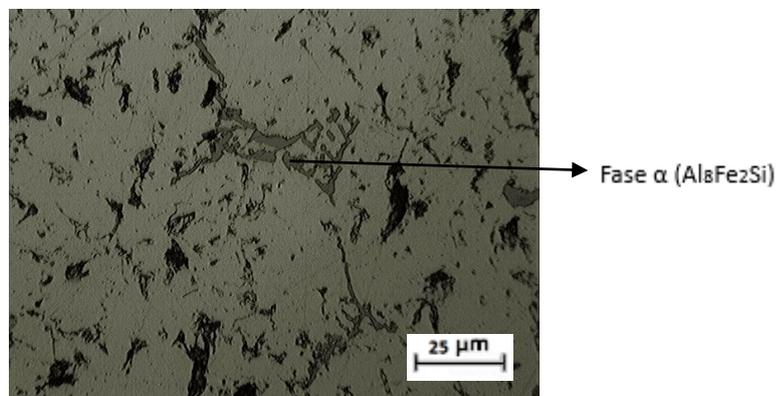
Figura 41 – Amostra C2 com ampliação de 200 vezes



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 42 apresenta a amostra C2 observada por meio de um microscópio óptico com uma ampliação de 400x. Essa figura nos permite visualizar novamente a fase α ($\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$), visualizada sob escrita chinesa. Permite também visualizar a fase β (Al_5FeSi) por meio de agulhas finas e compridas.

Figura 42 – Amostra C2 com ampliação de 400 vezes



Fonte: Elaborado pelo autor

4.4 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

Esta seção apresenta a microestrutura das seis amostras observados por meio do MEV e, também, as composições das fases encontradas por meio do EDS, que é um equipamento adicional ao MEV para detectar a composição química pontual da amostra. Os resultados obtidos indicam as fases presentes nos contornos de grão e também dentro do grão, onde nos contornos de grão pode-se observar em geral os elementos Si, Fe, Mg, além do Al, e em um

caso pôde visualizar o Ti junto ao Al dentro do grão, como apresentado na tabela 6, onde tem-se os elementos presentes nessas regiões de cada amostra.

Tabela 6 – Elementos presentes no contorno e interior de grão de cada amostra por meio do MEV e EDS

	A1	A2	B1	B2	C1	C2
Contorno de grão	Al, Fe, Si e Mg	Al, Fe e Mg	Al e Fe	Al, Si e Fe	Al, Fe, Si e Mg	Al, Fe, Si e Mg
Interior do grão	Al	Al e Ti	Al	Al	Al	Al

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que as ligas com o inoculante Ti tem o formato dos grãos menores quando comparadas as ligas sem esse elemento, levando em consideração o mesmo molde.

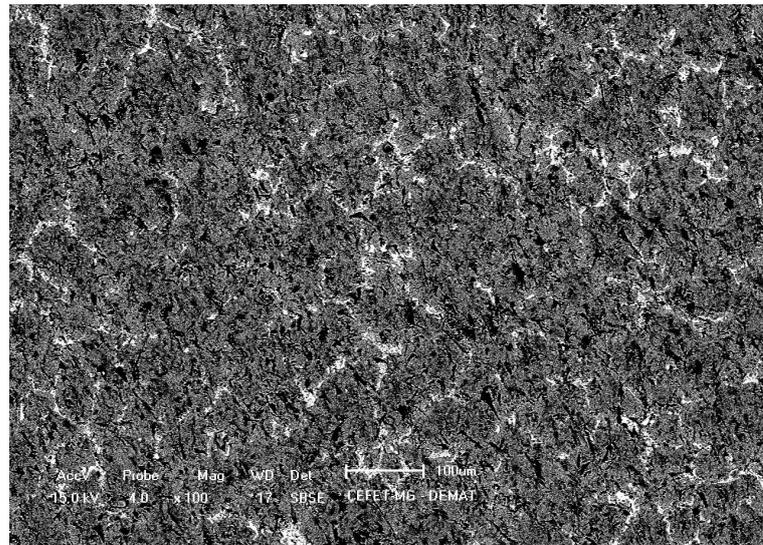
Em alguns casos não foi possível encontrar alguns elementos, devido ao baixo percentual desses elementos na liga.

Um ponto analisado foi o insucesso com o ataque ácido para que os grãos fossem perfeitamente identificados e por este motivo alguns resultados são inconclusivos. Uma segunda preparação foi efetuada nas amostras com o intuito de melhorar as imagens, mas os resultados de algumas continuaram inconclusivos. A seguir, apresenta-se as imagens das amostras pelo MEV e as respectivas análises químicas dos contornos e interior dos grãos.

Amostra A1 – Liga Alumínio “puro” Molde Metálico

Na Figura 43 é observada a microestrutura formada na amostra A1 por meio de um microscópio eletrônico de varredura com um ampliação de 100x.

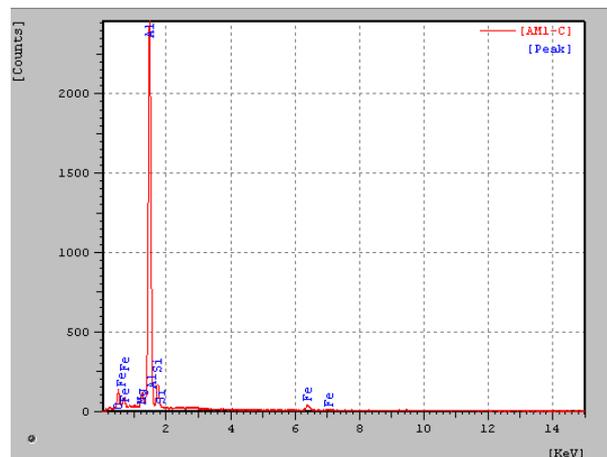
Figura 43 – MEV com ampliação de 100 vezes da amostra A1



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 44 apresenta composição química de um ponto presente no contorno de grão visualizado pelo MEV dessa amostra A1. Percebe-se a presença de um alto teor de Al, e também Fe, Si e Mg como confirmado na análise química feita após a fundição.

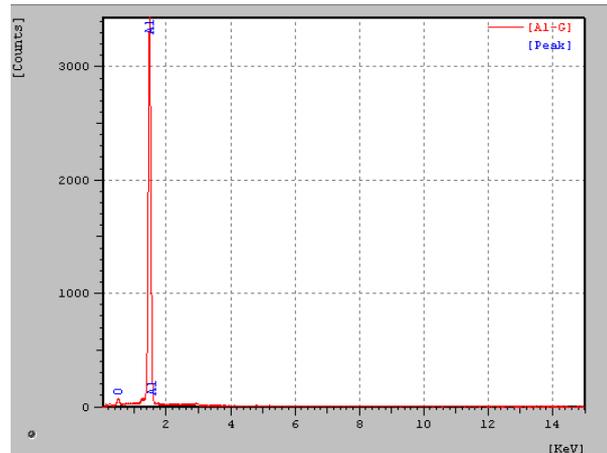
Figura 44 – Composição química de um ponto presente no contorno de grão



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 45 aponta a composição química de um ponto localizado dentro do contorno de grão visualizado pelo MEV dessa amostra A1. Percebe-se basicamente a presença de um pico Al.

Figura 45 – Composição química localizada dentro do contorno de grão

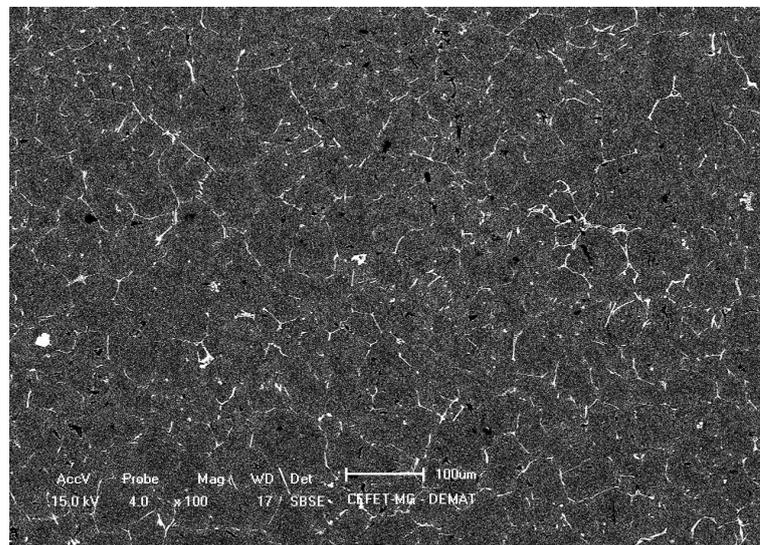


Fonte: Elaborado pelo autor

Amostra A2 – Liga Alumínio - Titânio Molde Metálico

Na Figura 46 apresenta-se a microestrutura formada na amostra A2 por meio de um microscópio eletrônico de varredura com uma ampliação de 100x, em que os grãos são claramente visualizados. Por meio dessa imagem observa-se um melhor refinamento.

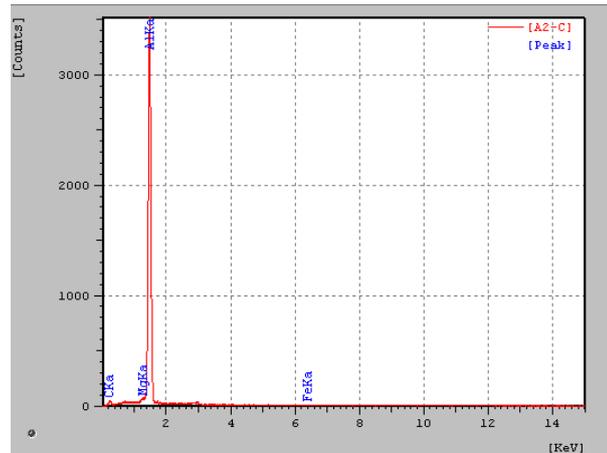
Figura 46 – MEV com ampliação de 100 vezes da amostra A2



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 47 apresenta a composição química de um ponto presente no contorno de grão visualizado pelo MEV dessa amostra A2. Percebe-se a presença de um alto teor de Al, e também Fe como confirmado na análise química feita após a fundição.

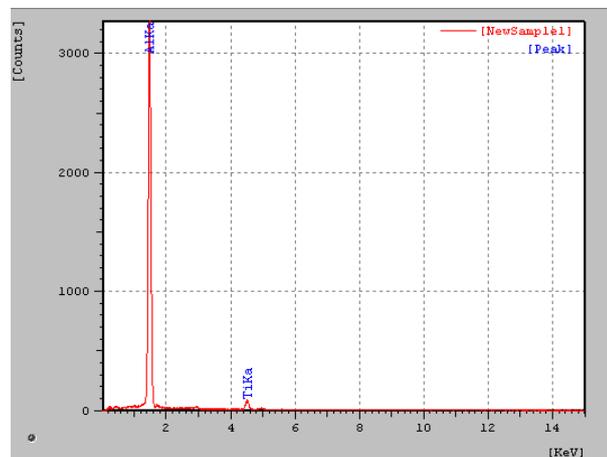
Figura 47 – Composição química de um ponto presente no contorno de grão



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 48 apresenta a composição química de um ponto localizado dentro do contorno de grão visualizado pelo MEV dessa amostra A2. Percebe-se basicamente a presença de um alto teor de Al, e também do elemento Ti como confirmado na análise química obtida após a fundição.

Figura 48 – Composição química localizada dentro do contorno de grão

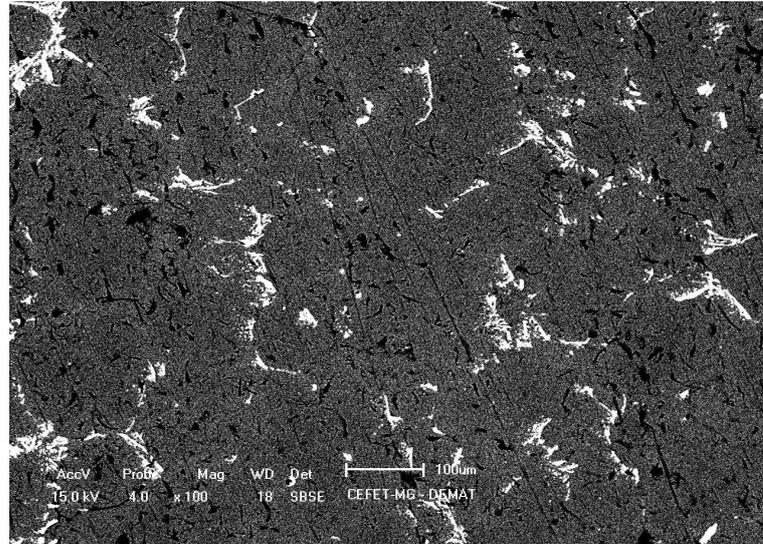


Fonte: Elaborado pelo autor

Amostra B1 – Liga Alumínio “puro” Molde em Areia Verde

Na Figura 49 observa-se a microestrutura formada na amostra B1 por meio de um microscópio eletrônico de varredura com uma ampliação de 100x.

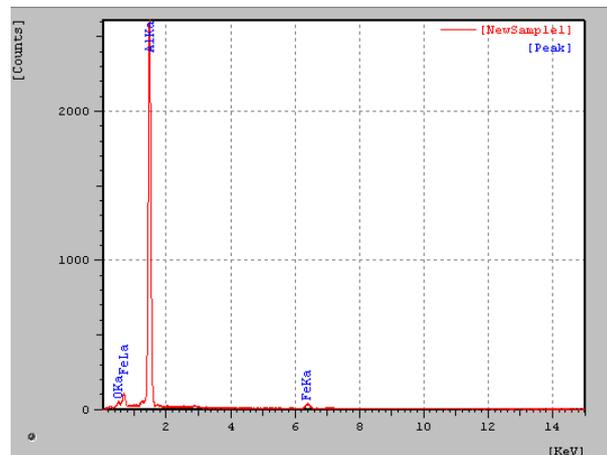
Figura 49 – MEV com ampliação de 100 vezes da amostra B1



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 50 apresenta a composição química de um ponto presente no contorno de grão visualizado pelo MEV dessa amostra B1. Percebe-se a presença de um alto teor de Al, e também a presença do elemento Fe.

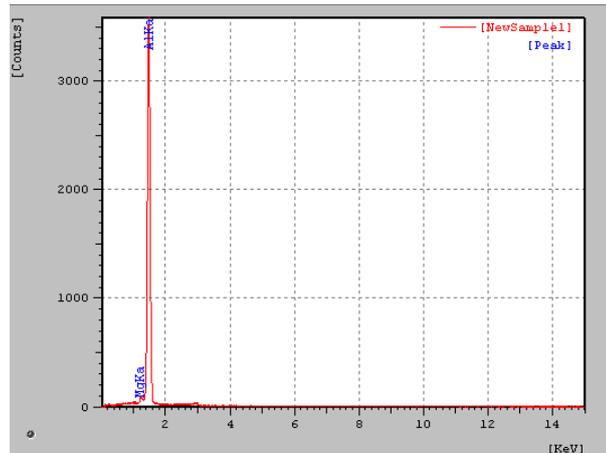
Figura 50 – Composição química de um ponto presente no contorno de grão



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 51 apresenta a composição química de um ponto localizado dentro do contorno de grão visualizado pelo MEV da amostra B1. Percebe-se basicamente a presença de um alto teor de Al.

Figura 51– Composição química localizada dentro do contorno de grão

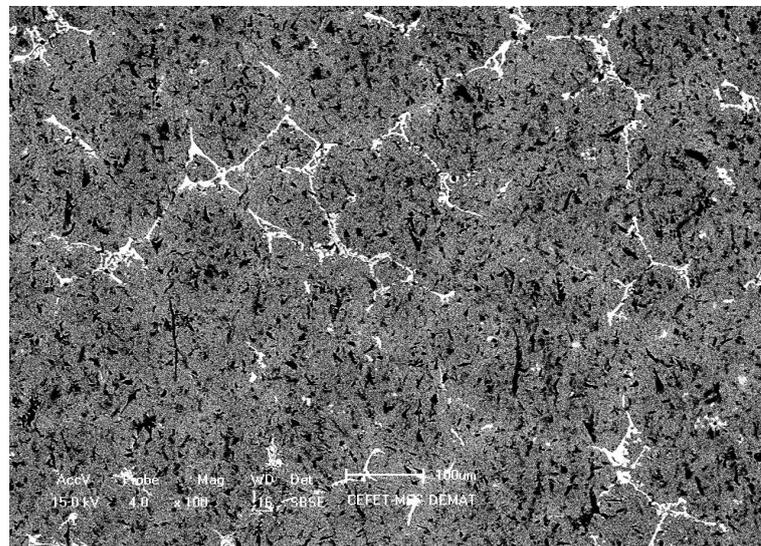


Fonte: Elaborado pelo autor

Amostra B2 – Liga Alumínio - Titânio Molde em Areia Verde

Na Figura 52 tem-se a microestrutura formada na amostra B2 por meio de um microscópio eletrônico de varredura com uma ampliação de 100x.

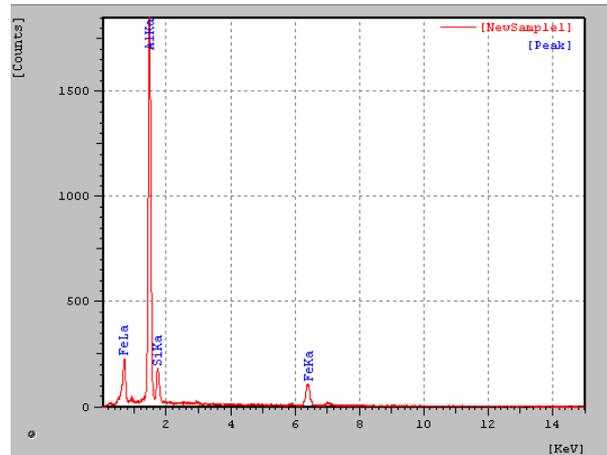
Figura 52 – MEV com ampliação de 100 vezes da amostra B2



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 53 exibe a composição química de um ponto presente no contorno de grão visualizado pelo MEV da amostra B2. Percebe-se a presença de um alto teor de Al, e também Fe e Si.

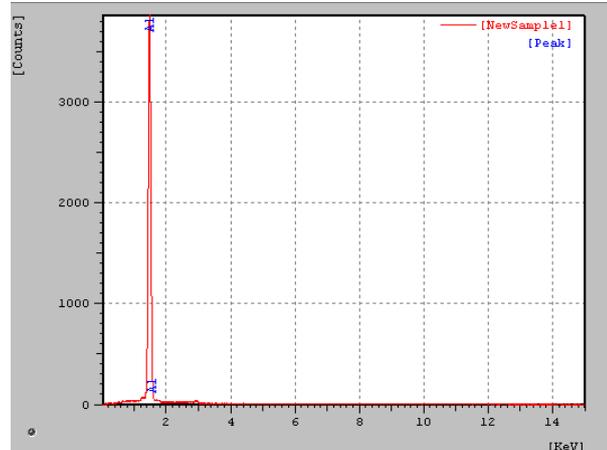
Figura 53 – Composição química de um ponto presente no contorno de grão



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 54 sinaliza a composição química de um ponto localizado dentro do contorno de grão visualizado pelo MEV da amostra B2. Percebe-se basicamente a presença de um alto teor de Al.

Figura 54 – Composição química localizada dentro do contorno de grão

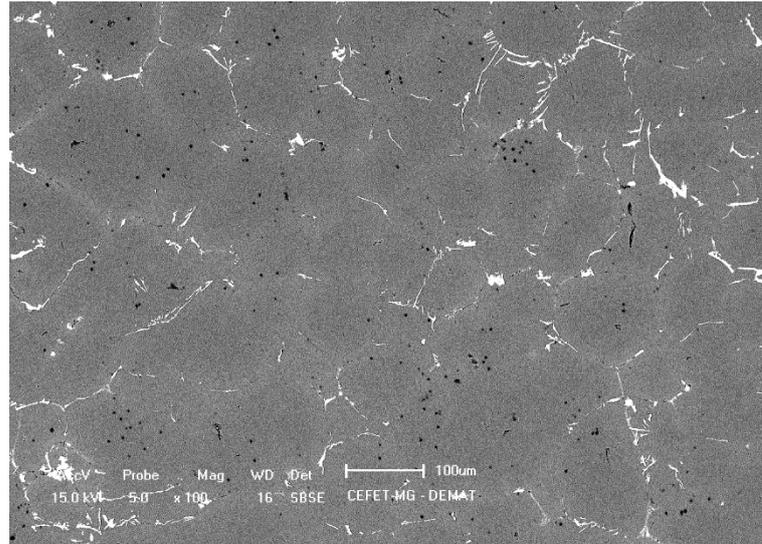


Fonte: Elaborado pelo autor

Amostra C1 – Liga Alumínio “puro” Molde em Areia Química

Na Figura 55 constata-se a microestrutura formada na amostra C1 por meio de um microscópio eletrônico de varredura com uma ampliação de 100x.

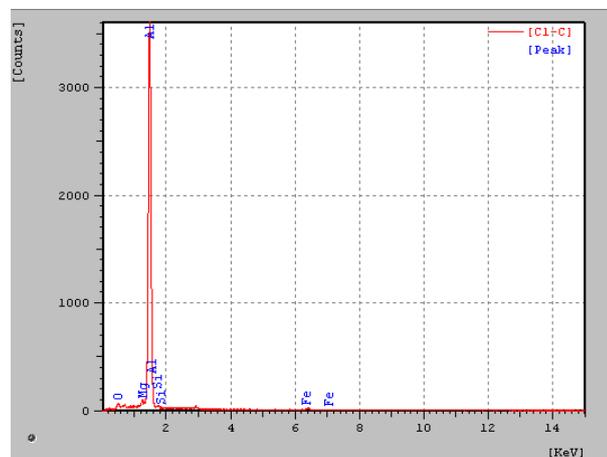
Figura 55 – MEV com ampliação de 100 vezes da amostra C1



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 56 aponta a composição química de um ponto presente no contorno de grão visualizado pelo MEV da amostra C1. Percebe-se a presença de um alto teor de Al, e também Fe, Si e Mg.

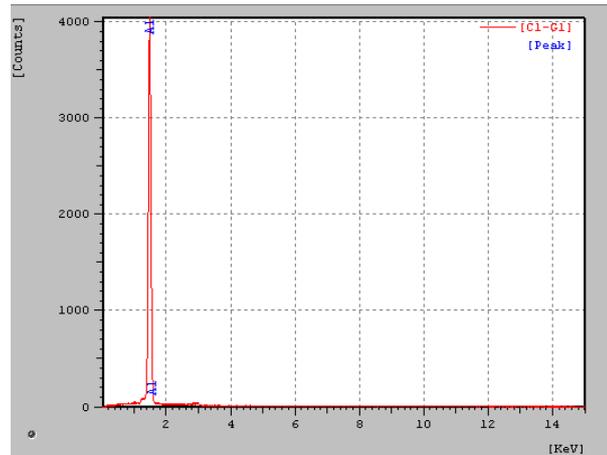
Figura 56 – Composição química de um ponto presente no contorno de grão



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 57 apresenta a composição química de um ponto localizado dentro do contorno de grão visualizado pelo MEV da amostra C1. Percebe-se basicamente a presença de um alto teor de Al.

Figura 57 – Composição química localizada dentro do contorno de grão

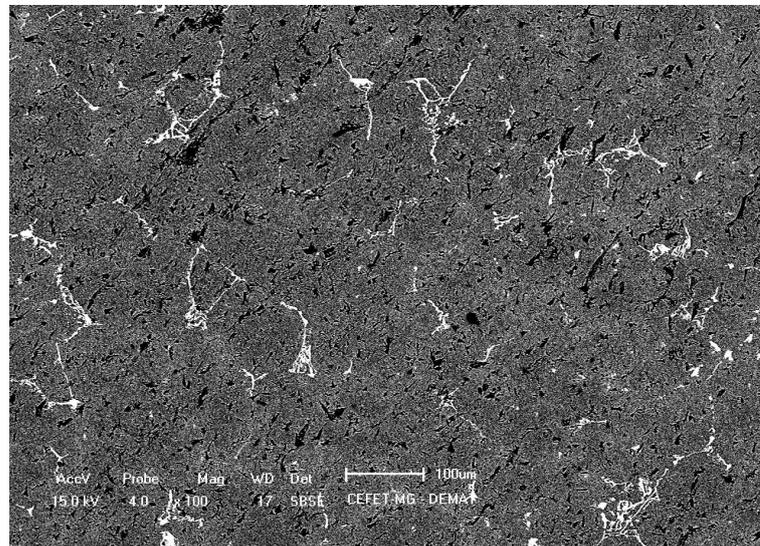


Fonte: Elaborado pelo autor

Amostra C2 – Liga Alumínio - Titânio Molde em Areia Química

Na Figura 58 apresenta-se a microestrutura formada na amostra C2 por meio de um microscópio eletrônico de varredura com uma ampliação de 100x.

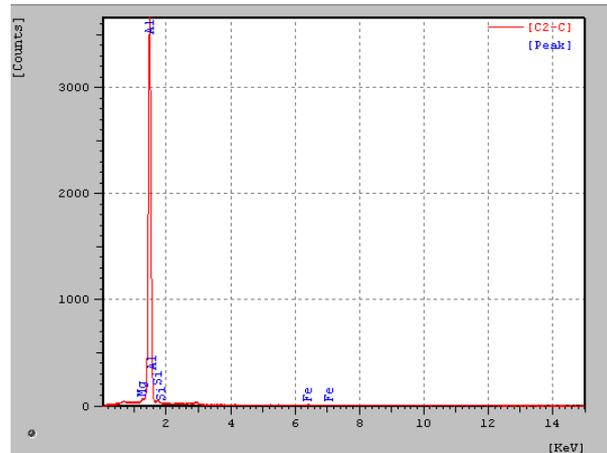
Figura 58 – MEV com ampliação de 100 vezes da amostra C2



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 59 sinaliza a composição química de um ponto presente no contorno de grão visualizado pelo MEV da amostra C2. Percebe-se a presença de um alto teor de Al, e também Fe, Si e Mg.

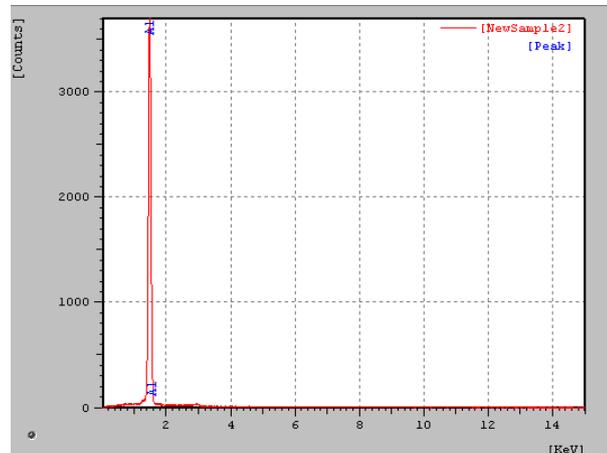
Figura 59 – Composição química de um ponto presente no contorno de grão



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 60 apresenta a composição química de um ponto localizado dentro do contorno de grão visualizado pelo MEV da amostra C2. Percebe-se basicamente a presença de um alto teor de Al.

Figura 60 – Composição química localizada dentro do contorno de grão



Fonte: Elaborado pelo autor

4.5 Microdureza

Esta seção apresenta na tabela 7 os resultados obtidos da Microdureza Vickers, dados em HV, das seis amostras. Foram realizados 10 ensaios, com carga aplicada de 100 gramas por 10 segundos para cada amostra e dessas foram excluídos os valores mais discrepantes (os dois maiores e os dois menores). Após isso, foi calculada a média dos resultados e esses foram analisados. Os resultados obtidos confirmam que as ligas solidificadas em moldes metálicos e

que possuem menor tamanho de grão, apresentam uma maior microdureza. Foi identificado também valores maiores para as ligas que foram refinadas pelo Titânio, quando comparado ao mesmo molde com a liga sem o refinador. Diferenças pequenas foram encontradas entre os moldes em areia verde e química, com o molde em areia química possuindo uma vantagem, que pode ser explicado pelas diferenças de taxas de resfriamentos desses moldes.

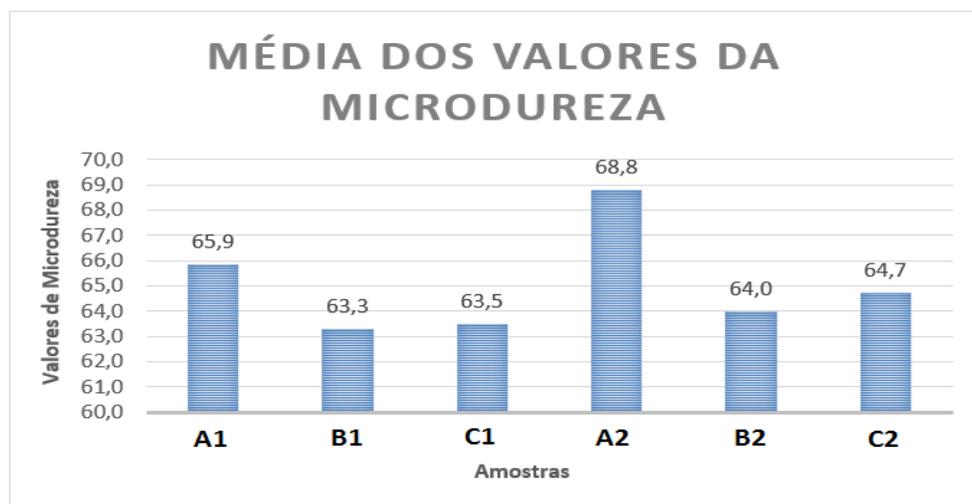
Tabela 7 – Valores da Microdureza Vickers das amostras (HV)

Retiradas	A1	B1	C1	A2	B2	C2
1ª	70,7	-	64,5	63,9	-	-
2ª	-	-	61,3	65,8	60,1	70,0
3ª	65,0	61,5	-	-	-	62,0
4ª	64,3	65,9	65,4	-	65,3	61,2
5ª	-	-	63,5	70,2	61,3	71,8
6ª	63,9	65,1	-	-	68,5	57,9
7ª	65,7	60,2	59,9	70,2	-	-
8ª	-	-	66,4	-	-	65,4
9ª	65,7	65,8	-	69,8	61,9	-
10ª	-	61,2	-	72,9	66,9	-
Média	65,9	63,3	63,5	68,8	64,0	64,7
Desvio Padrão	2,47	2,59	2,48	3,31	3,38	5,38

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 61, apresenta-se o gráfico com os valores das médias encontradas na Microdureza.

Figura 61 – Valores obtidos com a Microdureza



Fonte: Elaborado pelo autor

4.5 Porosidade

Em um teste visual foi observado que nas amostras provenientes do molde metálico, de ambas as ligas, quase não foi encontrado porosidade ou pelo menos um número considerável menor que nos outros moldes (areia verde e química). Isso tende a ocasionar propriedades mecânicas superiores para essa amostra. Em relação aos tipos diferentes de ligas os resultados em relação a porosidades foram inconclusivos pela limitação do observador, onde um software de cálculo de poros por área deveria ser utilizado. A relação do número de poros de cada amostras se dá devido a taxa de resfriamento nos moldes, sendo a do molde metálico muito maior que nos demais e, portanto, o número de poros dessa é menor.

5. CONCLUSÕES

A seguir, têm-se as análises dos resultados experimentais obtidos nesse trabalho que permitem as posteriores conclusões:

- Macrografia: Inconclusivos, apesar das inúmeras tentativas de ataque ácido a sua estrutura não foi revelada como esperado.
- Micrografia:

Em comparação direta dos mesmos moldes, variando somente a liga (A1 com A2; B1 com B2; C1 com C2). Estima-se que as amostras com o titânio, apresentam uma distribuição de grãos mais refinados. E de acordo com a equação de Hall Petch, por terem menor tamanho de grãos médios possuem melhores propriedades mecânicas.

Fixando a liga e comparando os diferentes moldes (A1 com B1 e C1; A2 com B2 e C2). Estima-se que o molde metálico possui menor tamanho de grão, seguido pelo molde em areia química e em areia verde. Se dá devido ao fato do modo de resfriamento do material ter influência direta na microestrutura formada, pois quanto maior for essa taxa, mais refinados serão os grãos.

- MEV/EDS: Verifica-se que os elementos de ligas estão presentes no contorno de grão, e pôde-se encontrar o elemento Ti no centro de grão. Isso se dá pois durante a solidificação os elementos de liga tendem a segregar formando os grãos.
- Porosidade: A taxa de resfriamento nos moldes é inversamente proporcional ao número de poros. Como a taxa de resfriamento do molde metálico é maior, a porcentagem de porosidade é reduzida.
- Microdureza: Maiores valores de Microdureza nos moldes metálicos. As amostras com Titânio apresentam-se um valor superior comparado à ausência deste elemento. Isso se dá devido ao refino do grão pelo titânio e as taxas de solidificação do molde metálico.

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Com os resultados obtidos na realização deste trabalho, assim como as diversas variáveis que podem ser alteradas, pode-se sugerir os seguintes trabalhos a serem desenvolvidos:

- Adicionar outros elementos de ligas;
- Testar também o elemento Boro como inoculante;
- Variar a temperatura de vazamento;
- Adicionar vibração durante a solidificação;
- Variar as condições de solidificação;
- Testar avaliação dos poros por software;
- Utilizar simulador computacional em diferentes especificidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, G. F. C.; COUTO, A. A. **Estudo de ligas Al-Si fundidas em moldes de areias verde: efeito da adição de refinados e de modificadores de grão nas propriedades mecânicas.** CBECiMat, Porto de Galinhas, p. 11, 2008.
- ARANGO, J. M. M.; MARTORANO, M. A. **Efeitos da adição do inoculante Al-3%Ti-1%B às ligas do sistema Al-Si.** Technol. Metal. Miner., São Paulo, v. 9, n. 1, p. 71-79, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (ABAL). **Ligas.** Disponível em <<http://www.abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/ligas/>>. Acesso em: set. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO (ABAL). **Fundamentos e aplicações do alumínio.** São Paulo: ABAL. 2007 68p.
- BALDAM, R. L.; VIEIRA E. A. **Fundição: processos e tecnologias correlatas.** 2 ed. São Paulo: Érica, 2014. 380p.
- BRADASCHIA, Clovis, et al. **Fundição de Ligas Não Ferrosas.** 3 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1989.
- CALLISTER, W.D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia dos Materiais: uma introdução.** 7 ed. São Paulo: LTC, 2006. 705p.
- COLPAERT, H. **Metalografia: dos produtos siderúrgicos comuns.** 4 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2008. 652p.
- COUTINHO, T. A. **Metalografia de não-ferrosos: análise e prática.** 1 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980. 128p.
- CHRISTIENSEN, J. G. **Manual da Fundição.** 1 ed. São Paulo: Egéria, 1978. v.3.
- FERRARINI, C. F. **Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Ligas Al-Si Hipoeutéticas Conformadas por Spray.** Tese de doutorado. São Paulo: UFSCar, 2005.
- FILHO, M. P. DAVIES, G. J. **Solidificação e Fundição de Metais e suas Ligas.** São Paulo: LTC, 1978.
- FUOCO, R; MOREIRA, M. F. **Ligas de alumínio fundidas.** Disponível em: <<http://www.dalmolim.com.br/EDUCACAO/MATERIAIS/Bibliomat/aluminiofund.pdf>>. Acesso em: 01 set. 2015.
- INFOMET. **Metais & Ligas: alumínio – informações técnicas.** Disponível em:<<http://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=52>>. Acesso em: set. 2015.
- PORTER, D. A.; EASTERLING, K. E.; SHERIF, M. Y. **Phase transformations in metals and alloys.** 3 ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2009. 520p.
- SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais.** 3 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2010. 646p.

SILVÉRIO, M. O. **Análise macro e micrográfica da liga AA-356 conforme a taxa de resfriamento.** 2013. 41 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá. 2013.

SOARES, G.A. **Fundição: mercado, processos e metalurgia.** Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2000.