



**Departamento de Engenharia de Materiais**

**INFLUÊNCIA DA LIGA AL-TI NA ESTRUTURA DE  
SOLIDIFICAÇÃO DE UMA PEÇA FUNDIDA**

**Autor: Pedro Henrique Elói Silva**

**Orientador: Prof. João Bosco dos Santos**

**Belo Horizonte**

**2015**



Pedro Henrique Elói Silva

Influência da liga Al-Ti na estrutura de solidificação de uma peça  
fundida

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET MG, como parte integrante dos requisitos para a conclusão da disciplina TCC II e obtenção do título de Engenheiro de Materiais.

Orientador: Prof. João Bosco dos Santos

Belo Horizonte, Dezembro de 2015

# **Influência da liga Al-Ti na estrutura de solidificação de uma peça fundida**

Monografia apresentada por Pedro Henrique Elói Silva, ao curso de Engenharia de  
Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET  
MG

Prof. João Bosco dos Santos - Orientador  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Guilherme Marconi Silva – Integrante da banca avaliadora  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof.<sup>a</sup> Aline Silva Magalhães – Integrante da banca avaliadora  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Aluno Pedro Henrique Elói Silva  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem ele nada disso seria possível.

Agradeço ao meu orientador, o professor João Bosco, pelos ensinamentos, paciência e dedicação para que este trabalho pudesse ser realizado.

Agradeço também a professora Elaine, por ceder gentilmente o laboratório de Metalografia para que fossem preparadas as amostras.

Agradeço aos meus amigos, que, de alguma forma contribuíram positivamente para conclusão deste estudo.

E por último, agradeço aos meus pais pelo enorme incentivo e por acreditarem em mim, e a Gabriella pelo apoio incondicional.

## SUMÁRIO

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1.     | INTRODUÇÃO .....   | 11 |
| 2.     | OBJETIVOS .....  | 12 |
| 2.1.   | Objetivos Gerais.....  | 12 |
| 2.2.   | Objetivos Específicos.....                                     | 12 |
| 3.     | REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....                                     | 13 |
| 3.1.   | Características Gerais Do Alumínio.....                        | 13 |
| 3.2.   | Fundição .....   | 16 |
| 3.3.   | Solidificação.....   | 17 |
| 3.4.   | Características Importantes Do Alumínio.....                   | 19 |
| 3.5.   | Ligas De Alumínio .....  | 20 |
| 3.5.1. | Ligas De Alumínio-Silício .....                                | 20 |
| 3.5.2. | Ligas De Alumínio-Titânio .....                                | 21 |
| 3.6.   | Vibração .....   | 21 |
| 3.7.   | Metalografia.....  | 22 |
| 3.7.1. | Ensaio Macrográfico.....                                       | 23 |
| 3.7.2. | Ensaio De Micrografia.....                                     | 23 |
| 3.7.3. | Corpo De Prova Embutido.....                                   | 23 |
| 3.7.4. | Lixamento.....   | 24 |
| 3.7.5. | Polimento.....   | 25 |
| 3.7.6. | Ataque Químico.....  | 25 |
| 4.     | METODOLOGIA.....   | 26 |
| 4.1.   | Equipamentos Utilizados.....                                   | 27 |
| 4.2.   | Procedimentos.....   | 28 |
| 4.2.1. | Fundição.....  | 28 |
| 4.2.2. | Análise Química.....   | 30 |
| 4.2.3. | Metalografia.....  | 33 |
| 5.     | RESULTADOS.....  | 37 |
| 5.1.   | Análise Macrográfica.....                                      | 37 |
| 5.2.   | Análise Micrográfica.....                                      | 39 |
| 5.3.   | Microscopia Eletrônica De Varredura (MEV) e Ensaio De EDX..... | 41 |
| 5.4.   | Ensaio De Micordureza.....                                     | 44 |
| 6.     | CONCLUSÃO.....   | 46 |
| 7.     | SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....                           | 47 |
| 8.     | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                               | 48 |

## LISTA DE FIGURAS

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Figura 1  | Processo de nucleação e crescimento  | 17 |
| Figura 2  | Forno a gás utilizado na fundição do material                                | 28 |
| Figura 3  | Estrutura onde o metal será vazado   | 29 |
| Figura 4  | Pirômetro na temperatura de Vazamento  | 29 |
| Figura 5  | Pirômetro utilizado no experimento   | 29 |
| Figura 6  | Estrutura de vibração utilizada para o experimento                           | 30 |
| Figura 7  | Peneirador usado como aparelho de vibração à 10 e 90 Hertz                   | 30 |
| Figura 8  | Torno Universal  | 31 |
| Figura 9  | Máquina de Análise Química   | 31 |
| Figura 10 | Representação esquemática do funcionamento do espectrômetro de emissão ótica | 32 |
| Figura 11 | Demonstração da sessão retirada para análise metalografica                   | 34 |
| Figura 12 | Equipamento usado para contar os corpos de prova em cubos 10mm x 10mm        | 34 |
| Figura 13 | Fresadora  | 35 |
| Figura 14 | Amostra A: revelação após o ataque com HF                                    | 37 |
| Figura 15 | Amostra B: revelação após o ataque com HF                                    | 37 |
| Figura 16 | Amostra C: revelação após o ataque com HF                                    | 38 |
| Figura 17 | Amostra X: revelação após o ataque com HF                                    | 38 |
| Figura 18 | Amostra Y: revelação após o ataque com HF                                    | 38 |
| Figura 19 | Amostra Z: revelação após o ataque com HF                                    | 39 |
| Figura 20 | Amostra A: aumento de 100X   | 39 |
| Figura 21 | Amostra A: aumento de 400X   | 39 |
| Figura 22 | Amostra B: aumento de 100X   | 40 |
| Figura 23 | Amostra B: aumento de 400X   | 40 |
| Figura 24 | Amostra C: aumento de 100X   | 40 |
| Figura 25 | Amostra C: aumento de 400X   | 40 |
| Figura 26 | Amostra X: aumento de 100X   | 40 |
| Figura 27 | Amostra X: aumento de 400X   | 40 |
| Figura 28 | Amostra Y: aumento de 100X   | 41 |
| Figura 29 | Amostra Y: aumento de 400X   | 41 |
| Figura 30 | Amostra Z: aumento de 100X   | 41 |
| Figura 31 | Amostra Z: aumento de 400X   | 41 |
| Figura 32 | Amostra A: aumento de 100x no MEV  | 42 |
| Figura 33 | Amostra B: aumento de 100X no MEV  | 42 |
| Figura 34 | Amostra C: aumento de 100x no MEV  | 42 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Figura 35 | Amostra X: aumento de 100x no MEV   | 42 |
| Figura 36 | Amostra Y: aumento de 100x no MEV   | 43 |
| Figura 37 | Amostra Z: aumento de 100x no MEV   | 43 |
| Figura 38 | Exemplo de um dos resultados da composição química de forma pontual do contorno de grão | 43 |
| Figura 39 | Exemplo de um dos resultados da composição química de forma pontual do grão             | 44 |

## LISTA DE TABELAS

|          |   |    |
|----------|---|----|
| Tabela 1 | Quadro de cruzamento das variáveis em questão                                     | 26 |
| Tabela 2 | Resultados obtidos pela análise química da amostra                                | 32 |
| Tabela 3 | Resultados obtidos pela análise química da amostra                                | 33 |
| Tabela 4 | Resultados obtidos através do ensaio de Microdureza das amostras de Al-Ti         | 45 |
| Tabela 5 | Resultados obtidos através do ensaio de Microdureza das amostras de Alumínio puro | 45 |

## RESUMO

O presente trabalho tem como finalidade analisar a influência da variação de alguns parâmetros na solidificação de peças fundidas, visto que o mercado utiliza bastante a fundição para confeccionar peças e componentes que serão usados para diversos fins. O material abordado foi o alumínio e suas ligas, pois devido a sua versatilidade, a demanda de mercado desse metal é bastante elevada. Como metodologia de trabalho, foi estudada a influência da composição química das ligas na solidificação sobre efeito da vibração, alterando esses parâmetros, houve possivelmente mudança na microestrutura e nas propriedades das peças fabricadas pela liga. Com esses resultados será possível verificar se cada liga gerada estará apta para determinado fim. É importante saber as propriedades do alumínio, justificando assim o porquê dele ser um material extremamente utilizado.

Palavras chave: Solidificação, tamanho de grão, alumínio, vibração.

## **ABSTRACT**

This work has the purpose to analyze the influence of the variation of some parameters in the solidification of castings, as the market rather uses the foundry to manufacture parts and components that will be used for various purposes. The material covered will be aluminum and its alloys, because due to its versatility, the market demand for this metal is quite high. As a working methodology will be varied the composition of alloys, and solidification on effect with and without vibration by changing these parameters possibly will change the microstructure and properties of the parts. With the results, you can check whether each material generated will be fit for a particular purpose. It is important to know the properties of aluminum, thus justifying why he is an extremely material used.

Key words: solidification, grain size, aluminum, vibration.

## 1. INTRODUÇÃO

Solidificação é uma transformação de fase reversível, que quando realizada em condições de equilíbrio termodinâmico, ocorre em temperatura constante e essa temperatura de equilíbrio está relacionada ao patamar de solidificação que aparece na curva de resfriamento (BALDAN, 2014).

A fabricação da maioria dos materiais metálicos, de vidros e polímeros compreende a fusão dos materiais e o vazamento do líquido resultante em um molde para se produzir um sólido de forma e tamanhos desejados. A solidificação se inicia na parede de um molde e vai evoluindo para o interior, à medida que o calor é retirado do sistema através dessas paredes. Em consequência, os grãos da estrutura gerados são com frequência colunares, longos, estreitos e perpendiculares à parede do molde. Os grãos de modo geral não se formam de maneira homogênea e instantânea. De fato, cada grão se forma primeiramente pelo resfriamento de algumas camadas, sendo que o líquido remanescente entre elas se solidificará mais tarde. Estas camadas externas dos grãos formam as estruturas chamadas de dendritos ocorrem na solidificação de diferentes metais. O crescimento de dendritos se dá durante a solidificação de metais que se cristalizam no resfriamento. (CALLISTER, 2008)

Dendrita pode ser explicado quando algumas vezes os grãos colunares ramificam-se e estes se ramificam de novo (ramificações secundárias), e também as ramificações terciárias que surgem a partir das secundárias e os grãos resultantes a partir das ramificações sucessivas. (CALLISTER, 2008)

Quando encontrado no estado sólido o metal é formado por cristais que por sua vez são compostos por átomos e essa cristalização ocorre durante a solidificação. O tamanho dos cristais que são formados sofre grande influência da velocidade de resfriamento, o que será o assunto abordado neste trabalho. Esses cristais podem possuir dois aspectos principais, cristais poliédricos ou convexas, e dendritas, que é o aspecto mais comum em ligas metálicas (BALDAN, 2014).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivos Gerais**

- Como o alumínio é comercialmente muito utilizado, será estudado na sua forma pura e juntamente com a liga Al-Ti.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Será analisado qual o comportamento dessas ligas e como são influenciadas quando alteramos algumas variáveis no processo de solidificação de peças fundidas.
- Fixar alguns parâmetros como: tipo molde e temperatura de vazamento, porém vamos variar no processo, a solidificação com baixa vibração, alta vibração e solidificação estática e composição das ligas.
- E por fim avaliar qual o efeito desta variação na microestrutura e macroestrutura das peças fundidas,
- Diagnosticar possíveis defeitos gerados, e posteriormente, fazer ensaios mecânicos e determinar se tal liga está apta para determinado fim comercial.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. Características Gerais do Alumínio**

A escolha do alumínio como material de estudo foi devido ao fato dele ser o mais versátil dos metais comumente empregados em fundição, sendo facilmente fundido tanto em areia, moldes permanentes, em fundição centrífuga, sob pressão, casca ou ainda no processo de cera perdida.

A propriedade mais importante do alumínio é a densidade, que proporciona a confecção de materiais muito leves, outra propriedade importante de suas ligas é o seu baixo ponto de fusão se comparado a outros metais. Estes são alguns dos fatores que torna o alumínio versátil.. Outro benefício gerado pelo baixo ponto de fusão é uma maior flexibilidade no manuseio do metal fundido e uma redução na manutenção nos equipamentos que são utilizados no processo de fundição. O emprego de ligas de alumínio vem aumentando continuamente devido às inúmeras vantagens que apresentam. Devido a essas inúmeras vantagens, a utilização de ligas de alumínio vem crescendo bastante e ganhando cada vez mais mercado (ASKELAND, 2008).

Dentre várias características das peças de alumínio, a baixa densidade se destaca, pois atua diretamente com economia de peso, o que torna o uso do alumínio bastante interessante para o fabricante. Ele também possui alta condutibilidade térmica e elétrica, excelente resistência a certos tipos de corrosão, boa usinabilidade, boas combinações de propriedades mecânicas, propriedades e características estas que fazem com que sejam largamente utilizadas nas indústrias química e aeronáutica, de acessórios para transmissão de energia elétrica, alimentícias e de bebidas, de utensílios de cozinha, dentre outras varias aplicações (CALLISTER, 2008).

As ligas de alumínio apresentam características que são fundamentais durante a fusão. A primeira destas é a afinidade do metal líquido a certos gases, em especial o hidrogênio. Os materiais que são utilizados na fusão reagem com o metal na forma líquida sob certas condições e desta forma tendem a liberar hidrogênio. A velocidade da reação cresce com o aumento da temperatura. Desta forma, durante a fusão de

ligas de alumínio, deve-se trabalhar com temperaturas abaixo de 700°C (ASKELAND, 2008).

Outra característica é a facilidade com que as ligas de alumínio possuem de reagirem com o oxigênio para formarem óxidos. A quantidade de óxidos formados está diretamente ligada ao valor da temperatura e a agitação do banho. Sendo nas ligas de alumínio muito difícil a separação dos óxidos com o metal durante a fusão, a agitação à alta temperatura deve ser evitada para minimizar esse problema (ASKELAND, 2008).

Podemos citar também a facilidade com que as ligas de alumínio podem ser contaminadas. A contaminação pode ser promovida pelo equipamento que não foi corretamente limpo ou protegido, ou também utilização de sucata na fundição. Todo e qualquer equipamento que vá entrar em contato com o metal líquido, como por exemplo, a escumadeira, o cadinho, sino perfurado, devem possuir um revestimento com tinta à base de alumina ou mesmo giz, para que essa contaminação seja evitada durante o banho (ASKELAND, 2008).

Outro fator de importância é referente ao tipo de molde a ser utilizado. A moldagem e os seus diversos processos para a fundição de ligas de alumínio se assemelham aos utilizados em outros metais. No entanto, as propriedades das ligas de alumínio determinam certas preferências por processos de moldagem, e assim não tendem a ser parecidos com os processos mais indicados para outras ligas e metais (ASKELAND, 2008).

Como já dito anteriormente, uma significativa característica das ligas de alumínio é a baixa densidade, não somente pela economia de peso, como também por poderem empregar baixas pressões, sendo permitido um escoamento mais leve da areia. Entretanto a leveza também pode ser considerada uma desvantagem, pois se torna mais difícil para as ligas se libertarem dos óxidos e expelir os gases do molde. Para impedir essa desvantagem emprega-se um processo de moldagem que assegura o vazamento do metal na cavidade do molde com um teor mínimo de óxido. Para que o deslocamento do ar e de outros gases aconteça corretamente à medida que o metal entra na cavidade do molde deve-se levar em consideração a permeabilidade deste que deve ser maior (CALLISTER, 2008).

Mais uma característica de moldagem das ligas de alumínio é sua fragilidade a quente. Devido a baixa resistência durante a solidificação, qualquer resistência que for anormal a contração resultará em trinca. Como esta característica varia com a composição da liga, uma seleção adequada da liga assim como um desenho correto do molde e um bom método de fundição à contração do metal ajuda a superar os problemas de fragilidade a quente e evitam obstáculos a contração do metal (SOARES, 2000).

A contração de solidificação relativamente alta da liga, também é uma característica a ser destacada. Durante a solidificação essa contração ocorre de forma rápida, necessitando-se compensá-la com um desenho apropriado dos sistemas de canais da alimentação e massalotes para que se produzam peças de qualidade e dentro das dimensões pré-estabelecidas. Durante o vazamento o metal deve entrar no molde metálico sem alta agitação. É necessário também que a operação seja feita diretamente e a uma velocidade constante. A altura do vazamento deve ser a menor possível a fim de impedir que ocorra a locomoção de escórias e ar para dentro da cavidade do molde (SOARES, 2000).

Em relação à solidificação das ligas de alumínio, é importante lembrar que a porosidade ocasionada pela formação de gases no processo é um dos principais problemas encontrados na fundição desse metal. Esses gases são originados a partir de uma reação do alumínio e da umidade do molde (Equação 1), das ferramentas utilizadas ou do ambiente.

### **Reação do alumínio com a água**



O fenômeno de formação de gás hidrogênio será tanto mais sensível quanto mais úmido for o molde, mais grossa a seção da peça e mais lento o resfriamento. E também quanto maior for a temperatura de vazamento, maior será a formação de gases, pois o alumínio permanecerá por um tempo maior no estado líquido dentro do molde, gerando condições para a ocorrência da reação química entre o metal e a água. (BRADASCHIA, 1989).

### 3.2. Fundição

A fundição é um processo de fabricação que vem sendo utilizado há milênios, no entanto, somente há cerca de quatro décadas o processo passou a ser aprimorado e pesquisado dentro da metodologia científica (FERREIRA, 2010).

Segundo Ferreira (2010), a definição de tecnologia de fundição nada mais é que um conjunto de métodos, processos e técnicas para conformação de metais fundidos e solidificação controlada. Esse processo tem como objetivo a obtenção de peças com dimensões e forma conforme apresentados no projeto inicial.

É mencionado que o processo de fundição consiste no processo de fabricação de peças que representa o caminho mais curto entre a matéria-prima metálica e as peças acabadas, em condições de uso (SENAI, 1987). Souza (s.d.) fornece uma definição mais prática, segundo o autor, a fundição é um processo de fabricação onde um metal ou liga metálica, no estado líquido, é vazado (despejado) em um molde com formato e medidas correspondentes aos da peça a ser produzida.

Soares (2000) afirma que dentre os processos de fabricação, a fundição se destaca por permitir a produção de peças com grande variedade de formas e tamanhos. O processo de fundição pode ser aplicado à fabricação de peças unitárias, como joias, implantes e peças artísticas, ou produção seriada, como componentes da indústria mecânica e automobilística.

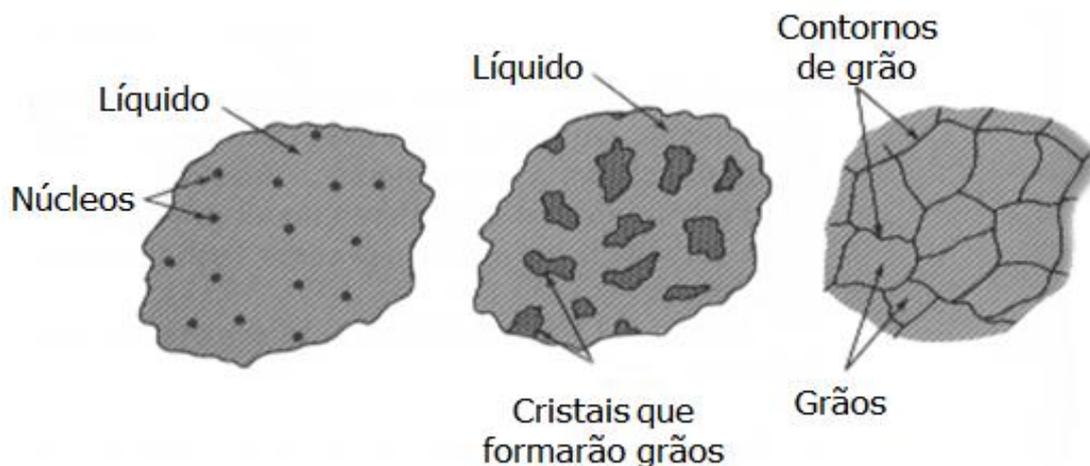
No geral, o processo de fundição tem como vantagens a fabricação de peças de variados tamanhos, grau de complexidade elevado e é muito recomendado para a fabricação de alumínio e suas ligas. A fundição possui um conceito simples, no entanto, deve-se considerar uma série de variáveis para a fabricação de uma peça fundida, e algumas dessas variáveis que irão ser o foco desse trabalho a fim de descobrir qual a sua influencia nas propriedades e estrutura da peça final.

### 3.3. Solidificação

O estudo acerca da influência de diferentes taxas de resfriamento na microestrutura formada no processo de fundição depende do estudo da solidificação do metal líquido a partir do momento que ele atinge a cavidade do molde. É dentro da tecnologia da fundição, onde se encontra o mais vasto campo de aplicação da ciência da solidificação (FERREIRA,2010). Ele também comenta que solidificação no processo de fundição parecer simples, a transformação do metal do estado líquido para o sólido dentro da cavidade do molde possui natureza ativa e dinâmica. Enquanto ocorre essa transição, vários fenômenos podem e vão afetar as propriedades do produto final, portanto é necessário controlar esses fenômenos para que o desempenho da peça não seja comprometido.

As duas principais etapas de um processo de transformação de fases são a nucleação e o crescimento. A transformação de fases não ocorre instantaneamente ao longo de toda a peça. O processo se inicia com o surgimento de pequenas partículas na fase sólida, as quais são denominadas núcleos. Na solidificação do metal líquido na fundição, os núcleos começam a se formar próximos às paredes do molde, onde há maior transferência de calor. Esses núcleos agregam novos átomos através do processo de difusão fazendo com que ocorra a expansão, ou crescimento, da região sólida até a total solidificação da peça (CALLISTER, 2008).

Figura 1. Processo de nucleação e crescimento



O processo de nucleação pode ser homogêneo ou heterogêneo. A nucleação homogênea o próprio metal fornece átomos para a formação de núcleos, e ela ocorre quando não existem pontos preferenciais no sistema para o início da solidificação do material, dessa forma a formação de núcleos se dá homogeneamente e a transição de fases ocorre de maneira igualitária pela peça. Já a nucleação heterogênea ocorre quando existem regiões da peça com maior tendência de perda de calor e, portanto, maior predisposição para iniciar a solidificação, tem a presença de agentes nucleantes, podem ser na forma de impurezas ou de um material estrutural. A nucleação heterogênea sempre tenderá a ocorrer no processo de fundição, sendo que a transformação de fases irá ocorrer primeiramente, nas regiões próximas as paredes do molde (SOARES, 2000).

Na prática já foi constatado que o desempenho adequado de uma peça fundida é inversamente proporcional ao tamanho médio dos grãos cristalinos, ou seja, quanto menores, ou mais refinados, forem os grãos, melhor serão as propriedades mecânicas do material. Sendo assim, sempre há certo empenho para que a taxa de nucleação seja a maior, a fim de diminuir o tamanho dos grãos. E tanto o Titânio quanto o uso de vibração no processo de solidificação causam esse efeito de refino de grãos. (PRATES, 1978)

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. Desta forma, quanto maior for o resfriamento, maior também será o número de núcleos formados e assim maior será o refinamento dos grãos da estrutura da peça fundida. Portanto o tipo de molde utilizado no processo, afeta diretamente a microestrutura formada, pois o molde possui forte influência na taxa de resfriamento. (SOARES, 2000)

A equação de Hall Petch (Equação 2), relaciona o tamanho do grão com o limite de escoamento de um material:

#### **Equação de Hall Petch**

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

Sendo:

$\sigma_0$  – tensão de atrito na malha cristalina

$K_y$  – constante

$d$  – diâmetro do grão

Uma técnica utilizada para controlar a nucleação, é realizar o vazamento a uma temperatura de sobreaquecimento próxima à linha *liquidus*, ou seja, próxima à temperatura de fusão do material. Pode-se denominar essa temperatura como temperatura de fundição, que nada mais é do que a temperatura de fusão acrescida pelo menor valor requerido para garantir o escoamento do metal dentro do molde. O uso dessa técnica permite uma solidificação heterogênea intensa no metal líquido, devido ao contato com o molde que se encontra inicialmente a uma temperatura mais baixa (FERREIRA, 2010).

Na fundição, o refino do grão é geralmente feito através da adição de partículas inoculantes, as quais são inseridas uniformemente no metal líquido. As partículas inoculantes atuarão como substratos responsáveis pelo início da nucleação em todo o volume da peça, e assim fazem com que a taxa de nucleação seja alta e como consequência os grãos serão mais refinados. A função dos inoculantes é garantir a homogeneidade microestrutural (SOARES, 2000).

### **3.4. Características Importantes do Alumínio**

O alumínio possui ponto de fusão de 660°C, valor baixo se comparado com o aço que funde a cerca de 1570°C. As ligas de alumínio em geral possuem menor ponto de fusão que o alumínio puro devido à presença de outros metais. O alumínio é um dos materiais mais leves encontrados na natureza. Tem cerca de apenas 30% do peso do aço e seu peso específico é de 2,7g/cm<sup>3</sup>. Juntamente com o tratamento térmico e adição de elementos de liga, o aumento da resistência faz com que ele seja alvo da indústria aeronáutica e de transportes. O alumínio quando exposto a atmosfera, tem a formação de óxidos, elementos esses que protegem o metal de próximas oxidações. Denomina-se resistência à corrosão essa propriedade que o alumínio possui. Uma característica importante como um meio de transferência de

calor, que ocorre tanto no resfriamento, quanto no aquecimento. Desta forma, os trocadores de calor feitos de alumínio são largamente utilizados nas indústrias química e aeronáutica. Seu coeficiente é de  $23,86 \times 10^{-6} \text{ mm}/^\circ\text{C}$ , o que equivale duas vezes o do coeficiente do aço. Quando outros metais são adicionados esse valor varia muito pouco (COSTA, 1998).

Devido ao fato de não ser magnético, o alumínio é utilizado em equipamentos eletrônicos na função de peças de proteção. E por não produzir faíscas ele é amplamente usado na estocagem de substâncias explosivas e infamáveis. O alumínio possui uma resistência a tração de cerca de 90MPa, o que o limita na utilização de material estrutural. Porém a adição de elementos ligas como magnésio, silício, dentre outros juntamente com um tratamento térmico adequado, aumentam de forma significativa a resistência mecânica do metal (COSTA, 1998).

### **3.5. Ligas de Alumínio**

O alumínio na forma pura quase não é usado na produção de peças fundidas por causa da baixa resistência mecânica. A adição de elementos de ligas gera uma melhora nas características de fundição e propriedades mecânicas do alumínio. É válido dar ênfase aos seguintes elementos que são usualmente usados na produção de ligas: Cu, Zn, Ti, Mn, Ni, Si, Mg. Esses dois últimos elementos silício e magnésio são os que serão abordados no trabalho, na forma de elementos de liga (COSTA, 1998).

#### **3.5.1. Liga Alumínio-Silício**

Estas ligas representam por volta de 85% de toda produção de em peças fundidas em alumínio, até por isso foi escolhida como elementos de estudo. As ligas Al-Si possuem ótima fundibilidade, possibilitam a sua usinagem e soldagem. O percentual de Silício varia entre 5 e 25% (ASKELAND, 2008).

Após as dendritas de alumínio puro se depositarem durante a solidificação, ocorre o preenchimento dos espaços vazios pelo eutético Al-Si. A medida que esse líquido solidifica se decompõe, quase por completo em alumínio puro e silício primário. É

comum que o silício primário se deposite em forma de lâminas e agulhas que são mais grossas ao passo que se reduz a velocidade de solidificação (COSTA, 2008).

As partículas grosseiras prejudicam as propriedades mecânicas e atrapalha a usinagem, além de causarem dificuldades na alimentação de metal líquido através dos espaços interdendríticos. Portanto essas partículas devem sofrer um tratamento para refino dos grãos, tratamento que pode ser realizado ao adicionar de uma baixa percentagem de sódio metálico ou através de um resfriamento rápido, o que ocorre com a utilização de moldes permanentes com paredes mais finas. Na fundição em coquilhas, é formado cristais menores e de formato arredondado ou aciculares e finos, em função de um resfriamento mais acelerado, assim se torna desnecessário o tratamento de modificação (BALDAN, 2014).

Além de fornecer relativas propriedades físicas à peça fundida, a alta fluidez da liga que possui 12% silício, ideal para esse campo de aplicação, permite vazar seções consideravelmente finas fazendo um bom detalhamento. Esta solidifica-se rapidamente na coquilha, pois possui composição próxima ao eutético, (entretanto não apresenta grande tendência ao trincamento a quente). Apesar de diminuir a ductilidade e a resistência à corrosão, ao se colocar cobre nas ligas Al-Si eleva-se a sua resistência mecânica e a usinabilidade (ASKELAND, 2008).

### **3.5.2. Liga Alumínio-Titânio**

O titânio é adicionado em pequenos teores (0,05 a 0,20%) como refinador de grão, tendo como consequência o aumento da resistência, porém a ductilidade é reduzida (BALDAN 2014).

### **3.6. Vibração**

O tipo de solidificação tem efeito sobre tamanho de grão, espaçamentos dendríticos, distribuição das inclusões e porosidades, os quais determinam as propriedades mecânicas dos componentes metálicos fundidos. A utilização de meios de agitação mecânica do metal líquido, como vibração sônica ou ultrassônica, age como instrumento de refino de grão e contribui para obtenção de uma estrutura mais homogênea na estrutura da liga fundida, o que resulta em melhores propriedades mecânicas.

Os estudos sobre solidificação com aplicação de vibração datam da metade da década de cinquenta, e já mostravam resultados consideráveis em questão de refinamento de grão e aumento das propriedades mecânicas. Ainda segundo estes autores a frequência, amplitude e aceleração da vibração são os principais parâmetros que influenciam nas propriedades mecânicas do material fundido (BAST, J. 2004).

Considera-se que existem dois importantes efeitos de vibrações nas estruturas solidificadas:

- (i) primeiro, as vibrações promovem o molhamento da superfície do molde pelo metal fundido que então auxilia a extração de calor do metal pela parede do molde. Como a superfície fundida é geralmente coberta com filmes de óxidos, é difícil, sob condições usuais, esperar um contato uniforme do metal fundido com a parede do molde. A vibração fragmenta os filmes de óxidos e promovem o molhamento do líquido na superfície do molde. Consequentemente, a taxa de resfriamento aumenta e a nucleação de cristais na parede do molde é promovida, resultando uma estrutura mais fina na superfície do lingote;
- (ii) segundo, as vibrações promovem a separação de cristais com o formato dotado do pescoço da parede do molde. Para metais que crescem com uma interface plana, como um metal puro, a separação de cristais da parede do molde não pode ser esperada. Contudo, se um metal contém soluto suficiente para a formação de cristais dendríticos, a formação de cristais equiaxiais pode ser promovida por vibrações forçadas (OHNO, ATSUMI. 1988).

### **3.7. Metalografia**

O controle de qualidade de um produto metalúrgico pode ser estrutural e dimensional. O segundo preocupa-se em controlar as dimensões físicas de um determinado produto, denominado Metrologia. O primeiro preocupa-se com o material que forma a peça, sua composição, propriedade, estrutura, aplicação, etc.

Pode ser: físico, químico, metalográfico e especial. Neste material enunciaremos a prática Metalografia no que diz respeito à preparação das amostras (ROHDE, 2010).

### **3.7.1. Ensaio Macrográfico**

Examina-se a olho nu ou com pouca ampliação (até 50X) o aspecto de uma superfície após devidamente polida e atacada por um reagente adequado. Por seu intermédio tem-se uma ideia do conjunto, referente à homogeneidade do material, a distribuição e natureza das falhas, impureza e ao processo de fabricação, qualidade de solda profundidade de tratamentos térmicos entre outras características (ROHDE, 2010).

### **3.7.2. Ensaio de Micrografia**

Consiste no estudo dos produtos metalúrgicos, com o auxílio do microscópio, onde se pode observar as fases e constituintes presentes e identificar a granulação do material (Tamanho de grão), o teor aproximado de forma qualitativa de carbono no aço, a natureza, a forma, a quantidade, e a distribuição dos diversos constituintes ou de certas inclusões (ROHDE, 2010).

### **3.7.3. Corpo de prova embutido**

O embutimento é de grande importância para o ensaio metalograficos, pois além de facilitar o manuseio de peças pequenas, evita que amostras com arestas danifique a lixa ou o pano de polimento; bem como o abaulamento durante o polimento. Existem dois tipos de embutimento o embutimento a frio e o embutimento a quente (ROHDE, 2010).

- **Corpo de prova embutido a quente**

No embutimento a quente, a amostra a ser analisada é colocada em uma *prensa de embutimento* com uma resina, sendo que o mais comumente utilizado é a baquelite; de baixo custo e dureza relativamente alta. Quando a amostra é embutida em materiais termoplásticos por meio de prensas, utilizando-se pressão e aquecimento para efetuar a polimerização.

O método consiste em colocar o corpo de prova com a face que se quer analisar em contato com o êmbolo inferior da máquina de embutimento. Após

apertar o êmbolo, coloca-se a resina na câmara de embutimento pressionando-a por um determinado tempo, de acordo com o plástico utilizado (ROHDE, 2010).

- **Corpo de prova embutido a frio**

No embutimento a frio a amostra é colocada em um molde que é preenchido com resinas sintéticas de polimerização rápida. Nesse tipo de embutimento se usam resinas sintéticas de polimerização rápida. Este embutimento é feito com resinas auto polimerizáveis, as quais consistem geralmente de duas substâncias formando um líquido viscoso quando misturadas.

Esta mistura é vertida dentro de um molde plástico onde se encontra a amostra, polimerizando-se após certo tempo. A reação de polimerização, a despeito do nome que é a operação de embutimento a frio tem, é fortemente exotérmica, atingindo temperaturas entre 50 e 120° C, comum tempo de endurecimento que varia de 0,2 a 24 h, dependendo do tipo de resina empregada e do catalisador (ROHDE, 2010).

- **Corpo de prova não embutido**

É o corpo de prova cujas dimensões da superfície a analisar são suficientemente grandes a ponto de não ser necessário ou então não ser possível realizar o embutimento (ROHDE, 2010).

#### **3.7.4. Lixamento**

Devido ao grau de perfeição requerida no acabamento de uma amostra metalográfica idealmente preparada, é essencial que cada etapa da preparação seja executada cautelosamente, é um dos processos mais demorados da preparação de amostras metalográficas.

Operação que tem por objetivo eliminar riscos e marcas mais profundas da superfície dando um acabamento a esta superfície, preparando-a para o polimento. Existem dois processos de lixamento: manual (úmido ou seco) e automático.

A técnica de lixamento manual consiste em se lixar a amostra sucessivamente com lixas de granulometria cada vez menor, mudando-se de direção (90°) em cada lixa

subsequente até desaparecerem os traços da lixa anterior. A sequência mais adequada de lixas para o trabalho metalográfico com metal é 120, 240, 320, 400, 600 e 1000 (ROHDE, 2010).

### **3.7.5. Polimento**

Operação pós lixamento que visa um acabamento superficial polido isento de marcas, utiliza para este fim abrasivos como pasta de diamante ou alumina.

Antes de realizar o polimento deve-se fazer uma limpeza na superfície da amostra, de modo a deixá-la isentam de traços abrasivos, solventes, poeiras e outros (ROHDE, 2010).

### **3.7.6. Ataque químico**

Seu objetivo é permitir a identificação (visualização) dos contornos de grão e as diferentes fases na microestrutura.

Um reagente ácido é colocado em contato com a superfície da peça por certo tempo. O reagente causará a corrosão da superfície. Os reagentes são escolhidos em função do material e dos constituintes macroestruturais que se deseja contrastar na análise metalográfico microscópica

A operação de limpeza pode ser feita simplesmente por lavagem com água, porém, aconselha-se usar líquidos de baixo ponto de ebulição (álcool etílico, fréon líquido, etc.) para que a secagem seja rápida.

Alguns grãos e fases serão mais atacados pelo reagente que outros. Isso faz om que cada grão e fase reflita a luz de maneira diferente de seus vizinhos. Isso realça os contornos e grão e dá diferentes tonalidades às fases permitindo sua identificação das mesmas no microscópio (ROHDE, 2010).

#### 4. METODOLOGIA

Primeiramente foi escolhida a liga de Al-Ti pelo fato do titânio ser um inoculante e desta forma, como dito anteriormente, ele irá refinar os grãos da liga modificando assim as propriedades mecânicas da peça fundida. No entanto conforme visto em estudos, a vibração no ato da solidificação também produz efeito refinador semelhante ao uso de titânio. Sendo assim, uma das propostas de estudo desse trabalho é analisar se o grau de refinamento dos grãos na solidificação é igual para duas situações e se a intensidade da vibração também exerce influência no tamanho dos grãos formados.

Primeiramente foi decidido que para se avaliar a influencia do tipo de liga e do uso de vibração, iria se fixar alguns parâmetros e variar outros.

Foi escolhida como uma variável, a composição química da liga, sendo elas Alumínio puro e Al-Ti.

Outra variável é a solidificação estática e solidificação com vibração, onde foi escolhida as vibrações de 10Hz e 90Hz.

**Tabela 1 - Quadro de Cruzamento das Variáveis em Questão**

|                                      | Liga Al-Ti | Alumínio Puro |
|--------------------------------------|------------|---------------|
| Solidificação sem Vibração           | <b>A</b>   | <b>X</b>      |
| Solidificação com Vibração de (10Hz) | <b>B</b>   | <b>Y</b>      |
| Solidificação com Vibração de (90Hz) | <b>C</b>   | <b>Z</b>      |

Fonte: O Autor

- Experimento A: Uso da liga Al-Ti com solidificação estática.
- Experimento B: Uso da liga Al-Ti com solidificação utilizando vibração de 10Hz.
- Experimento C: Uso da liga Al-Ti com solidificação utilizando vibração de 90Hz.
- Experimento X: Uso do Alumínio puro com solidificação estática.

- Experimento Y: Uso do Alumínio puro com solidificação utilizando vibração de 10Hz.
- Experimento Z: Uso do Alumínio puro com solidificação utilizando vibração de 90Hz.

Será seguido o processo normal de fundição descrito passo a passo abaixo:

- 1) Projeto da peça
- 2) Escolha da liga a ser fundida
- 3) Fusão da Liga
- 4) Vazamento do metal na forma líquida
- 5) Solidificação do metal
- 6) Desmoldagem
- 7) Retirada de rebarbas
- 8) Peça encaminhada para acabamento final
- 9) Preparação das amostras

Após seguidos os passos e o seu acabamento final já estiver completo, serão finalmente feitos ensaios mecânicos com cada peça para avaliar quais propriedades sofreram alteração com a variação de cada parâmetro citado durante o processo de fundição. A análise da microestrutura também será feita após o acabamento final, para que se possa concluir o que ocorreu com o tamanho do grão e com a macro e microestrutura em geral.

#### **4.1. Equipamentos Utilizados**

- Forno (utilizado para transformar o metal sólido em metal líquido)
- Pirômetro (utilizado para medir a temperatura real do metal líquido no forno)
- Balança (Para pesar a quantidade de alumínio a ser fundido)
- Lingotéria, Molde metálico (utilizado para vazar o material líquido dando origem a corpos de prova)
- Peneirador (utilizado como aparelho de vibração)
- Torno Universal (Para preparo da amostra que iria ser feita a análise química)
- Foundry – Master Xpert (Aparelho de análise química, utilizado para saber a composição de cada liga usada).
- Máquina de serrar (utilizada para dividir os corpos de prova ao meio)

- Fresa (utilizada acabamento dos corpos de provas e deixar a peças planas para que possa ser feito análise de micro dureza).
- Máquina de corte (usada para cortar um pequeno pedaço de cada peça para que possa ser feito o embutimento).
- Politriz (utilizada para lixar e polir as amostras).
- Microscópio eletrônico (Para análise da microestrutura das amostras)
- Máquina de EDX (Usado para saber a composição química pontual)
- Micro Hardness Tester - HMV (Equipamento usado para o Ensaio de Microdureza)

## 4.2. Procedimentos

Todo o trabalho experimental foi desenvolvido nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Materiais, no campus I do CEFET-MG. A preparação da liga foi realizada no laboratório de Fundição, sob auxílio e supervisão do orientador. A preparação da amostra para análise metalográfica e microscopia ótica foi realizada no laboratório de Metalografia. Por fim, a microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi desenvolvida no laboratório de Caracterização e Microscopia.

### 4.2.1. Fundição

A fundição do material foi realizada em um forno a gás GLP de cadinho, marca Grion. O metal foi vazado à uma temperatura de 693°C.

**Figura 2. Forno a gás utilizado na fundição do material**



Fonte: O Autor

Uma estrutura com 3 moldes metálicos foi montada para que no ato do vazamento se perdesse o a menor quantidade de calor possível e desta forma, garantisse mesmas condições de vazamento do metal.

**Figura 3. Estrutura onde o metal será vazado**



Fonte: O Autor (2015)

Para que as mesmas condições de experimento fossem garantidas, foi utilizado apenas a cavidade central do molde metálico e com o auxílio de um pirômetro a temperatura de vazamento para ambos os experimentos foram a mesma 693°C.

**Figura 4. Pirômetro na temperatura de Vazamento**



Fonte: O Autor

**Figura 5. Pirômetro utilizado no experimento**



Fonte: O Auto

Após ocorrer o vazamento, o metal liquido vazado foi condicionado a 5 minutos de vibração até se solidificar, o primeiro grau de vibração foi de 10Hz e o segundo foi de 90Hz. Foram escolhidos esses valores para que houvessem situações extremas de possíveis níveis de vibração.

Antes de o metal liquido ser vazado, foi feito um teste com água para que se analisasse o comportamento de um líquido sob o efeito da vibração na estrutura montada, com o intuito de minimizar erros e obter melhores resultados.

**Figura 6. Estrutura de vibração utilizada para o experimento**



Fonte: O Autor

**Figura 7. Peneirador usado como aparelho de vibração à 10 e 90 Hertz**



Fonte: O Autor

#### 4.2.2. Análise Química

Pouco antes do vazamento do metal líquido, foi retirado de uma pequena amostra da liga para comprovar se o metal realmente possui a composição desejada. Para preparação da amostra foi usado um torno universal e para análise química foi usado o espectrômetro de emissão ótica modelo Foundry Master Xpert da Oxford Instruments.

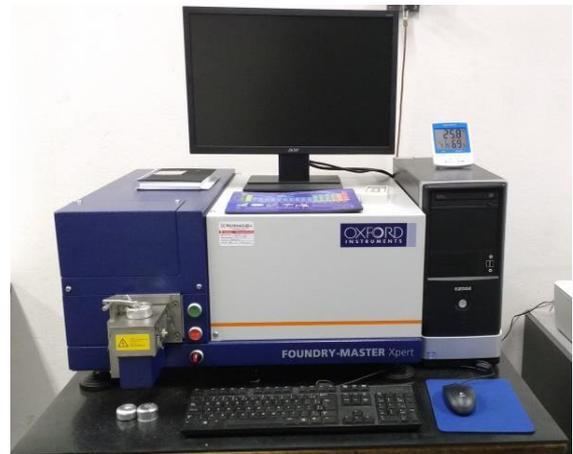
A necessidade desta etapa no processo é garantir que estamos realmente trabalhando com o liga desejada. Uma vez que obtemos uma composição química da liga podemos dar procedimento ao vazamento e as etapas subsequentes.

**Figura 8. Torno Universal**



Fonte: O Autor

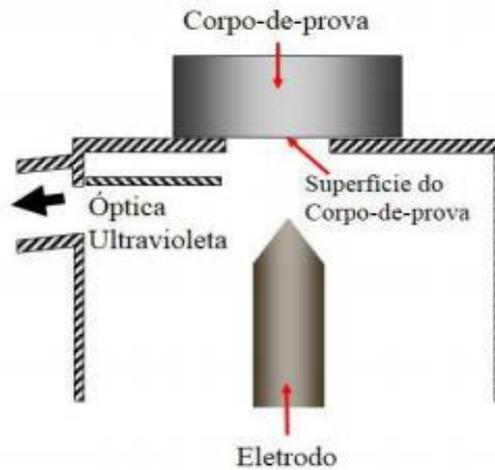
**Figura 9. Máquina de Análise Química**



Fonte: O Autor

Conforme Silva (2013), o espectrômetro permite a identificação dos elementos presentes no material através da excitação do corpo de prova por meio de uma tensão elétrica. Foram realizadas duas queimas no corpo de prova e, a média aritmética das composições encontradas em cada uma das queimas, indica a composição química do material.

Figura 10. Representação esquemática do funcionamento do espectrômetro de emissão ótica



Fonte: (Silva e Boing - 2013)

Espectrômetro de emissão ótica forneceu os seguintes resultados das composições químicas:

- **Liga Al-Ti:**

Tabela 2 – Resultados obtidos pela análise química da amostra

|              | Al     | Si     | Fe     | Cu     | Mn     | Mg     | Zn     | Cr     |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1            | 96,6   | 1,84   | 0,592  | 0,195  | 0,119  | 0,249  | 0,119  | 0,01   |
| 2            | 96,8   | 1,76   | 0,572  | 0,188  | 0,116  | 0,24   | 0,107  | 0,0105 |
| 3            | 96,8   | 1,82   | 0,513  | 0,179  | 0,113  | 0,238  | 0,085  | 0,0101 |
| <b>Média</b> | 96,7   | 1,81   | 0,559  | 0,187  | 0,116  | 0,242  | 0,104  | 0,0102 |
|              |        |        |        |        |        |        |        |        |
|              | Ni     | Ti     | Be     | Ca     | Li     | Pb     | Sn     | Sr     |
| 1            | 0,0145 | 0,161  | 0,0001 | 0,022  | 0,0001 | 0,0224 | 0,0005 | 0,0009 |
|              | 0,0121 | 0,159  | 0,0001 | 0,0019 | 0,0001 | 0,0221 | 0,0005 | 0,0009 |
| 3            | 0,0096 | 0,186  | 0,0001 | 0,0018 | 0,0001 | 0,0204 | 0,0005 | 0,0009 |
| <b>Média</b> | 0,0121 | 0,168  | 0,0001 | 0,002  | 0,0001 | 0,0216 | 0,0005 | 0,0009 |
|              |        |        |        |        |        |        |        |        |
|              | V      | Na     | Bi     | Zr     | B      | Ga     | Cd     | Co     |
| 1            | 0,0194 | 0,0007 | 0,0008 | 0,0019 | 0,0001 | 0,0117 | 0,0004 | 0,0073 |
| 2            | 0,0186 | 0,0007 | 0,0008 | 0,0018 | 0,0001 | 0,0115 | 0,0018 | 0,0054 |
| 3            | 0,0202 | 0,0007 | 0,0008 | 0,0017 | 0,0001 | 0,0122 | 0,0029 | 0,0033 |
| <b>Média</b> | 0,0194 | 0,0007 | 0,0008 | 0,0018 | 0,0001 | 0,0118 | 0,0017 | 0,0053 |
|              |        |        |        |        |        |        |        |        |
|              | Ag     | Hg     | In     | Sb     | P      | Ce     | La     |        |
| 1            | 0,0009 | 0,001  | 0,0034 | 0,005  | 0,002  | 0,0009 | 0,0066 |        |
| 2            | 0,001  | 0,0011 | 0,0017 | 0,005  | 0,0045 | 0,0006 | 0,0055 |        |
| 3            | 0,0008 | 0,0023 | 0,0007 | 0,005  | 0,0038 | 0,0006 | 0,0047 |        |
| <b>Média</b> | 0,0009 | 0,0011 | 0,0019 | 0,005  | 0,0028 | 0,0006 | 0,0056 |        |

Fonte: O autor

- **Liga Alumínio Puro:**

**Tabela 3 – Resultados obtidos pela análise química da amostra**

|              | <b>Al</b> | <b>Si</b> | <b>Fe</b> | <b>Cu</b> | <b>Mn</b> | <b>Mg</b> | <b>Zn</b> | <b>Cr</b> |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>1</b>     | 97,8      | 0,498     | 0,503     | 0,132     | 0,115     | 0,508     | 0,197     | 0,0194    |
| <b>2</b>     | 97,8      | 0,481     | 0,463     | 0,15      | 0,121     | 0,665     | 0,15      | 0,0152    |
| <b>3</b>     | 97,6      | 0,495     | 0,467     | 0,156     | 0,125     | 0,681     | 0,153     | 0,0159    |
| <b>Média</b> | 97,7      | 0,491     | 0,478     | 0,146     | 0,12      | 0,681     | 0,166     | 0,0168    |
|              |           |           |           |           |           |           |           |           |
|              | <b>Ni</b> | <b>Ti</b> | <b>Be</b> | <b>Ca</b> | <b>Li</b> | <b>Pb</b> | <b>Sn</b> | <b>Sr</b> |
| <b>1</b>     | 0,022     | 0,0276    | 0,0004    | 0,0005    | 0,0001    | 0,0528    | 0,0005    | 0,0011    |
| <b>2</b>     | 0,0153    | 0,021     | 0,0004    | 0,0005    | 0,0001    | 0,0718    | 0,0005    | 0,0009    |
| <b>3</b>     | 0,0161    | 0,0205    | 0,0004    | 0,0005    | 0,0001    | 0,0799    | 0,113     | 0,0009    |
| <b>Média</b> | 0,0178    | 0,023     | 0,0004    | 0,0005    | 0,0001    | 0,0681    | 0,0376    | 0,001     |
|              |           |           |           |           |           |           |           |           |
|              | <b>V</b>  | <b>Na</b> | <b>Bi</b> | <b>Zr</b> | <b>B</b>  | <b>Ga</b> | <b>Cd</b> | <b>Co</b> |
| <b>1</b>     | 0,0078    | 0,0015    | 0,0008    | 0,0036    | 0,0007    | 0,0126    | 0,0003    | 0,0061    |
| <b>2</b>     | 0,0049    | 0,0006    | 0,0008    | 0,0015    | 0,0005    | 0,0091    | 0,0003    | 0,0005    |
| <b>3</b>     | 0,0038    | 0,0004    | 0,0008    | 0,001     | 0,0002    | 0,0093    | 0,0003    | 0,0005    |
| <b>Média</b> | 0,0053    | 0,0008    | 0,0008    | 0,002     | 0,0005    | 0,0104    | 0,0003    | 0,0021    |
|              |           |           |           |           |           |           |           |           |
|              | <b>Ag</b> | <b>Hg</b> | <b>In</b> | <b>Sb</b> | <b>P</b>  | <b>Ce</b> | <b>La</b> |           |
| <b>1</b>     | 0,0017    | 0,001     | 0,0133    | 0,0862    | 0,0046    | 0,0016    | 0,0019    |           |
| <b>2</b>     | 0,0012    | 0,001     | 0,0005    | 0,0441    | 0,002     | 0,0006    | 0,0004    |           |
| <b>3</b>     | 0,001     | 0,001     | 0,0005    | 0,0572    | 0,002     | 0,0006    | 0,0002    |           |
| <b>Média</b> | 0,0013    | 0,001     | 0,0044    | 0,0625    | 0,0021    | 0,0006    | 0,0008    |           |

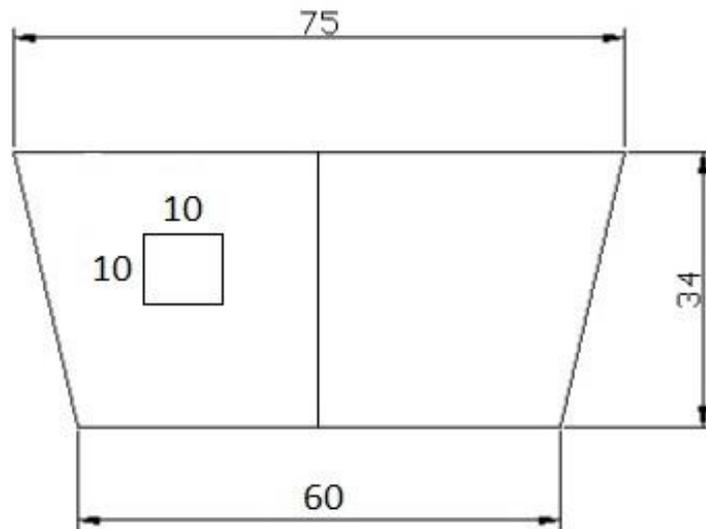
Fonte: O Autor

Somente com base nos dados fornecidos na tabela acima, que foi obtido por meio da análise de composição química é que foi dado continuidade no experimento e afirmando que a liga possui realmente a composição desejada para efetuar determinado fim.

#### 4.2.3. Metalografia

A análise metalográfica foi realizada em seções quadradas de 10mm x 10mm retiradas dos lingotes de A,B,C, com liga Al-Ti e X,Y,Z de Al Puro, conforme apresentado na figura a seguir:

**Figura 11. Demonstração da sessão retirada para análise metalografica**



Fonte: O Autor

As amostras foram preparadas da seguinte forma:

Antes que pudesse ser iniciada a etapa de embutimento, lixamento e polimento, os corpos de provas foram divididos ao meio e uma metade foi encaminhada para uma fresadora para só então voltar para o processo de lixamento e a outra metade foi cortada de forma que obtivessem cubos de 10mm x 10mm conforme a figura acima para que pudesse ser feito o embutimento.

**Figura 12. Equipamento usado para contar os corpos de prova em cubos 10mm x 10mm**



Fonte: O Autor

Figura 13. Fresadora



Fonte: O Autor

- **Embutimento:** foram realizados embutimentos a frio nas 12 amostras, a fim de proteger e proporcionar condições para que o processo de lixamento e polimento pudessem ocorrer. Cada amostra foi colocada em um molde, o qual foi preenchido com resina sintética de polimerização rápida. Lembrando que apenas as peças que foram cortadas em cubos de 10mm x 10mm foram embutidas, as outras metades dos corpos de prova foram fresados como mostra a figura acima e então encaminhadas para a etapa seguinte, o lixamento.
- **Lixamento:** essa operação tem como objetivo eliminar os riscos e marcas mais profundas existentes na amostra provenientes das operações anteriores. A técnica de lixamento consiste em lixar a amostra em lixas com granulometrias cada vez menores, variando a direção em cada lixa subsequente em 90°, até que os riscos da lixa anterior desapareçam. Nesta etapa do experimento foram utilizadas lixas com granulometrias: 80, 120, 220, 320, 400 e 600;
- **Polimento:** posterior ao lixamento, as amostras foram polidas em panos para polimento de materiais não ferrosos, com pasta de diamante, com o intuito de que as amostras fiquem espelhadas. As granulometrias utilizadas foram: 9 $\mu$ m, 3 $\mu$ m e 1 $\mu$ m;

- **Ataque Químico:** Primeiramente foi realizado ataque químico com Keller nas amostras fresadas. O primeiro ataque foi realizado com um algodão embebido no ácido por um tempo de 15 segundos pelo método de fricção, passando o algodão repetidas vezes por toda extensão da peça no sentido da esquerda para a direita, técnica essa apoiada pela literatura, no entanto, não foi revelada de forma muito clara a macroestrutura da amostras, então foram feitos mais 2 ataques de 15 segundos cada e um ultimo ataque de 45 segundos, mas mesmo assim a revelação não foi satisfatória. Sendo assim foi feito um novo estudo e uma nova preparação das amostras para que fosse atacado com outro reagente químico. Nesta segunda tentativa de ataque foi usada uma solução de HF (ácido fluorídrico) pelo mesmo método de fricção, porém com um único ataque de 15 segundos foi revelada a macroestrutura das amostras. Já as amostras embutidas foram atacadas unicamente com o HF pelo método de emersão num tempo de 15 segundos por duas vezes, posteriormente foram lavadas com água, aplicado álcool na superfície e depois secados com o auxílio de um secador.

O Keller usado tem a seguinte composição:

- Acido Fluorídrico 0,5%
- Acido Clorídrico 1,5%
- Acido Nítrico 2,5%
- Agua destilada 100cm<sup>3</sup>

Após todo preparo das amostras, foi feito o uso do microscópio ótico para se obter resultados a respeito da micrografia das amostras. Posteriormente as amostras foram encaminhadas ao laboratório onde se encontra os equipamentos para o ensaio de EDX e MEV para que novos ensaios fossem efetuados. E por ultimo foi realizado o ensaio de micro dureza para verificar se houve variação na dureza do material quando alteramos algumas variáveis no processo.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Análise Macrográfica

Depois de feito o ataque químico com o Keller, não foi obtida nenhuma revelação e as amostras atacadas tiveram que retornar para as ultimas etapas de lixamento e polimento, para que estivessem novamente aptas a receber outro ataque sem o resultado fosse comprometido.

Com a utilização da solução de HF (ácido fluorídrico) os grãos foram revelados e foi possível notar uma mínima diferença no tamanho nos contornos de grão, o que sugere que houve um leve refino à medida que houve variação no processo de solidificação ou então que não houve efeito e as de redução dos grãos nas amostras. A revelação dos contornos de grãos conforme dito só foi possível após o ataque com HF. A revelação não foi como a esperada, mas atendeu as expectativas de forma satisfatória pois foi possível visualizar os grãos das amostras.

#### **Amostra A – Solidificação Estática da liga Al-Ti**

**Figura 14. Amostra A: revelação após o ataque com HF**



Fonte: O Autor (2015)

#### **Amostra B – Solidificação com vibração de 10 Hz da liga Al-Ti**

**Figura 15. Amostra B: revelação após o ataque com HF**



Fonte: O Autor (2015)

### **Amostra C – Solidificação com vibração de 90 Hz da liga Al-Ti**

**Figura 16. Amostra C: revelação após o ataque com HF**



Fonte: O Autor (2015)

### **Amostra X – Solidificação Estática do Alumínio Puro**

**Figura 17. Amostra X: revelação após o ataque com HF**



Fonte: O Autor (2015)

### **Amostra Y – Solidificação com vibração de 10 Hz do Alumínio Puro**

**Figura 18. Amostra Y: revelação após o ataque com HF**



Fonte: O Autor (2015)

## Amostra Z – Solidificação com vibração de 90 Hz do Alumínio Puro

Figura 19. Amostra Z: revelação após o ataque com HF



Fonte: O Autor (2015)

Ao analisar os resultados, constatou-se que não foi possível afirmar que houve alguma influência efetiva da aplicação da vibração ou da incorporação do titânio, pois os resultados foram inconclusivos, o que impossibilita qualquer afirmação.

### 5.2. Análise Micrográfica

Após o ataque com HF as amostras foram em caminhadas para análise no de microscópio eletrônico. Devido ao fato de algumas dificuldades com material e equipamentos na etapa de lixamento e polimento, foi constatado que o lixamento não foi devidamente efetuado, pois as amostras apresentaram riscos pela superfície, porém este fato não comprometeu a análise.

### Amostra A – Solidificação Estática da liga Al-Ti

Figura 20. Amostra A: aumento de 100x

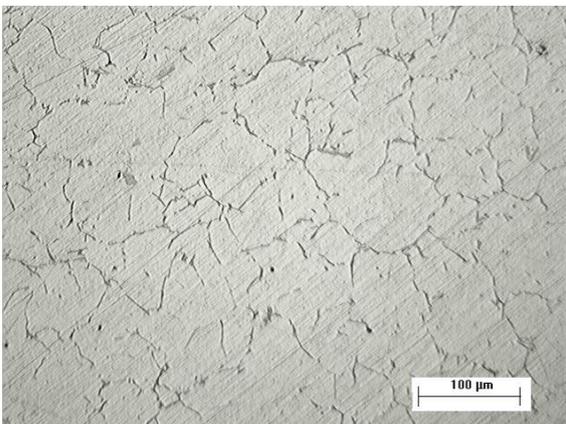
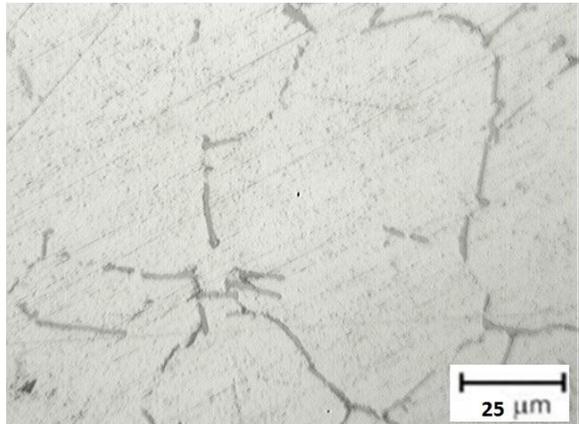


Figura 21. Amostra A: aumento de 400x



### Amostra B – Solidificação com vibração de 10 Hz da liga Al-Ti

Figura 22. Amostra B: aumento de 100x

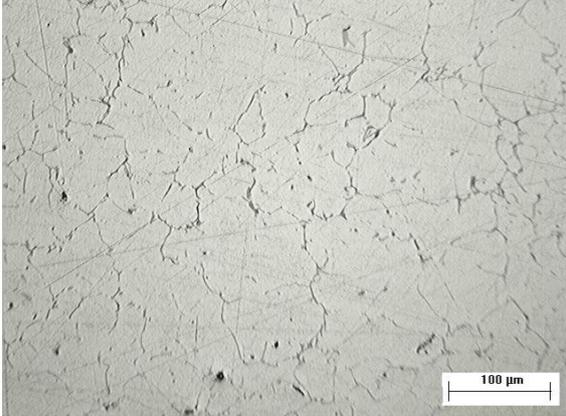
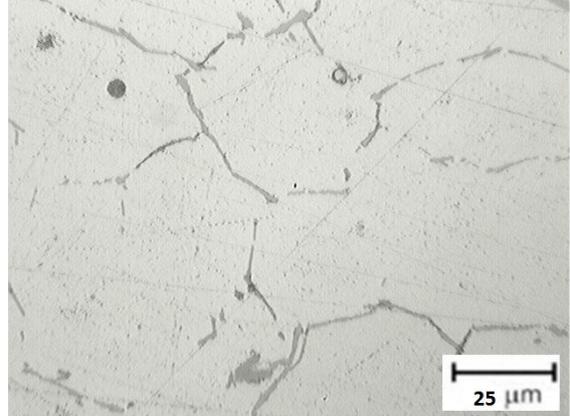


Figura 23. Amostra B: aumento de 400x



### Amostra C – Solidificação com vibração de 90 Hz da liga Al-Ti

Figura 24. Amostra C: aumento de 100x

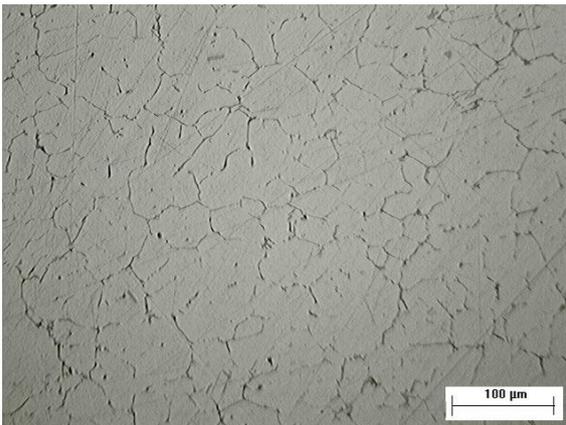
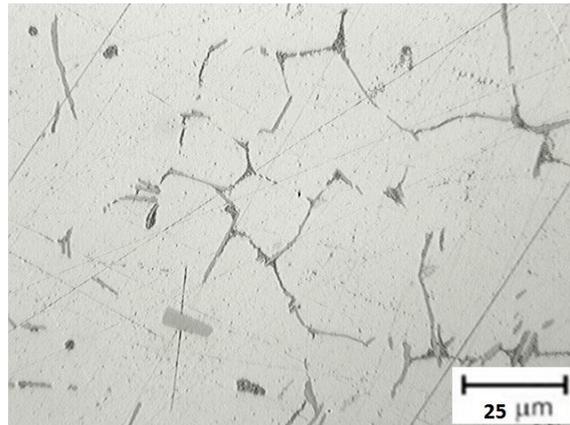


Figura 25. Amostra C: aumento de 400x



### Amostra X – Solidificação Estática do Alumínio Puro

Figura 26. Amostra X: aumento de 100x

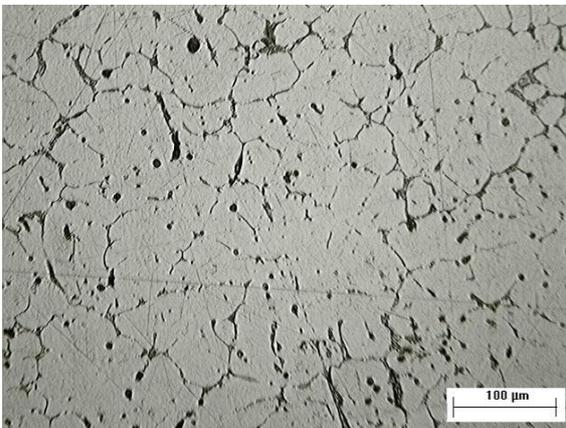
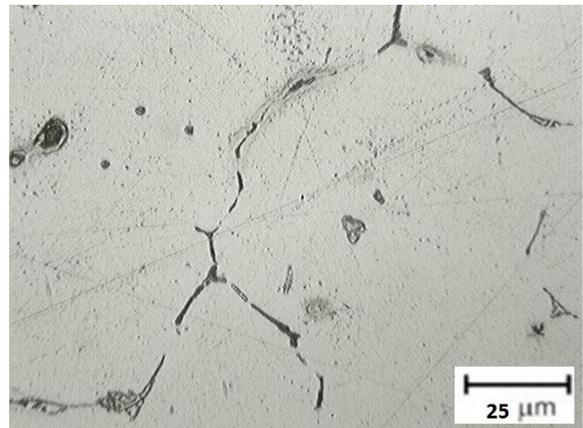


Figura 27. Amostra X: aumento de 400x



### Amostra Y – Solidificação com vibração de 10 Hz do Alumínio Puro

Figura 28. Amostra Y: aumento de 100x

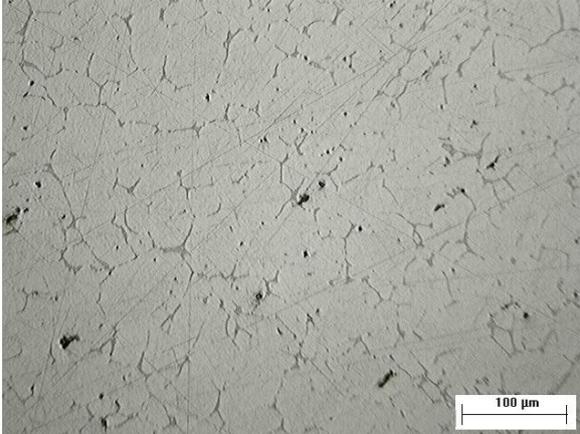
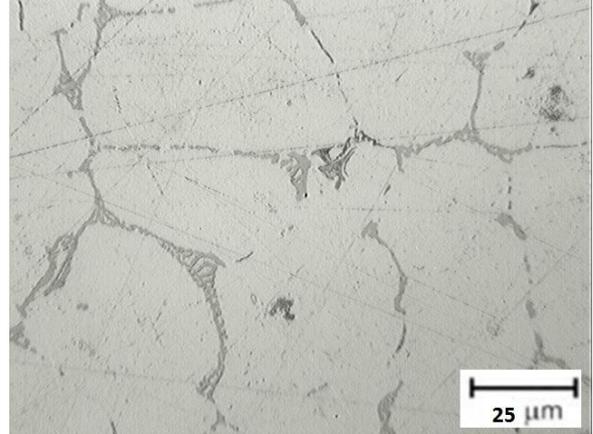


Figura 29. Amostra Y: aumento de 400x



### Amostra Z – Solidificação com vibração de 90 Hz do Alumínio Puro

Figura 30. Amostra Z: aumento de 100x

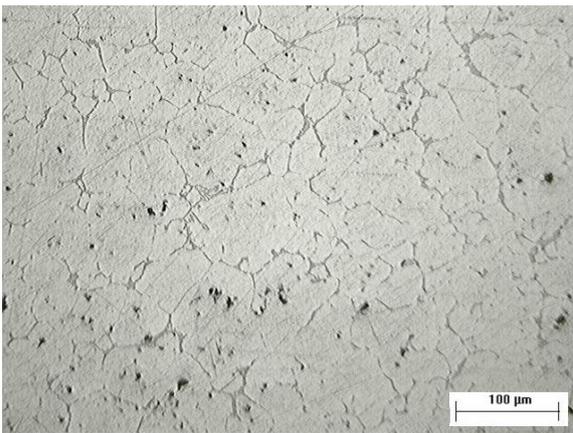
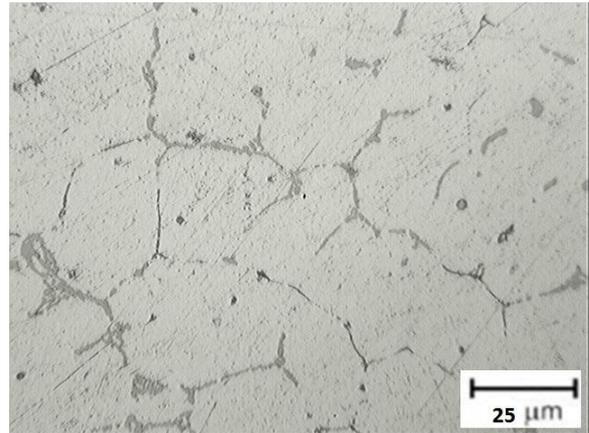


Figura 31. Amostra Z: aumento de 400x



Após obtidos e verificados os resultados da micrografia, infelizmente não foi possível chegar a uma conclusão exata, pois os resultados dessa análise não foram satisfatórios, sendo assim não é possível afirmar nada sobre o tamanho dos grãos e da microestrutura das amostras. Os resultados sugerem que não houve uma variação efetiva na microestrutura. É provável que tenha faltado ataque químico ou que ele tenha sido efetuado de maneira incorreta, fazendo com que não surtisse efeito nas amostras.

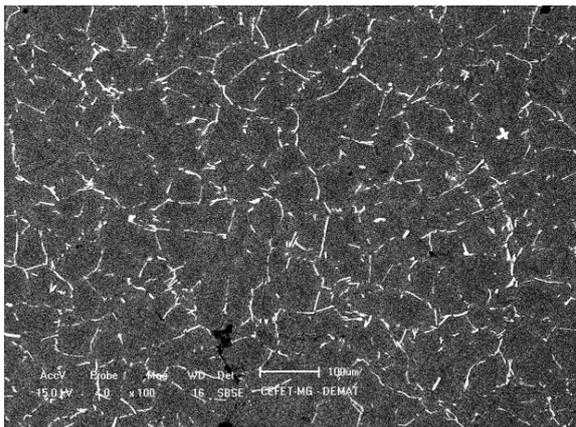
### 5.3. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Ensaio de EDX

O ensaio de EDX tinha o intuito de comprovar de forma pontual a presença de cada elemento presente na amostra. No entanto o elemento de maior interesse não foi

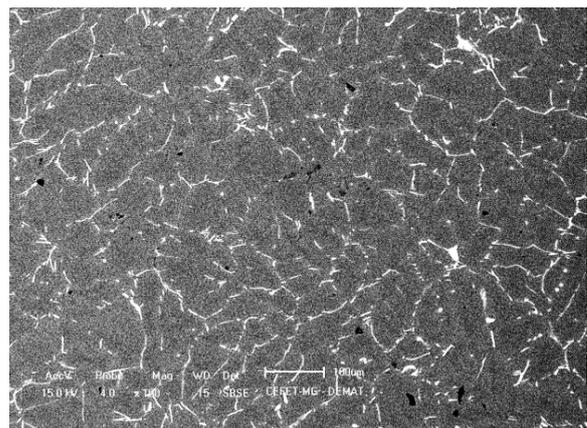
evidenciado nas amostras, o titânio. No eutético foi constatada muita impureza, devido a presença de elementos que migraram para esta região durante o crescimento dos cristais e a solidificação da liga. Foram encontrados os seguintes elementos no eutético: Ferro (Fe), Magnésio (Mg), Silício (Si). Nesta sessão também é apresentada a microestrutura de cada uma das 6 amostras observadas através do MEV. Os resultados obtidos confirmam aqueles esperados através do estudo teórico.

Nas Figuras abaixo podem ser observadas as microestruturas formadas nas amostras através de um microscópio eletrônico de varredura com um aumento de 100x. As estruturas brancas observadas representam o eutético e a estrutura escura formada por elas é o grão.

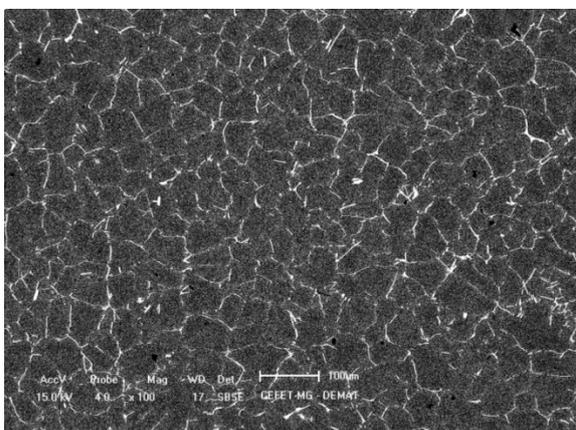
**Figura 32. Amostra A: aumento de 100x**



**Figura 33. Amostra B: aumento de 100X**



**Figura 34. Amostra C: aumento de 100X**



**Figura 35. Amostra X: aumento de 100X**

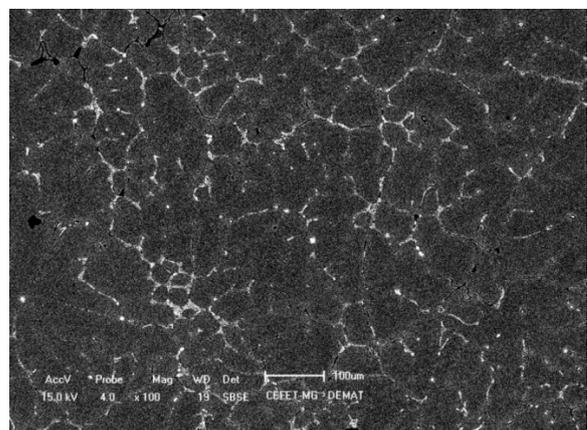


Figura 36. Amostra Y: aumento de 100X

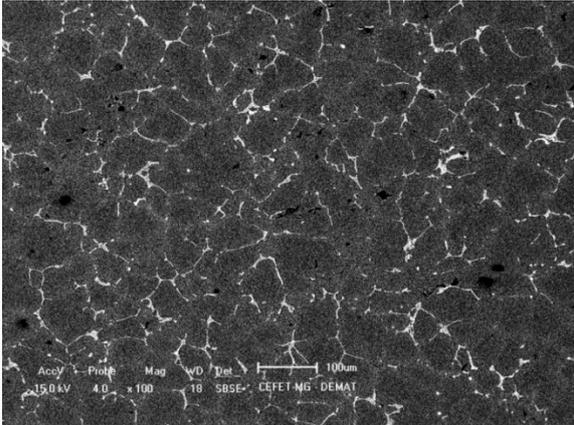
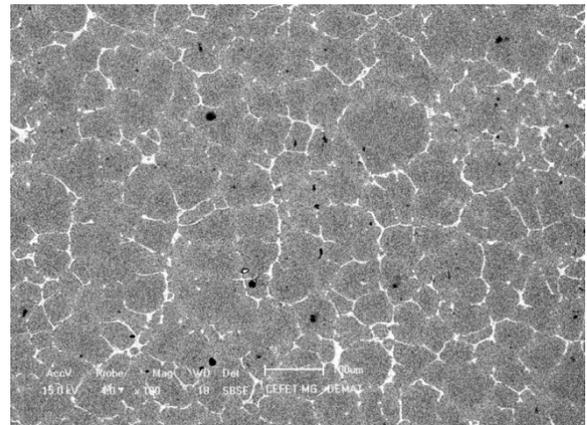


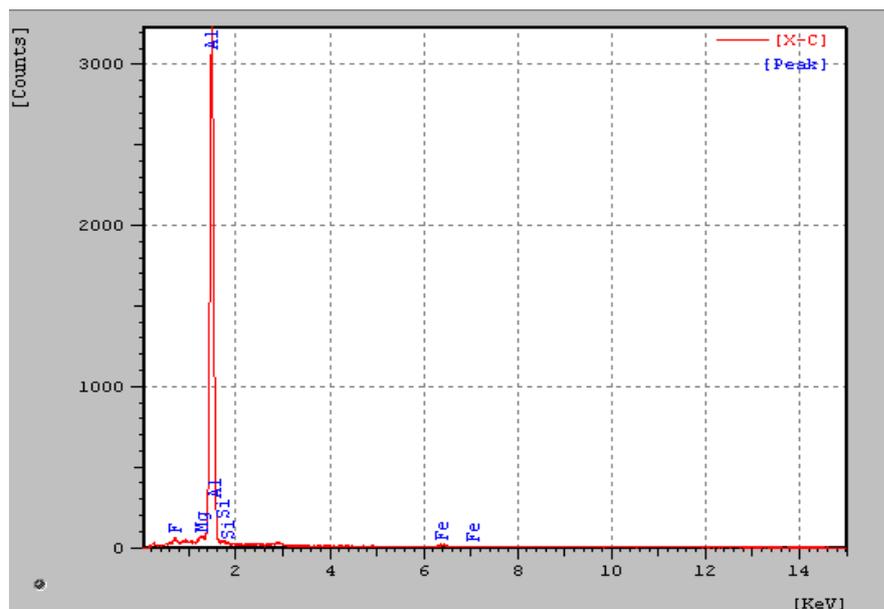
Figura 37. Amostra Z: aumento de 100X



Similar aos ensaios anteriores, com os resultados obtidos através do MEV, não foi possível tirar conclusões a respeito da microestrutura, pois nota-se que a variação da microestrutura das amostras foi mínima, o que sugere que o efeito das variáveis aplicadas no processo ou foi nulo ou muito pequeno, impossibilitando fazer qualquer afirmativa.

A Figura 38 mostra a composição química do eutético visualizada pelo equipamento. Nota-se a presença de um alto teor de Al, e baixo teor de Mg e Si, elementos que eram esperados de encontrar.

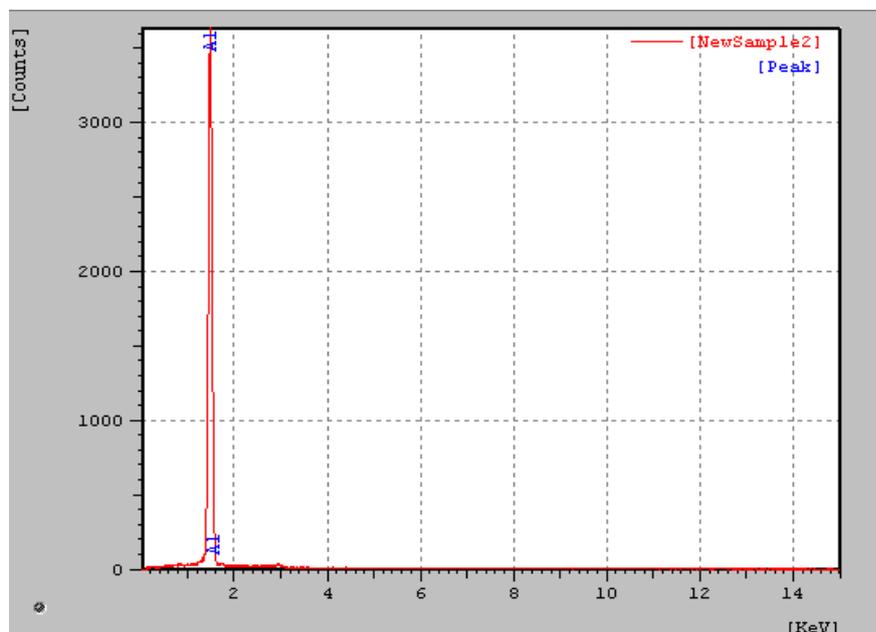
Figura 38. Exemplo de um dos resultados da composição química de forma pontual do contorno de grão



Em todas as amostras do eutético, foram evidenciados basicamente e de forma pontual o mesmo teor de elementos presentes na liga, como Fe, Mg, Si, ou seja, não foi obtido variação destes elementos quando se aplicou diferentes vibrações ou adição de titânio.

A Figura 39 mostra a composição química do grão visualizada pelo equipamento. Nota-se apenas a presença de um alto teor de Al, e por conter um teor baixo de titânio (0,16%) e se tratando de uma análise pontual não foi possível detectar o titânio. Todas as amostras tiveram praticamente a mesma porcentagem de alumínio no grão em si, ate mesmo as que estavam com titânio incorporado na liga.

**Figura 39. Exemplo de um dos resultados da composição química de forma pontual do grão**



#### 5.4. Ensaio de Microdureza

Os resultados obtidos através deste ensaio se apresentaram de certa forma como esperado, uma vez que as amostras com a liga Al-Ti apresentaram maior dureza que as demais amostras com alumínio puro. No entanto com a utilização de vibração no processo de solidificação e posteriormente aumento do grau de vibração a liga Al-Ti foi perdendo dureza, chegando ao ponto das durezas da liga Al-Ti com vibração de 90Hz se igualar a dureza do Alumínio puro solidificado de forma estática.

Tabela 4 – Resultados obtidos através do ensaio de Microdureza das amostras de Al-Ti

|       | Amostra A           |                      | Amostra B           |                      | Amostra C           |                      |
|-------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| Teste | Dureza Vickers (HV) |                      | Dureza Vickers (HV) |                      | Dureza Vickers (HV) |                      |
| 1     | 67,7                |                      | 68,3                |                      | 60,3                |                      |
| 2     | 76,7                |                      | 72,2                |                      | 56,4                |                      |
| 3     | 73,2                |                      | 64,1                |                      | 56,4                |                      |
| 4     | 74,3                |                      | 62,4                |                      | 54,9                |                      |
| 5     | 70,7                |                      | 64                  |                      | 54,5                |                      |
| 6     | 73,6                |                      | 64                  |                      | 54,5                |                      |
| 7     | 75,3                |                      | 64                  |                      | 54,5                |                      |
| 8     | 70,2                |                      | 65,6                |                      | 54                  |                      |
| 9     | 70,9                |                      | 63,6                |                      | 50                  |                      |
| 10    | 74,2                |                      | 70,1                |                      | 49,8                |                      |
|       | <b>2,73</b>         | <b>Desvio Padrão</b> | <b>3,24</b>         | <b>Desvio Padrão</b> | <b>3,04</b>         | <b>Desvio Padrão</b> |
|       | <b>72,8</b>         | <b>Média</b>         | <b>65,46</b>        | <b>Média</b>         | <b>54,4</b>         | <b>Média</b>         |

Fonte: O Autor

Tabela 5 – Resultados obtidos através do ensaio de Microdureza das amostras de Alumínio puro

|       | Amostra X           |                      | Amostra Y           |                      | Amostra Z           |                      |
|-------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| Teste | Dureza Vickers (HV) |                      | Dureza Vickers (HV) |                      | Dureza Vickers (HV) |                      |
| 1     | 54,3                |                      | 60,7                |                      | 49,9                |                      |
| 2     | 61                  |                      | 60,7                |                      | 48                  |                      |
| 3     | 58,3                |                      | 59,2                |                      | 46,2                |                      |
| 4     | 54,6                |                      | 53,8                |                      | 50,3                |                      |
| 5     | 56,6                |                      | 51,1                |                      | 53                  |                      |
| 6     | 54,6                |                      | 62,6                |                      | 54,4                |                      |
| 7     | 54,5                |                      | 63,9                |                      | 43,7                |                      |
| 8     | 54,8                |                      | 50,6                |                      | 46,9                |                      |
| 9     | 54,8                |                      | 50,6                |                      | 49,5                |                      |
| 10    | 54,8                |                      | 50,2                |                      | 47,8                |                      |
|       | <b>2,20</b>         | <b>Desvio Padrão</b> | <b>5,57</b>         | <b>Desvio Padrão</b> | <b>3,17</b>         | <b>Desvio Padrão</b> |
|       | <b>55,38</b>        | <b>Média</b>         | <b>56,16</b>        | <b>Média</b>         | <b>48,95</b>        | <b>Média</b>         |

Fonte: O Autor

A respeito do ensaio de Microdureza, os resultados obtidos demonstraram uma variabilidade mínima entre os dados de cada amostra, sendo assim, mais uma vez foi inconclusivo. A diferença entre as Microdurezas não foi significativa, logo não se pode fazer nenhuma afirmativa.

## 6. CONCLUSÃO

A análise dos resultados experimentais apresentados nesse trabalho permitem as seguintes conclusões:

- O titânio não ser evidenciado nas amostras pelo ensaio de EDX, não significa que não estava presente na liga, pois devido ao baixo teor adicionado (apenas 0,2%) é totalmente aceitável a possibilidade que em uma análise pontual ele não seja encontrado, tendo em vista também, o fato de que pela queima na análise química foi comprovada a incorporação do titânio na liga Al-Ti.
- Era esperado que tanto o titânio usado como inoculante e também a aplicação de vibração no processo de solidificação, influenciassem de forma direta no refinamento do tamanho dos grãos, no entanto com os resultados obtidos não foi possível confirmar tal fato.
- De uma forma geral, independente de qual ensaio utilizado, os resultados foram inconclusivos, o que torna qualquer afirmativa a cerca da mudança de microestrutura impossibilitada de ser feita. Sendo assim, uma nova linha de raciocínio para trabalhos futuros deve ser adotada.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os estudos que envolvem microestrutura e propriedades mecânicas da liga Al-Ti e Alumínio puro englobam uma série de variáveis e, sendo assim, não foi possível abordar todas elas, portanto com sugestão temos:

- Submeter as mesmas condições do experimento, porém utilizando o tipo de molde como mais uma das variáveis de processo.
- Repetir os experimentos utilizando uma frequência de vibração intermediária, entre 10 e 90Hz.
- Desenvolver mais ensaios mecânicos para quantificar as propriedades mecânicas da liga e testar se seu desempenho está apto para determinado fim.
- Submeter a liga a tratamentos térmicos visando melhorar as propriedades mecânicas encontradas.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASKELAND, D.R., PHULÉ, P.P. **Ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2008. 616 p.

ASSOCIAÇÃO Brasileira do Alumínio. **Ligas**. Disponível em <<http://www.abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/ligas/>>. Acesso em: Out. 2015.

BALDAM, R.L., VIEIRA, E.A. **Fundição: Processos e Tecnologias Correlatas**. 2ª ed. São Paulo: Érica, 2014.

BAST, J., HÜBLER, J. AND DAMMASCHK, C. "Influence of Vibration During Solidification of Molten Metals on Structure and Casting Properties", *Advanced Engineering Materials*, Vol. 6, No. 7, p. 550-554, 2004.

BRADASCHIA, Clovis *et al.* **Fundição de Ligas Não Ferrosas**. 3 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1989.

CALLISTER, William., RETHWISCH, D.G. **Ciência e engenharia de materiais: uma Introdução**. 7ª ed. LTC, 2008

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. 6ª ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1990. 576 p.

COSTA, Erlon. **Metalurgia das ligas de alumínio**. Itaúna: SENAI/CETEF. [199-?]. 81 p. (Apostila do curso técnico de Fundição do Centro Tecnológico de Fundição Marcelino Corradi – CETEF.)

FERREIRA, J. M. **Tecnologia da Fundição**. 3 ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2010.

FILHO, M. P. DAVIES, G. J. **Solidificação e Fundição de Metais e suas Ligas**. São Paulo: LTC, 1978.

FINARDI, J. **Especificações e propriedades e aplicações do alumínio**. Curso de Fundição de ligas não ferrosas. 1ª ed. São Paulo: AMB, 1971.

MULLER, Arno. **Solidificação e análise térmica dos metais**. Porto Alegre: Ufrgs Editora, 2002. 278 p.

OHNO, ATSUMI. **Solidificação dos metais**. Tradutores: Paulo da Silva Pontes, Nivaldo Lemos Cupini. São Paulo: Livr. Ciência e Tecnologia, 1988.

ROHDE, R.A. **Metalografia preparação de amostras**. Outubro, 2010

SAMMARONE, A.N., TAKADA, W.J. **Fundição de alumínio**. São Paulo: IPT, 1983.

SANTOS, A.B.S., BRANCO, C.H.C. **Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares**. São Paulo: IPT, 1991

SILVA, P. S. BOING, D. **Influência do Acabamento da Superfície no Ensaio de Composição Química por Espectroscopia de Emissão Óptica**. Revista da UNIFEFE, v.1, n. 11, jan 2013.

SOARES, Gloria. **Fundição: Mercado, Processo e Metalurgia**. Rio de Janeiro: Coppe/Ufrj, 2000. 116 p.

SOLIDIFICAÇÃO e resfriamento de ligas metálicas. 2. Ed. Belo Horizonte: SENAI, 1987. 63 p. (Publicação Técnica – Fundição, 3; SENAI – MG).

SOUZA B.F. **Processos de Fundição: tipos de processos**. SENAI. 43 slides. Apresentação em Power Point.

VERRAN, G. O. **Estudo da Alimentação de Peças Fundidas em Ligas de Alumínio**. Tese de Mestrado. Porto Alegre: UFRGS, 1986.