

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**AMANDA YUKI SHIMOSAKA**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VIBRAÇÃO EM LIGAS DE AL-CU**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO**

**2016**

AMANDA YUKI SHIMOSAKA

## **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VIBRAÇÃO EM LIGAS DE AL-CU**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – DAMEC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, *Câmpus* Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira.

Orientador: Prof. Dr. Dalmarino Setti

PATO BRANCO

2016

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VIBRAÇÃO EM LIGAS DE AL-CU

Amanda Yuki Shimosaka

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 01/12/2016 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - *Câmpus* Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

---

Prof. MsC. Silvana Patrícia Verona  
(UTFPR)

---

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros  
(UTFPR)

---

Prof. Dr. Dalmarino Setti  
(UTFPR)  
Orientador

---

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros  
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

## DEDICATÓRIA

Dedico este Trabalho de Conclusão de Curso a toda minha família por todo o incentivo, paciência e compreensão nos momentos de ausência quando necessário e aos meus amigos que hoje se tornaram família.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha família por todo suporte e incentivo durante todo meu desenvolvimento profissional e pessoal. Em especial a minha vó Judith por ser a base e estrutura de toda minha família.

Ao Professor Dr. Dalmarino Setti, que sempre esteve disponível para me auxiliar, compartilhar todo seu conhecimento e sem o qual esse trabalho não poderia ser concluído.

Aos professores que fizeram parte da banca avaliadora, Professora MsC. Silvana Verona e ao Professor Dr. Bruno Medeiros, que sempre que necessário tiraram minhas dúvidas e concederam dicas valiosas para melhorar este trabalho.

Ao Vitor Baldin e Gabriel Stockler por todo auxílio com a usinagem.

Aos meus amigos que sempre se fizeram presente e me incentivaram a não desistir.

A Laura por se tornar meu apoio durante todo este tempo de faculdade, e por todo auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

## EPÍGRAFE

*“The only real security that a man can have in this world is a reserve of knowledge, experience and ability.” - Henry Ford*

*“A única real segurança que um homem pode ter neste mundo é uma reserva de conhecimento, experiência e habilidade.” – Henry Ford.*

## RESUMO

SHIMOSAKA, Amanda Y. Estudo do efeito da vibração em ligas de alumínio e cobre. 2016. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

O alumínio tem sido extensivamente utilizado devido a sua boa relação entre custo e benefício, além de ser um metal altamente reciclável. Esses fatores levam a um grande número de estudos para otimizar suas propriedades mecânicas a partir do seu processamento. Um destes estudos é referente a aplicação da vibração durante a sua solidificação. Em sua maioria é possível obter uma microestrutura mais refinada, com menores volumes de porosidades, quando encontrados os pontos ótimos de vibração aplicados. O objetivo deste trabalho é realizar um estudo sobre o efeito da aplicação da vibração em ligas de Al-Cu, com variações nos teores de cobre, durante a solidificação em molde metálico. Também foi objeto de estudo, a relação entre o módulo de *Chvorinov* e a intensidade de vibração aplicada. O vazamento foi realizado a 720 °C em molde tipo Y pré-aquecido em 300 °C, com posterior tratamento térmico de solubilização e precipitação T6. O molde foi posicionado em um suporte onde estava acoplado o dispositivo de vibração pneumático de turbina modelo GT-10 do fabricante MVL. Foram aplicadas pressões de 0,5 bar; 1 bar e 1,5 bar, e outro sem vibração. Foram realizados ensaios de tração de acordo com a norma B557M-10; ensaios de dureza HRF e microdureza HV; determinação de massa específica; análise química e metalografia. Em relação a dureza, ligas com maiores teores de Cu apresentaram maiores valores de dureza, independente da vibração aplicada. Para o ensaio de tração a liga com 1,9%Cu com aplicação de 1 bar de pressão obteve o maior valor para tensão de ruptura (200 MPa) e a maior ductilidade com alongamento de 8,7%. Em relação a variação do módulo, a aplicação da vibração só foi efetiva para os maiores teores de cobre.

**Palavras-chave:** Ligas de Al-Cu; Solidificação; Módulo de *Chvorinov*.

## ABSTRACT

SHIMOSAKA, Amanda Y. Study on the effects of vibration on Aluminium Cooper alloys. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016

Aluminum has been extensively used because of its excellent cost-benefit ratio, as well as being a highly recyclable metal. These factors lead to a significant number of studies to optimize their mechanical properties from their processing. One of these studies refers to the application of vibration during its solidification. For the most part, it is possible to obtain a more refined microstructure, with smaller volumes of porosity, when the optimal points of vibration are found. The objective of this work is to perform a study on the effect of the application of the vibration in Al-Cu alloys, with variations in the copper contents, during the solidification in a metallic mold. The relationship between Chvorinov's modulus and the intensity of applied vibration was also studied. The casting was carried out at 720 °C in pre-heated Y-type 300 ° C, with a subsequent thermal treatment of solubilization and T6 precipitation. The mold was positioned on a stand where the turbine pneumatic vibration device model GT-10 from the manufacturer MVL was coupled. Pressures of 0.5 bar; 1 bar and 1.5 bar, were applied and another sample without vibration. Tension tests were performed according to the B557M-10 standard. Other characterization methods were HRF hardness, HV microhardness, density determination, chemical analysis and metallography. About hardness, alloys with higher Cu contents presented higher values of hardness, regardless of the applied vibration. For the tension test, the alloy with 1.9% Cu with the application of 1 bar of pressure obtained the highest value for tensile strength (200 MPa) and the highest ductility with 8.7% elongation. Regarding the variation of the modulus, the application of the vibration was only valid for the higher copper contents.

**Key-words:** Al-Cu alloys; Solidification; Chvorinov's modulus.

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Tensão de ruptura x Vibração .....	34
Gráfico 2 - Tensão de ruptura x Porcentagem de cobre .....	35
Gráfico 3 - Dureza HRF x Vibração .....	36
Gráfico 4 - Dureza HRF x Percentual de cobre .....	37
Gráfico 5 - Dureza HV x Vibração .....	37
Gráfico 6 - Microdureza HV x Porcentagem de cobre .....	38
Gráfico 7 - Dureza HRF x Posição do módulo.....	44
Gráfico 8 - Microdureza HV x Posição do módulo.....	46

## LISTA DE IMAGENS

Figura 1 - Representação esquemática do crescimento dendritico.....	16
Figura 2 - Modelo para molde permanente Y.....	22
Figura 3 - Configuração do molde e dispositivo de vibração.....	23
Figura 4 - Amostras brutas de fusão.....	24
Figura 5 - Corpos de prova para ensaio de tração.....	25
Figura 6 - Corpos de prova para tração usinados.....	26
Figura 7 - Amostras retiradas do massalote.....	26
Figura 8 - Microdurômetro TH710 - Beijing TIME High Technology Ltda. ....	28
Figura 9 - Fluxograma dos processos realizados.....	30
Figura 10 - (a) Al-10-19; (b) Al-15-22.....	32
Figura 11 - Microestrutura Al-00-57.....	39
Figura 12 - Microestrutura liga Al-05-41.....	40
Figura 13 - Microestrutura Al-10-19.....	40
Figura 14 - Microestrutura da liga Al-15-22.....	41
Figura 15 - Microestrutura da liga Al-05-41 (a) Parte superior; (b) Base do massalote .....	42
Figura 16 - Microestrutura da liga Al-10-41 (a) Parte superior; (b) Base do massalote .....	43
Figura 17 - Microestrutura da Liga Al-00-28: (a) Parte superior; (b) Parte inferior do massalote.....	45
Figura 18 - Microestrutura da Liga Al-10-19: (a) Parte superior; (b) Parte inferior do massalote.....	45
Figura 19 - Microestrutura da Liga Al-15-22: (a) Parte superior; (b) Parte inferior do massalote.....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química das ligas A380.0 .....	21
Tabela 2 - Composição química da liga 295.0 .....	21
Tabela 3 - Composição química das Ligas Al-Cu com variação de módulo de Chvorinov .....	22
Tabela 4 - Parâmetros de vibração .....	24
Tabela 5 - Parâmetros fundição e tratamento térmico .....	25
Tabela 6 - Dimensões corpos de prova de tração.....	25
Tabela 7 - Dados das amostras do massalote .....	27
Tabela 8 - Módulo de <i>Chvorinov</i> .....	27
Tabela 9 - Composição química das ligas de Al-Cu e intensidade de vibração aplicada.....	31
Tabela 10 - Massa específica das ligas Al-Cu.....	32
Tabela 11 - Resultados do ensaio de tração .....	33
Tabela 12 - Média e desvio padrão da tensão de ruptura .....	33
Tabela 13 - Durezas HRF e microdurezas HV .....	36
Tabela 14 - Caracterização Mecânica das ligas de Al-Cu.....	38
Tabela 15 - Composição dos massalotes de ligas com baixo teor de Cobre .....	41
Tabela 16 - Composição dos massalotes 4-5% Cu.....	41
Tabela 17 - Dureza HRF e microdureza HV dos massalotes com 4-5%Cu .....	42
Tabela 18 - Dureza HRF e microdureza HV dos massalotes com baixo cobre.....	43

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>15</b>
2.1 LIGAS DE ALUMINIO - COBRE.....	15
2.2 SOLIDIFICAÇÃO NOS METAIS.....	15
2.3 MÓDULO DE <i>CHVORINOV</i> .....	17
2.4 A VIBRAÇÃO .....	18
2.4 INFLUÊNCIA DA VIBRAÇÃO NA POROSIDADE .....	19
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>21</b>
3.1 MATERIAIS .....	21
3.2 PROCESSAMENTO DAS LIGAS AL-CU.....	22
3.3 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	25
3.3.1 Corpos de Prova para Ensaio de Tração .....	25
3.3.2 Corpos de Prova dos Massalotes.....	26
3.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E MICROESTRUTURAL .....	27
3.4.1 Determinação da Composição Química .....	27
3.4.2 Ensaio Mecânicos .....	27
3.4.3 Determinação da Massa Específica .....	29
3.4.4 Determinação da Microestrutura .....	29
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>31</b>
4.1 ANÁLISE QUÍMICA.....	31
4.2 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA.....	32
4.3 ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO.....	33
4.4 ENSAIOS MECÂNICOS DE DUREZA E MICRODUREZA .....	35
4.4.1 Caracterização Mecânica das Ligas de Al-Cu com Tratamento Térmico T6....	38

4.5 MICROESTRUTURA DAS LIGAS DE AL-CU .....	39
4.6 ENSAIOS DE DUREZA NO MASSALOTE.....	41
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>47</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O estudo do efeito da vibração no processamento de ligas de alumínio é muito recente e busca o conhecimento sobre o efeito deste fator nas propriedades destas ligas durante a solidificação do material, pois é durante esta etapa que o material adquire suas propriedades.

Este tipo de pesquisa se torna importante, pois as ligas de alumínio têm ganhado proporções de aplicação muito grande no mercado, por apresentarem propriedades satisfatórias e custos mais baixos do que outros materiais, além de sua baixa densidade, conseqüentemente, baixo peso.

A indústria de processamento e o estudo de materiais tem grande importância na atual conjuntura mundial, onde há uma preocupação com gastos excessivos e a reciclagem de materiais devido aos problemas ambientais, sendo este último um fator muito benéfico na utilização do alumínio, que possui índice de reciclagem de 100%, podendo reduzir em até 90% a energia necessária para produzir um novo alumínio (THE ALUMINIUM ASSOCIATION, 2016).

Segundo a *The Aluminium Association* (2016) quase 75% de todo alumínio já produzido ainda está em uso. Isto mostra que é muito importante o estudo de novas técnicas de processamento do alumínio. A possibilidade de produzir uma liga de alumínio que ofereça um melhor desempenho mecânico sem adição de elementos químicos não só traz grande benefício ao meio ambiente, como também pode vir a baixar o custo das suas aplicações, que em sua maioria optam por materiais mais caros devido as propriedades mecânicas necessárias. A possibilidade de trabalhar com um material mais barato com melhor desempenho se torna muito atraente.

Para o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso utilizaremos quatro ligas de Al-Cu, com variações de cobre em sua composição. As ligas de Al-Cu são muito utilizadas na fundição e precisam de tratamento térmico para melhorar suas propriedades mecânicas. Um problema na utilização destas ligas é que elas são suscetíveis a formação de micro porosidades (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1990).

Durante todo o processo de solidificação dos materiais possui-se uma solidificação que resulta em um crescimento dendrítico (HENRY; MINGHETTI; RAPPAZ, 1998). A aplicação da vibração durante a solidificação do material pode

acarretar em uma quebra destas dendritas, podendo tornar a matriz com uma granulometria mais refinada, o que pode gerar uma influência na porosidade da matriz em quantidade, distribuição e tamanho. Logo, a vibração pode agir diretamente nas propriedades mecânicas de um material.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste Trabalho de Conclusão de Curso é avaliar as propriedades de ligas de Al-Cu com diferentes teores de cobre solidificadas com diferentes condições de vibração e avaliar a influência da vibração na variação do módulo de *Chvorinov*.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho de conclusão de curso são: (i) determinar os parâmetros de processamento das ligas de Al-Cu, como temperatura de vazamento, amplitude e frequência de vibração; (ii) fundir os corpos de prova das ligas definidas com base no parâmetros de processamento selecionados; (iii) tratar termicamente por solubilização e precipitação T6, os corpos de prova fundidos; (iv) confeccionar os corpos de prova para ensaios mecânicos; (v) realizar os ensaios mecânicos e de caracterização microestrutural.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Na seção dois encontra-se o referencial teórico utilizado como base para o desenvolvimento deste trabalho.

### 2.1 LIGAS DE ALUMÍNIO - COBRE

Ligas de Al-Cu são muito utilizadas na fundição, por possuírem baixa viscosidade; baixo ponto de fusão; altas taxas de transferência de calor; bom acabamento superficial. A adição de cobre em sua composição aumenta seus valores de resistência mecânica e possui máxima solubilidade no alumínio de 5,65% (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1990). Isto ocorre, pois o cobre quando em excesso precipita em forma de partículas duras, como o intermetálico  $\text{CuAl}_2$ , gerando uma microestrutura mais rígida, logo, com maiores valores de dureza (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO, 2011).

As ligas de Al-Cu são denominadas ligas da série 200. O cobre se apresenta como principal elemento de liga, este tipo de liga necessita de tratamento térmico para melhorar suas propriedades mecânicas. Além disso as ligas da série 200 são suscetíveis a formação de microporosidades (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1990).

### 2.2 SOLIDIFICAÇÃO NOS METAIS

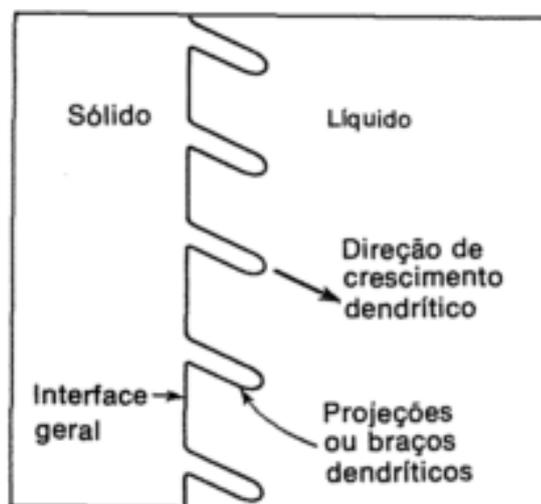
A partir do momento em que o material fundido é vazado em um molde uma série de eventos começam a ocorrer, sendo estes eventos os responsáveis por determinar quais as características microestruturais os materiais irão apresentar. Estas características fornecem as propriedades dos materiais. Os pontos mais significativos para essa caracterização do material são o molde; propriedades térmicas do molde e do material fundido; relação de volume e área superficial; além do formato do molde (KALPAKJIAN, SHIMID, 2009).

Todo material fundido, seja ele puro ou ligado, possui uma linha líquida e uma linha sólida, estas linhas determinam a temperatura em que o material está totalmente líquido e totalmente sólido. Entre estas duas linhas, temos uma variação de temperatura a qual estão presentes fases sólidas e líquidas. A linha líquida fica a uma temperatura acima da linha sólida. Quando a temperatura do material fundido diminui até a temperatura da linha líquida ocorre o início da solidificação do metal, que estará completa quando a temperatura atravessar a linha sólida do material (OHNO, 1988).

A zona em que as fases líquidas e sólidas coexistem é chamada de *mushy zone* ou zona pastosa. A solidificação se inicia nas paredes do molde, os quais, mesmo que pré-aquecidos, normalmente possuem uma temperatura mais baixa que o material fundido, gerando uma maior taxa de transferência de calor (KALPAKJIAN, SHIMID, 2009). Esta diferença entre a taxa de transferência de calor do molde e do material fundido, faz com que a transferência de calor ocorra das paredes do molde para o interior do fundido (REED-HILL, 1973).

Quando a temperatura vai diminuindo, ramos cristalinos vão se formando, os quais são chamados de dendritas colunares ou apenas dendritas. Entre estas dendritas há a presença de líquido (KALPAKJIAN, SHIMID, 2009), como é possível ver na Figura 1.

**Figura 1 - Representação esquemática do crescimento dendrítico.**



Fonte: REED-HILL, 1973.

O crescimento dendrítico é tridimensional, formando ramificações secundárias e terciárias, semelhantes a ramos de árvores. Seu estudo é muito importante pois ele influencia nas variações de composição, segregação e formação de micro porosidades (KALPAKJIAN, SHIMID, 2009).

A quebra dos braços dendríticos favorece o aumento de número de grãos no fundido, pois esta fragmentação forma núcleos adicionais no material. Este processo faz com que haja um refino do grão na microestrutura. Outro fator que favorece o aumento da nucleação é o aumento da taxa de resfriamento do material (REED-HILL, 1973).

### 2.3 MÓDULO DE *CHVORINOV*

O tempo de resfriamento tem grande influência na microestrutura do material fundido. O longo tempo de solidificação, devido à baixa taxa de transferência de calor gera dendritas mais grossas, com espaçamento entre braços maiores, fazendo com que a estrutura seja mais grosseira. Para maiores taxas de resfriamento com tempos de solidificação menores, a estrutura se torna mais refinada, com menores espaçamentos entre os braços dendríticos. Grãos mais refinados acarretam em maiores valores de resistência e ductilidade, além de um menor volume de microporosidades (KALPAKJIAN, SHIMID, 2009).

Este tempo de solidificação pode ser calculado através da Regra de *Chvorinov* que obedece a Equação 1.

$$T_{solidificação} = C * \left(\frac{V}{A}\right)^n \quad (1)$$

Onde C é uma constante referente ao material do molde; propriedades do metal; e temperatura. O valor de *n* varia entre 1,5 e 2 sendo normalmente admitido como 2. O índice *V* indica o valor do volume da porção analisada; *A* indica a área de transferência de calor da porção analisada (KALPAKJIAN, SHIMID, 2009).

## 2.4 A VIBRAÇÃO

Muitos estudos comprovam que a aplicação da vibração mecânica, sônica ou ultrassônica, resulta em muitos efeitos no material, como refinamento de grão, aumento da densidade, desgaseificação, tamanho e distribuição da segunda fase e contração (KOCATEPE, 2007).

Estudos sobre o efeito da vibração durante a solidificação do material foram feitos com ligas de Al-Cu onde foram encontradas alterações na microestrutura e variações de propriedades mecânicas destes materiais. Em um destes estudos foi utilizado molde vibrado de grafite, onde as frequências variaram de 40 a 150Hz. Os autores foram capazes de analisar uma grande variação na microestrutura, gerando um refinamento de grão e uma melhora nas propriedades do material, principalmente em relação a dureza. O aumento destas propriedades é exponencial, logo é possível obter melhorias no material, sem a necessidade de adição de elementos de liga (KUMAR; ANSARI; MISHRA, et al., 2014).

É possível que a vibração auxilie na extração de calor do interior do fundido, sendo esta velocidade de resfriamento proporcional a intensidade da vibração utilizada. Uma estrutura significativamente refinada pode ser obtida quando a vibração mecânica é aplicada logo após a solidificação ter início (GUO; ZHANG; YANG et al., 2014).

Ligas de Al-Si também apresentaram alterações na microestrutura, conseqüentemente nas suas propriedades mecânicas, com uma aplicação de vibração de 100 Hz. Porém, com variação de amplitude entre 18-199  $\mu\text{m}$  é possível perceber que quando se aumenta a amplitude o espaçamento lamelar tende a diminuir, tornando a microestrutura mais fibrosa. Ao chegar na amplitude máxima, o silício tende a endurecer. Até uma amplitude de 149  $\mu\text{m}$  a fragmentação dendrítica aumentou. Com a frequência de 199  $\mu\text{m}$  houve um aumento de tamanho nas porções de dendritas quebradas. Outro ponto importante é o fato de que para todos os corpos de prova vibrados houve um percentual de aumento de alongamento de 9 a 63% (ABU-DHEIR; KHRAISHEH; SAITO et al., 2005).

Estudos realizados sobre a liga de alumínio A356, onde foram analisados os efeitos de uma longa aplicação de vibração mecânica durante o processamento da liga, obtiveram como resultados que tempos maiores que 15 minutos, e frequências

de vibrações maiores do que 50 Hz, geram um maior refino de grão em até 53%, além de elevar a densidade da liga (TAGHAVI; SAGHAFIAN; KHARRAZI, 2009). Outro estudo, também sobre a liga A356, submete a liga em diferentes escalas de vibração mecânica. Os resultados também foram de um refino de grão e grãos mais equiaxiais, para um aumento na frequência de vibração (LIMMANEEVICHITR; PONGANANPANYA; KAJORNCHAIYAKU, 2009).

Quando a análise feita também envolve uma diferença de seção do corpo de prova, variando o módulo de *Chvorinov*, pode-se ver que o efeito da vibração melhora as propriedades mecânicas e a densidade da liga de alumínio A356. A resistência a tração, resistência ao escoamento, alongamento e dureza, principalmente na maior seção do corpo de prova foi de 35%, 42%, 63% e 29%, respectivamente, maior do que nos corpos de prova submetidos ao tratamento térmico T6 (JIANG; FAN; CHEN et Al, 2014).

Ao aplicar uma vibração ultrassônica de 20 kHz durante o processamento da liga A356.0 em molde pré-aquecido a 630 °C a morfologia do eutético se tornou modificada. Houve um refino da fase primária do alumínio e do eutético do silício, o que gerou um aumento na ductilidade do material (JIAN; MEEK; HAN, 2005).

Ao contrário da maioria dos estudos os quais acreditam que a vibração gere uma quebra nos braços dendríticos, acarretando em uma microestrutura mais refinada, para Ohno (1988) existem duas explicações. A primeira delas explica que a vibração faz com que o molhamento da superfície do molde seja aumentada, gerando uma maior extração de calor do material fundido, o que promove a nucleação e o refino do grão micro estrutural. Outra explicação proposta, é que a vibração ocasione a separação dos cristais que são formados nas paredes do molde, dando espaço para formar novos cristais, também gerando o aumento da nucleação, logo, a aplicação desta variável seria mais efetiva no início da solidificação (OHNO,1988).

## 2.4 INFLUÊNCIA DA VIBRAÇÃO NA POROSIDADE

Por mais que o alumínio possua dendritas menores, ele possui grande contração de solidificação, chamado de rechupe, o qual se manifesta em uma grande concentração de porosidade. O rechupe pode ser controlado através da fabricação de

um molde adequado, com sistema de alimentação e massalotes bem dimensionados (MARQUES, 2008).

Outro ponto que faz com que haja o surgimento da porosidade na solidificação do material, são os gases que ficam presos na matriz, pois o alumínio ao se solidificar perde a condição de solubilidade do gás, minimizando sua dissolução, formando bolhas que ficam aprisionadas no componente fundido (CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA, 2016).

A desgaseificação é o meio mais efetivo de reduzir a porosidade do material, sendo normalmente realizada com a utilização de argônio e outros gases que são capazes de absorver o hidrogênio e outras impurezas. As bolhas que estavam aprisionadas se rompem na superfície gerando oxidação do alumínio devido aos gases do forno. Uma alternativa para isto é a vibração ultrassônica para desgaseificar o fundido. Isto faz com que haja uma oscilação de pressão dentro do alumínio fundido, pois gera cavitação e quebra as bolhas de gases em bolhas menores, ficando mais dispersas e facilitando a absorção do hidrogênio (U.S DEPARTMENT OF ENERGY, 2003).

A porosidade no eutético e próximo ao eutético das ligas Al-Si pode ser reduzida com a aplicação da vibração. Esta porosidade depende do pico de aceleração utilizada e seu volume é proporcional ao aumento da amplitude (SHUKLA, D. P. GOEL, D.B. PANDEY, P.C. 1978).

Análises com as ligas LM25 (Al-Si 7,15%) e LM6 (Al-Si 12,30%) vibradas durante a solidificação obtiveram como resultado, para amplitudes de 0.125 mm e frequências acima de 31.7 Hz, um aumento do volume de poros para as duas ligas (KOCATEPE, 2007).

Ligas de Al-5.0Mg; Al-4,5Cu e Al-11,8Si fundidas em moldes de grafite, sem agente desgaseificante, foram submetidas a vibração de 30 a 150 Hz e aceleração de 1-5 g e 5-120 g, respectivamente. Observou-se que a aplicação da vibração durante a solidificação pôde reduzir a porosidade de certas ligas de alumínio. Todavia, isto só ocorre para diferentes picos de aceleração, logo é muito importante um controle dos parâmetros utilizados. Para o caso de ligas de Al-Si eutéticas a aplicação não foi benéfica, visto que neste caso há um aumento da porosidade à medida que a frequência aplicada aumenta. Baixa energia de vibração parece diminuir a porosidade das ligas Al-5.0Mg e Al-4.5Cu, pois esta energia aplicada move as partículas sólidas que impedem que bolhas de gás saiam da matriz (SHUKLA; GOEL; PANDEY, 1980).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão descritos os materiais utilizados para a confecção das ligas de Al-Cu com variações dos teores de cobre e diferentes condições de solidificação. Bem como os métodos utilizados para a realização das análises e caracterização destas ligas.

#### 3.1 MATERIAIS

Os materiais base utilizados para o processamento das ligas, foram as ligas de alumínio A380.0 e a liga 295.0 as quais apresentam as composições apresentadas nas Tabelas 1 e 2.

**Tabela 1 - Composição química das ligas A380.0**

	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ti	Outros total	Al
<b>A380.0</b>	3,66	0,094	0,24	8,6	1,1	1,93	0,02	0,183	83,08

Fonte: Autoria Própria, 2016.

**Tabela 2 - Composição química da liga 295.0**

	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ti	Outros total	Al
<b>295.0</b>	4,12	0,0139	0,0831	1,36	0,55	0,1469	0,0106	0,088	93,65

Fonte: Autoria Própria, 2016.

Foram realizadas duas análises neste trabalho, o primeiro em relação a variação de cobre e a variação da intensidade da vibração e a segunda análise referente a variação do módulo de *Chvorinov* e a intensidade da vibração aplicada.

A primeira análise utilizou quatro ligas de Al-Cu com diferentes teores de cobre. Estas ligas foram obtidas a partir das ligas A380.0 e 295.0, foram realizadas adições de cobre 99,9% puro; alumínio 99% puro e silício 99,9% puro, em diferentes porcentagens. A intensidade da vibração aplicada foi inversamente proporcional as porcentagens de cobre das ligas fundidas, ou seja, quanto maior a intensidade da vibração, menor a porcentagem de cobre na liga.

Para a segunda análise relacionada com a variação de módulo de *Chvorinov* além das ligas confeccionadas para a primeira análise, também foram

utilizadas as ligas apresentadas na Tabela 3. As quais foram processadas com variação de pressão de 1 Bar e 0 Bar, e previamente fundidas nas mesmas condições que foram seguidas neste trabalho.

**Tabela 3 - Composição química das Ligas Al-Cu com variação de módulo de Chvorinov**

	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ti	Outros total	Al
<b>Al-10-41</b>	4,12	0,0139	0,0831	1,36	0,55	0,1469	0,0106	0,088	93,65
<b>Al-00-28</b>	2,82	0,0177	0,0807	1,37	0,58	0,1456	0,0112	0,0919	94,9

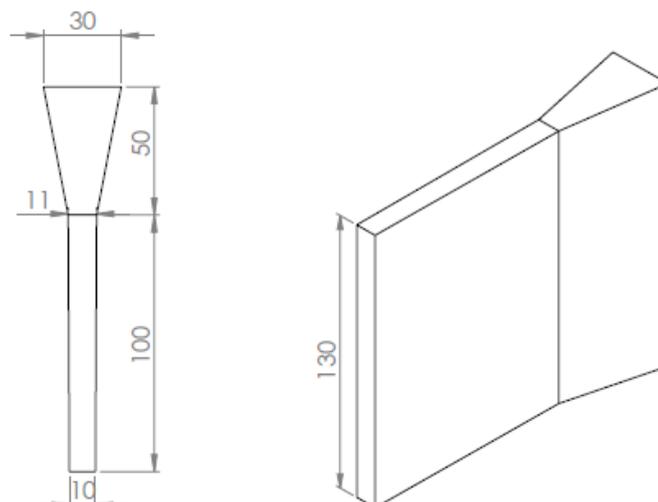
Fonte: Autoria Própria, 2016

### 3.2 PROCESSAMENTO DAS LIGAS AL-CU

Todas as ligas foram fundidas na Universidade Tecnológica Federal do Paraná de Pato Branco, em forno adaptado com cadinho e resistência elétrica, onde a resistência elétrica foi ligada a um controlador de corrente elétrica.

Para o controle das temperaturas de molde e do material fundido foi utilizado termopar tipo J, o qual possui uma faixa de temperatura entre  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $750^{\circ}\text{C}$ , as medições foram feitas constantemente para que não houvesse variações muito grandes de temperaturas no forno. Muito cuidado foi tomado para que os materiais antes de serem fundidos fossem aquecidos a  $300^{\circ}\text{C}$  durante vinte minutos, evitando a presença de umidade no forno de fundição.

**Figura 2 - Modelo para molde permanente Y**

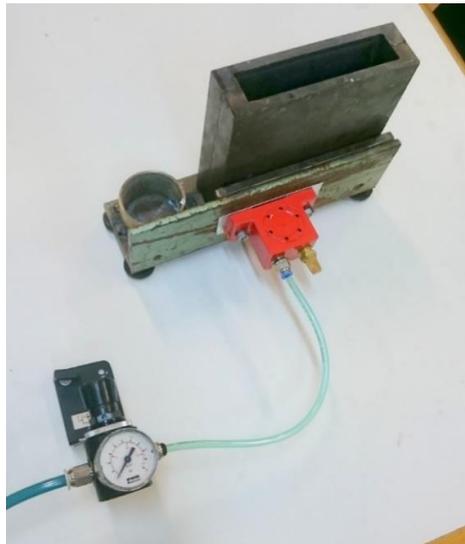


Fonte: Autoria Própria, 2016.

Foi utilizado molde permanente em formato de Y para todas as condições, como mostrado na Figura 2. A escolha deste tipo de molde foi embasada em simulação no *software* SolidCAST versão 8.4.0, o qual possibilitou prever que o molde não causaria defeitos na peça fundida, excluindo o efeito do projeto do molde nas amostras fundidas.

Antes de cada vazamento o molde permaneceu em forno aquecido a 300 °C por no mínimo trinta minutos, para retirar qualquer umidade presente o que além de minimizar o choque térmico entre o fundido e o molde, faz com que a taxa de resfriamento do material vazado seja menor, gerando um tempo maior entre o início e final da solidificação da peça, permitindo maior influência da vibração. O molde foi posicionado em um suporte onde o dispositivo de vibração estava acoplado, como mostra a Figura 3.

**Figura 3 - Configuração do molde e dispositivo de vibração**



**Fonte: Aatoria Própria, 2016.**

O dispositivo de vibração é do tipo turbina pneumática desbalanceada, do fabricante MVL, modelo GT-10, também apresentado na Figura 3, em laranja. Este foi conectado a linha de ar comprimido com auxílio de mangueiras, braçadeira e controlador de pressão, permitindo assim maior controle e variação dos parâmetros utilizados. A fixação do dispositivo no suporte foi cuidadosamente observada para evitar amortecimento da vibração antes desta passar para o molde, o que poderia ocasionar uma amplitude de ação menor do que o esperado.

Foram realizados quatro vazamentos, sendo eles com aplicação de 0,5 bar; 1 bar; 1,5 bar de pressão e um estaticamente. Após o vazamento as amostras solidificaram com influência da vibração durante 3 minutos, garantindo a solidificação final da amostra. As amostras fundidas podem ser vistas na Figura 4.

**Figura 4 - Amostras brutas de fusão**



**Fonte: Aatoria Própria, 2016.**

Como o dispositivo de vibração é pneumático, foram realizados testes para converter os dados de pressão utilizados em parâmetros de vibração, como frequência e amplitude. Isto foi possível com o auxílio de acelerômetro e do *software* Analisador de Vibrações 01dB. A amplitude obtida é em função de G, que indica a aceleração da gravidade. Os valores obtidos são mostrados na Tabela 4.

<b>Tabela 4 - Parâmetros de vibração</b>		
<b>Pressão</b>	<b>Frequência</b>	<b>Amplitude</b>
<b>0,5 bar</b>	70,3 Hz	0,43 G
<b>1 bar</b>	110,74 Hz	1 G
<b>1,5 bar</b>	150 Hz	1,45 G

**Fonte: Software Analisador de Vibrações 01 dB, 2016.**

A fundição foi realizada com os parâmetros apresentados na Tabela 5. Após a fundição foram retirados os massalotes das amostras brutas de fusão, o qual pode ser visto na Figura 2, na parte de cima da amostra. O restante das amostras sofreram tratamento térmico de solubilização e precipitação T6, o qual também é descrito na Tabela 5. Este tipo de tratamento térmico normalmente é utilizado em ligas de alumínio para uma elevação da dureza.

**Tabela 5 - Parâmetros fundição e tratamento térmico**

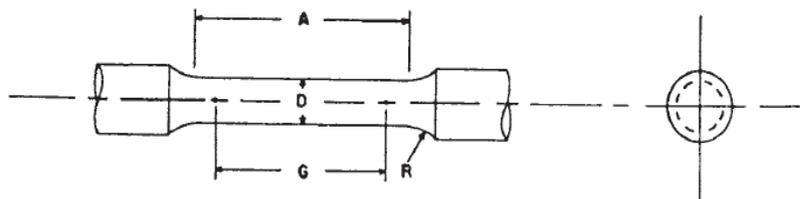
<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Temperatura de vazamento (°C)	720 °C
Temperatura de molde	300 °C
Temperatura (°C) e tempo (h) de T6	520 °C por 12 horas
	150 °C por 4 horas
	Resfriamento em salmoura agitada

Fonte: Aatoria Própria, 2016.

### 3.3 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

#### 3.3.1 Corpos de Prova para Ensaio de Tração

O material bruto de fusão tratado foi dividido em barras e usinados para confecção dos corpos de prova. Foram feitos três corpos de prova para o ensaio de tração. Estes corpos de prova obedeceram a norma B557M-10, e foram usinadas cilíndricamente de acordo com a Figura 5, com auxílio de torno convencional. As dimensões dos corpos de prova segundo a normal B557M-10, são apresentadas de acordo com a Tabela 6. Os corpos de prova devidamente usinados podem ser vistos na Figura 6.

**Figura 5 - Corpos de prova para ensaio de tração**

Fonte: Norma ASTM B557M-10, 2014.

**Tabela 6 - Dimensões corpos de prova de tração**

<b>Indicação</b>	<b>Valores</b>
<b>A</b>	36 mm
<b>D</b>	6 mm
<b>R</b>	6°
<b>G</b>	30 mm

Fonte: Norma ASTM B557M-10, 2014.

**Figura 6 - Corpos de prova para tração usinados**



**Fonte: Aatoria Própria, 2016.**

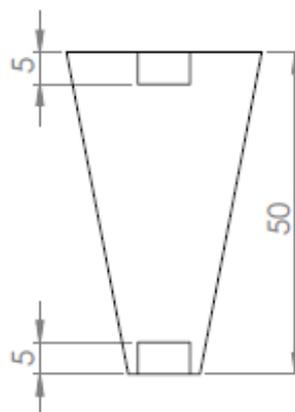
### 3.3.2 Corpos de Prova dos Massalotes

Foram realizados ensaios de dureza e metalografia no massalote para que fosse possível realizar análises com variação de módulo de *Chvorinov*. Do massalote foram retiradas duas amostras, uma da base do massalote e uma da parte superior.

Com o auxílio do banco de dados do *software* SolidWorks versão 2014 foram retirados valores de volume e área de transferência de calor da peça para que fosse possível calcular o módulo de *Chvorinov* da altura qual foram retiradas as amostras. As alturas podem ser vistas na Figura 7.

Os dados de volume e área são mostrados na Tabela 7 e os valores de módulo de *Chvorinov* na Tabela 8.

**Figura 7 - Amostras retiradas do massalote**



**Fonte: Aatoria Própria, 2016.**

**Tabela 7 - Dados das amostras do massalote**

	<b>Volume</b>	<b>Área de transferência</b>
<b>Base</b>	7782,83 mm <sup>3</sup>	1445,45 mm <sup>2</sup>
<b>Superior</b>	19752,83 mm <sup>3</sup>	5712,47 mm <sup>2</sup>

**Fonte: Biblioteca do SolidWorks, 2014.**

**Tabela 8 - Módulo de Chvorinov**

	<b>Módulo</b>
<b>Base</b>	10,9 C
<b>Superior</b>	11,7 C

**Fonte: Aatoria Própria, 2016.**

Como o material do molde é o mesmo, a constante C pode ser admitida como o mesmo valor para todas as ligas. Logo é possível observar que a parte superior do massalote sofreu um resfriamento mais lento que a base do massalote.

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E MICROESTRUTURAL

#### 3.4.1 Determinação da Composição Química

A partir das amostras brutas de fusão, foram realizadas análises químicas para determinar a composição final das quatro ligas utilizadas. A análise foi realizada no equipamento de análise de metais ESPECTROMAXx do fabricante ESPECTRO. Foram realizados testes em duas amostras de cada condição. Em cada amostra foi realizada uma leitura, a qual nos forneceu a média da composição de três queimas.

#### 3.4.2 Ensaio Mecânicos

O ensaio de tração foi realizado na máquina de tração Arotec, com velocidade de 2 mm/s de deslocamento de mesa. Após a realização do ensaio de acordo com a norma B557M-10, foram realizadas medições do alongamento com auxílio de paquímetro. Algumas amostras romperam fora da área útil, impossibilitando

a medição de alongamento do material, destes corpos de prova apenas os valores de carga e tensão de ruptura foram obtidos.

Os ensaios de dureza foram realizados nos corpos de prova com tratamento térmico e no massalote, o qual não sofreu tratamento térmico. Os ensaios de dureza utilizados foram o Rockwell F (HRF), que utiliza uma carga de 60 kg e a microdureza Vickers (HV) a qual foi realizada com carga de 0,49 kgf durante dez segundo. As leituras de microdureza foram realizadas com o microdurômetro modelo TH10 do fabricante *Beijing TIME High Technology Ltda.* como mostra a Figura 8.

**Figura 8 - Microdurômetro TH710 - Beijing TIME High Technology Ltda.**



**Fonte: Autoria Própria, 2016.**

Para os corpos de prova foram realizadas dezoito leituras para dureza HRF e nove leituras HV em cada amostra. Para os massalotes foram realizadas cinco leituras de dureza HRF e nove leituras de microdureza HV em cada amostra. Em todos os casos o maior e o menor valor foram desconsiderados para então fazer o cálculo de média e desvio padrão.

### 3.4.3 Determinação da Massa Específica

Foram realizados ensaios para determinar a massa específica dos materiais, por meio do princípio de Arquimedes. Estes ensaios foram realizados nos laboratórios de química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, em Pato Branco. Onde foram utilizados balança de precisão Mettler Toledo modelo ABS204-S; fio de cobre; béquer com água em temperatura de 23°C e as amostras, as quais eram primeiramente pesadas diretamente na balança. Após pesar a amostra e o fio utilizado, o béquer com água foi colocado na balança e feito a tara da mesma. A amostra presa ao fio foi mergulhada na água de maneira com que não encostasse no béquer. O peso do volume descolado foi obtido. Pela diferença entre os pesos medidos da amostra, e a relação com a massa específica da água, foi possível obter o valor da massa específica das ligas processadas.

### 3.4.4 Determinação da Microestrutura

A análise metalográfica foi realizada de acordo com o procedimento padrão. Primeiramente a amostra foi embutida com a embutidora Fortel EF-30, com a amostra embutida foi realizado o lixamento, na lixadeira e politriz Arotec PLF, com as lixas #120; #220; #600 #1200 e o polimento, com todo o cuidado visando retirar todos os riscos da superfície, o qual foi realizado com pasta de diamante de 0,25 microns em pano próprio e alumina 0,3 microns. Normalmente utiliza-se água como fluido de polimento, mas neste caso, a água foi substituída por álcool etanol, que aos poucos era borrifada no pano de polimento o qual já estava com alumina, para melhorar o acabamento final da amostra. A análise metalográfica foi realizada tanto para amostras obtidas dos corpos de prova tratados termicamente, nas quatro condições, bem como em amostras retiradas dos massalotes, os quais não passaram por tratamento térmico.

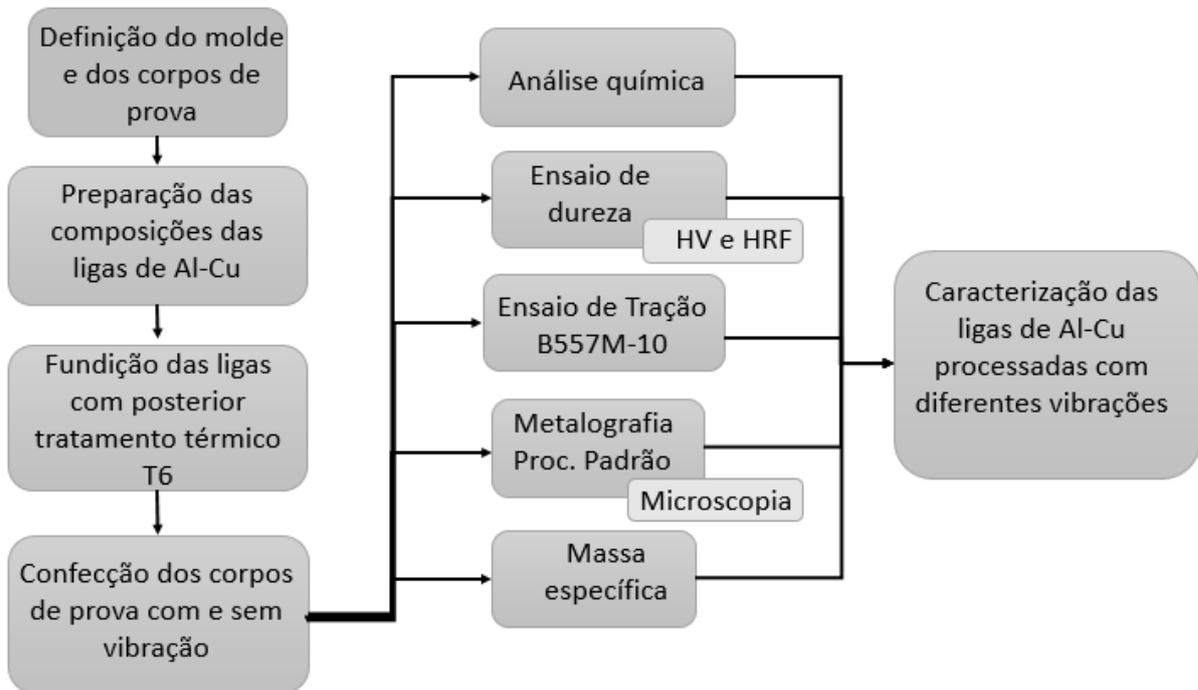
Posteriormente foi realizado o ataque químico em todas as amostras, no caso do alumínio, utilizou-se como reagente a solução de HF a 0,5%. Este reagente tem como função permitir a visualização de contornos de grão e diferenças de fase na microestrutura, permitindo também a visualização dos poros na matriz. Antes da realização do ataque foi realizada a limpeza da amostra em água e sua secagem

ocorreu com auxílio de secador, evitando contato de papel ou algodão na amostra. O ataque faz com que as diferentes fases da microestrutura reajam de forma diferente, permitindo melhor visualização das mesmas com a utilização de microscópio óptico (ROHDE, 2010).

Para esse trabalho foram realizadas de dez a quinze imagens por amostra, para que fosse possível obter uma melhor visualização da microestrutura, visto que as imagens possuem pequenas dimensões.

A Figura 9 apresenta de forma resumida os passos que foram seguidos para a realização deste trabalho.

**Figura 9 - Fluxograma dos processos realizados**



**Fonte: Autoria Própria, 2016.**

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Seção 4 aborda todos os resultados obtidos através dos métodos apresentados anteriormente. É importante ressaltar que após o final do tratamento térmico T6, antes do resfriamento em salmoura agitada, já foi possível observar que as amostras de 0 bar e 0,5 bar sofreram variação dimensional, surgimento de trincas e empenamento, prejudicando o número de corpos de prova obtidos.

### 4.1 ANÁLISE QUÍMICA

Os resultados obtidos pelas análises químicas são apresentados na Tabela 9. Além da composição química, a Tabela 9 também apresenta a nomenclatura adotada para cada variação de percentual de cobre.

**Tabela 9 - Composição química das ligas de Al-Cu e intensidade de vibração aplicada**

	Pressão	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ti	Outros total	Al
<b>Al-00-57</b>	0 Bar	5,73	0,01	0,10	1,63	0,56	0,19	0,01	0,07	91,73
<b>Al-05-41</b>	0,5 Bar	4,16	0,01	0,09	1,60	0,59	0,17	0,01	0,10	93,29
<b>Al-10-19</b>	1 Bar	1,97	0,02	0,09	1,60	0,66	0,15	0,02	0,22	95,29
<b>Al-15-22</b>	1,5 Bar	2,28	0,02	0,09	1,60	0,59	0,16	0,01	0,07	95,19

**Fonte: Aatoria Própria, 2016**

Pela Tabela 9 também é possível observar que a intensidade de vibração aplicada é inversamente proporcional a porcentagem de cobre presente na liga.

A nomenclatura adotada relaciona o percentual de cobre com a variação de pressão utilizada para o processamento de cada liga. Ela é apresentada como Al-XX-YY, onde XX indica a variação de pressão aplicada e YY a variação de cobre, ambas multiplicadas por dez. Por exemplo, no caso da liga Al-10-19, ela apresenta uma aplicação de 1 bar de pressão e 1,9%Cu em sua composição.

## 4.2 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA

Os valores médios de massa específica obtidos através do ensaio pelo princípio de Arquimedes, são apresentados na Tabela 10.

**Tabela 10 - Massa específica das ligas Al-Cu**

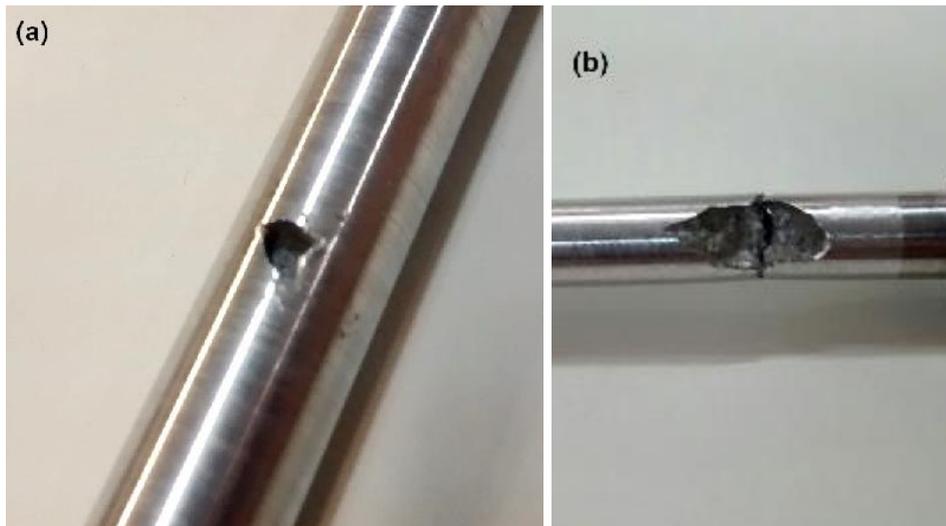
	Al-00-57	Al-05-41	Al-10-19	Al-15-22
<b>Média</b>	2,80	2,75	2,77	2,70
<b>Desvio Padrão</b>	±0,033	±0,045	±0,081	±0,039

**Fonte: Aatoria Própria, 2016**

Como pode ser visto na Tabela 10 as massas específicas variaram entre 2,7 e 2,8 (g/cm<sup>3</sup>). A variação para os valores menores está relacionada com gases presos nas matrizes das ligas, como mostra a Figura 10. Além disso, quando analisamos um teor próximo de cobre, como das ligas Al-10-19 e Al-15-22, podemos perceber que com o aumento da intensidade da vibração, menor a massa específica da liga.

Também é possível perceber pela Tabela 9 que todas as ligas possuem um baixo teor de Si, elemento que confere fluidez para o material fundido, o que não permitiu que a vibração atuasse como agente desgaseificante no processo.

**Figura 10 - (a) Al-10-19; (b) Al-15-22**



**Fonte: Aatoria Própria, 2016.**

### 4.3 ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO

Os resultados de tensão de ruptura e alongamento dos corpos de prova ensaiados na norma B557M-10, são apresentados na Tabela 11, bem como suas médias e desvios padrões na Tabela 12.

**Tabela 11 - Resultados do ensaio de tração**

	<b>Diâmetro [mm]</b>	<b>Tensão [MPa]</b>	<b>Alongamento final [mm]</b>	<b>Alongamento %</b>
<b>AI-00-57</b>	6,000	195,75	30,90	3,0
	6,003	173,32	30,60	2,0
	6,083	217,57	*	*
<b>AI-05-41</b>	6,082	204,97	31,20	4,0
	6,086	158,37	30,55	1,8
	6,010	230,01	31,08	3,6
<b>AI-10-19</b>	6,012	201,68	*	*
	6,084	189,71	32,20	7,3
	6,077	210,05	33,05	10,1
<b>AI-15-22</b>	6,06	188,06	*	*
	6,008	139,43	31,50	5,0
	5,957	187,50	*	*

**Fonte: Aatoria Própria, 2016.**

Os valores de alongamento da Tabela 11 que apresentam asterisco (\*) no lugar do valor romperam fora as área útil do corpo de prova, impossibilitando a medida do alongamento final.

**Tabela 12 - Média e desvio padrão da tensão de ruptura**

	<b>Liga</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>Tensão</b>	AI-00-57	195,55	±22,13
	AI-05-41	197,78	±36,36
	AI-10-19	200,48	±10,22
	AI-15-22	171,66	±27,92

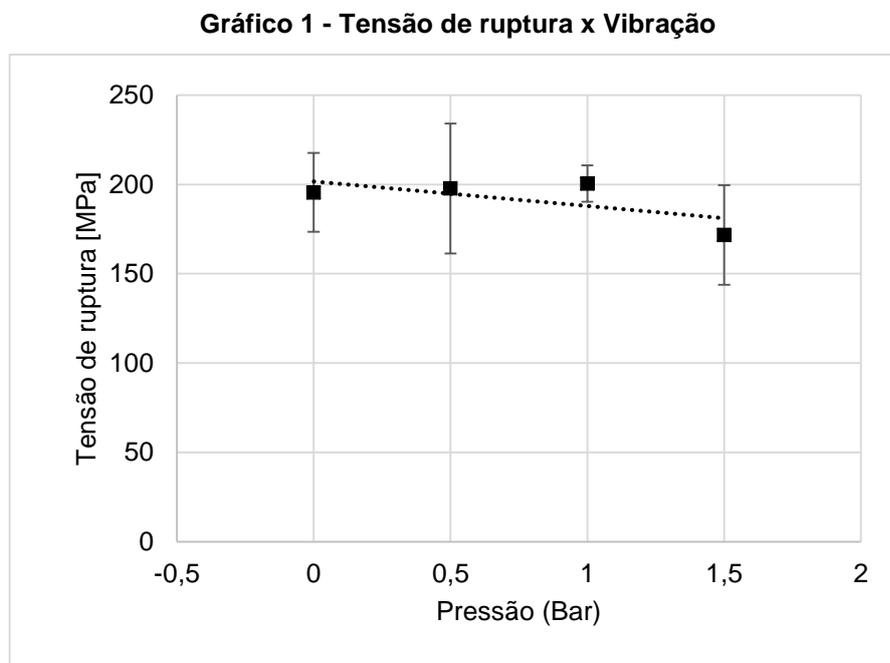
**Fonte: Aatoria Própria, 2016**

Como é possível observar pelas médias apresentadas na Tabela 12, os valores de tensão foram muito próximos, porém, os corpos de prova obtidos com a liga AI-10-19 sofreram um leve aumento na sua resistência a tração do que as demais condições. Além deste aumento na resistência a tração, seu alongamento foi consideravelmente

maior que o alongamento dos demais corpos de prova, o que nos mostra um aumento na ductilidade da liga.

Os corpos de prova obtidos a partir da liga Al-15-22 obtiveram a menor média de tensão, o que pode ser relacionado a grande quantidade de gases encontrados durante a usinagem já mostrados na Figura 10 (b). Para o caso do alongamento, os dados não são muito conclusivos, pois algumas das amostras romperam fora da área útil do corpo de prova, impossibilitando a medição do alongamento final.

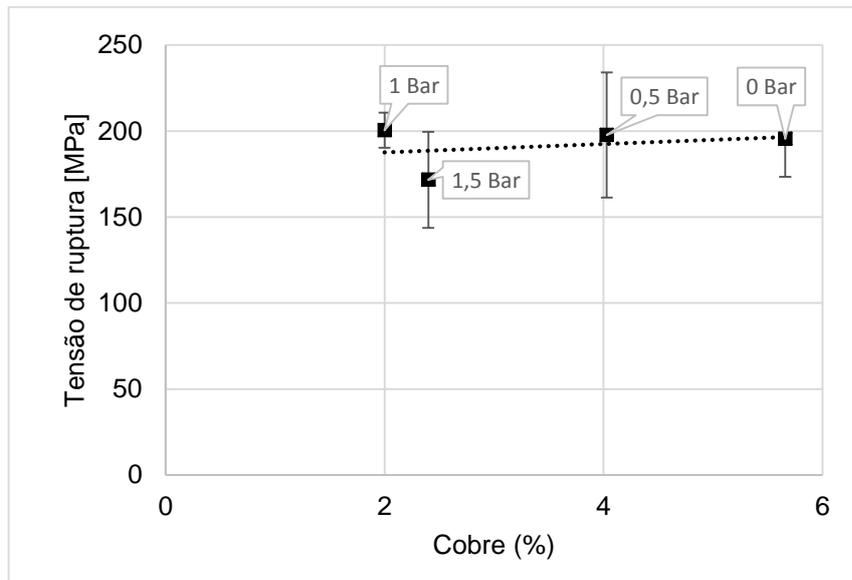
Os valores obtidos das médias e desvio padrão das tensões de ruptura podem ser observados nos Gráficos 1 e 2. O Gráfico 1 mostra a relação entre a tensão de ruptura e intensidade de vibração aplicada.



**Fonte: Autoria Própria, 2016.**

A partir do Gráfico 1 é possível afirmar que não houve muita diferença nos valores de tensão de ruptura para as quatro condições avaliadas, visto que o desvio padrão encontrado faz com que os resultados se sobreponham. Porém é importante ressaltar que quanto menor o desvio padrão mais homogêneas são as propriedades de tensão de ruptura do material, fazendo com que a condição do Al-05-41 não seja uma condição adequada quando a aplicação necessita deste tipo de propriedade.

O Gráfico 2, nos fornece a relação entre a tensão de ruptura e a porcentagem do cobre de cada uma das ligas.

**Gráfico 2 - Tensão de ruptura x Porcentagem de cobre**

Fonte: Aatoria Própria, 2016

Com o Gráfico 2 é possível observar que se aplicarmos uma vibração gerada por 1 bar de pressão, é possível fazer com que uma liga que apresente 1,97% de cobre obtenha um maior valor de tensão de ruptura do que uma liga com 5,73% de cobre em sua composição. Isto se torna muito interessante, visto que quanto menor a quantidade de elemento de liga de um material menor o seu custo e que maiores porcentagens de cobre melhoram a resistência do material em mesmas condições de processamento. Além disso, se houver uma relação de 4,16% de cobre, que é apresentado na liga Al-05-41 com uma maior condição de vibração o valor de tensão de ruptura possui um grande desvio padrão, não sendo efetiva a aplicação da vibração, que pode prejudicar o desempenho do material.

#### 4.4 ENSAIOS MECÂNICOS DE DUREZA E MICRODUREZA

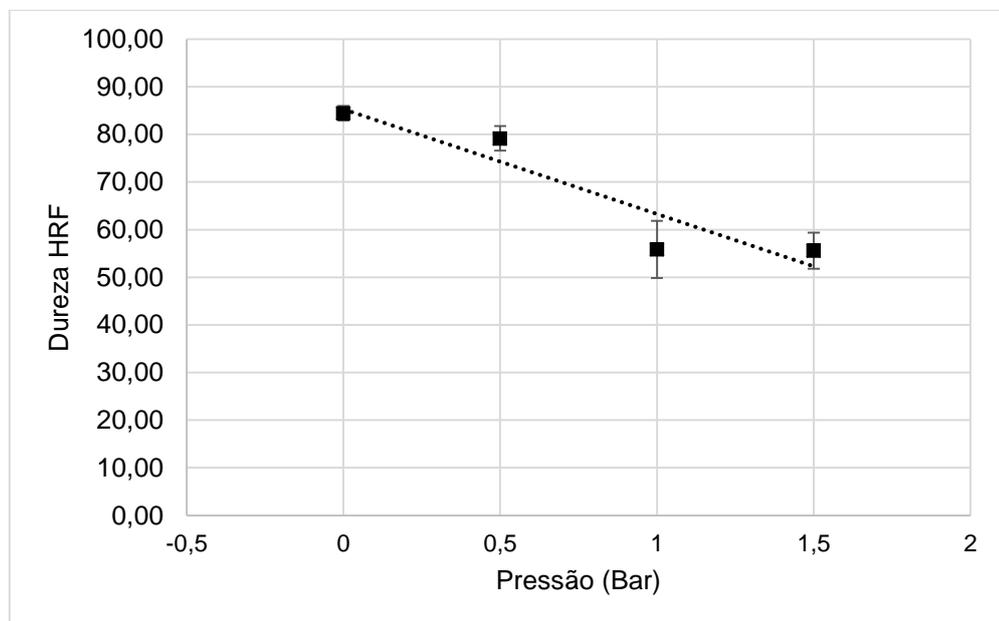
Os resultados médios de dureza Rockwell F (HRF) e microdureza HV obtidos, bem como os desvios padrão são apresentados na Tabela 13.

**Tabela 13 - Durezas HRF e microdurezas HV**

		AI-00-57	AI-05-41	AI-10-19	AI-15-22
<b>HRF</b>	Média	84,43	79,05	56,39	55,63
	Desvio Padrão	1,79	3,21	7,66	4,09
<b>HV</b>	Média	84,03	85,01	56,66	64,52
	Desvio Padrão	10,95	14,90	4,29	1,71

Fonte: Autoria Própria, 2016

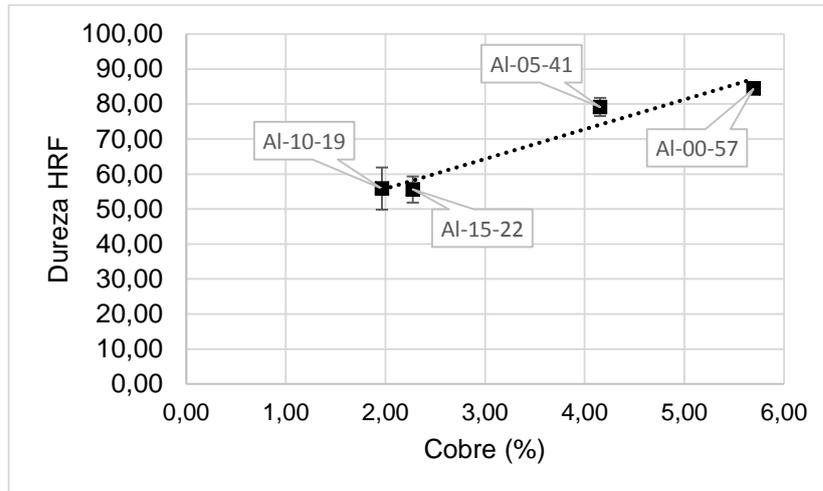
No caso da dureza HRF, os desvios padrão apenas se sobrepuseram nas ligas AI-10-19 e AI-15-22, logo, pode ser admitido que seus valores de dureza HRF são os mesmos, o que pode ser visto melhor no Gráfico 3.

**Gráfico 3 - Dureza HRF x Vibração**

Fonte: Autoria Própria, 2016.

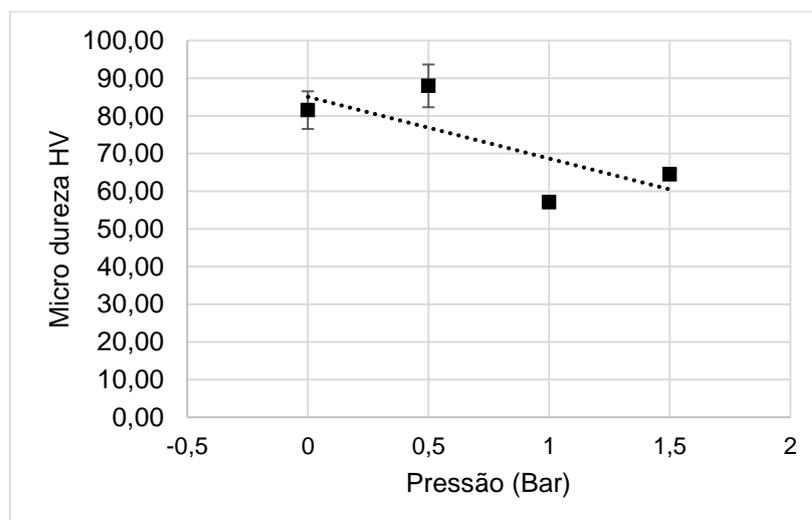
O Gráfico 3 faz a relação entre o valor de dureza obtido com a intensidade de vibração aplicada. A condição do AI-10-19 que apresentou maior valor de tensão de ruptura possui menor valor de dureza, o que o torna resistente a tração e dúctil, o que é uma excelente combinação de propriedades. A condição sem vibração apresentou maiores valores de dureza HRF que os demais materiais, isso ocorre pois a condição sem vibração também é a condição com maiores teores de cobre, elemento que tende a aumentar a resistência das ligas.

O Gráfico 4 apresenta uma relação entre a dureza HRF e a porcentagem de cobre.

**Gráfico 4 - Dureza HRF x Percentual de cobre**

**Fonte: Autoria Própria, 2016.**

Através do Gráfico 4 é possível admitir que a variável porcentagem de cobre ainda é mais efetiva com que a intensidade da vibração aplicada. Logo, quando existe a necessidade de um maior valor de dureza para ligas de Al-Cu é mais pertinente utilizar ligas com maiores porcentagens de cobre do que ligas de baixo cobre com aplicação de vibração no processamento. Apesar das ligas Al-00-57 e Al-05-41 possuírem valores próximos de dureza não é totalmente conclusivo dizer que seja resultado da vibração.

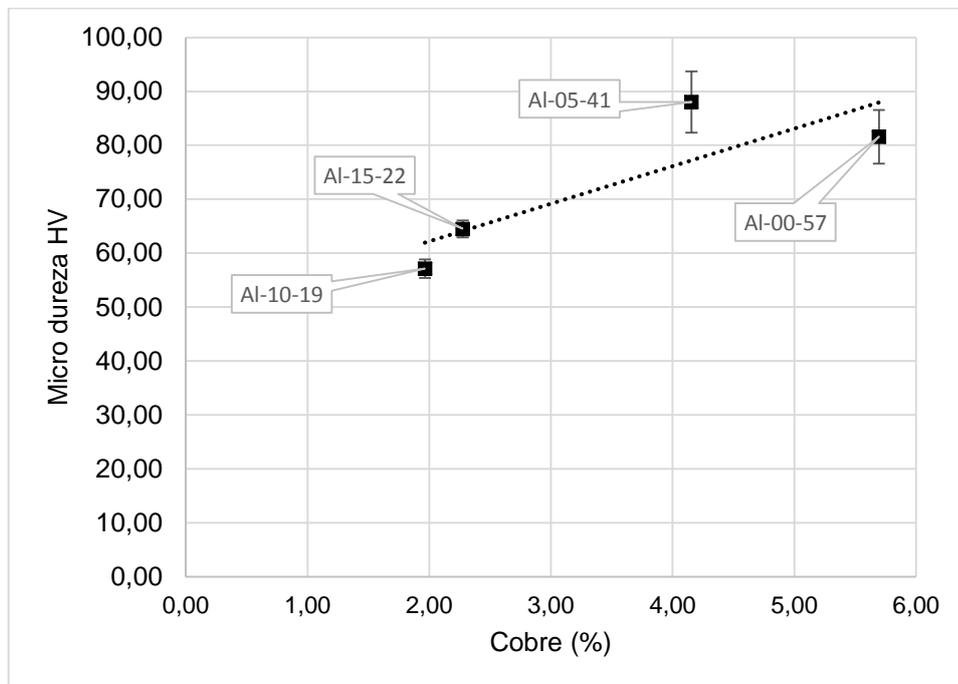
**Gráfico 5 - Dureza HV x Vibração**

**Fonte: Autoria Própria, 2016.**

Para os valores de microdureza HV, apresentados na Tabela 13, observamos que a liga Al-05-41 possui uma maior variação de dureza em sua matriz, seguido do Al-00-57. Seus valores de dureza se sobrepõem devido a suas faixas de valores e desvio padrão, o qual pode ser melhor observado através do Gráfico 5.

Já para a relação entre microdureza HV e porcentagem de cobre, apresentada no Gráfico 6, da mesma forma que a dureza HRF, os valores tendem a aumentar com o aumento da porcentagem de cobre. O desvio padrão mais elevado neste tipo de ensaio é comum, pois ele nos possibilita obter valores de dureza de diferentes fases da matriz, as quais possuem diferentes propriedades.

**Gráfico 6 - Microdureza HV x Porcentagem de cobre**



**Fonte: Autoria Própria, 2016.**

#### 4.4.1 Caracterização Mecânica das Ligas de Al-Cu com Tratamento Térmico T6

A Tabela 14 nos fornece a caracterização das ligas de Al-Cu fundidas em diferentes condições de vibração.

Tabela 14 - Caracterização Mecânica das ligas de Al-Cu

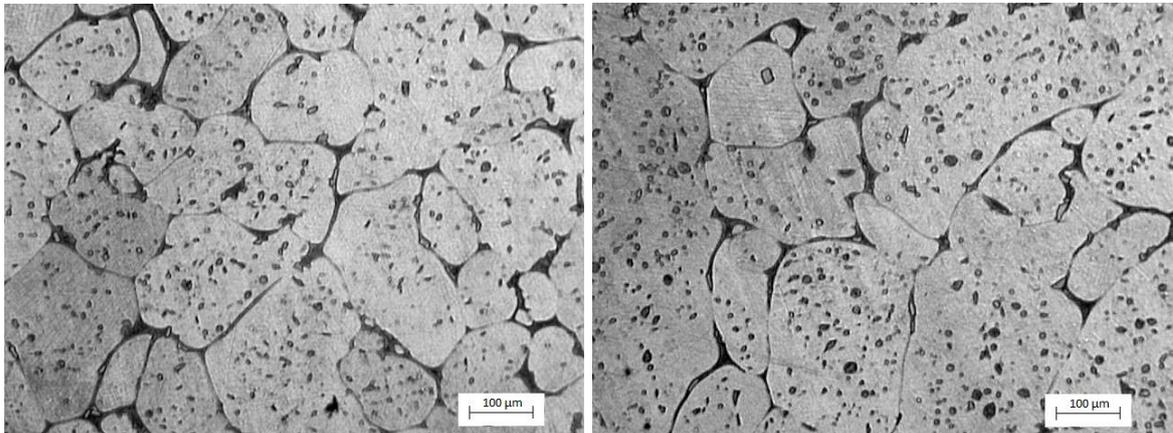
	Tensão de ruptura [MPa]	Dureza HRF	Microdureza HV	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Alongamento %
<b>Al-00-57</b>	195,55	84,43	81,55	2,80	2,5
<b>Al-05-41</b>	197,78	79,17	88,02	2,75	3,14
<b>Al-10-19</b>	200,48	55,88	57,11	2,77	8,75
<b>Al-15-22</b>	171,66	55,59	64,48	2,70	5

Fonte: Autoria Própria, 2016

#### 4.5 MICROESTRUTURA DAS LIGAS DE AL-CU

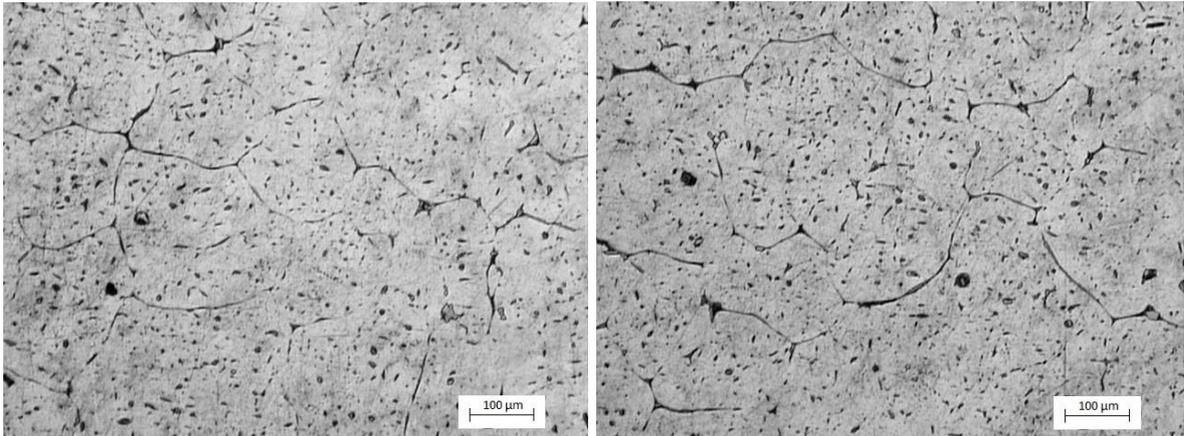
A microestrutura observada na Figura 11 é comum em ligas com tratamento de solubilização e precipitação, onde o excesso de soluto, neste caso o cobre, precipita em forma de  $\text{CuAl}_2$ , tornando a matriz mais rígida. A liga apresenta uma porcentagem de 5,7% de cobre, e a máxima solubilidade de cobre no alumínio é de 5,65%.

Figura 11 - Microestrutura Al-00-57



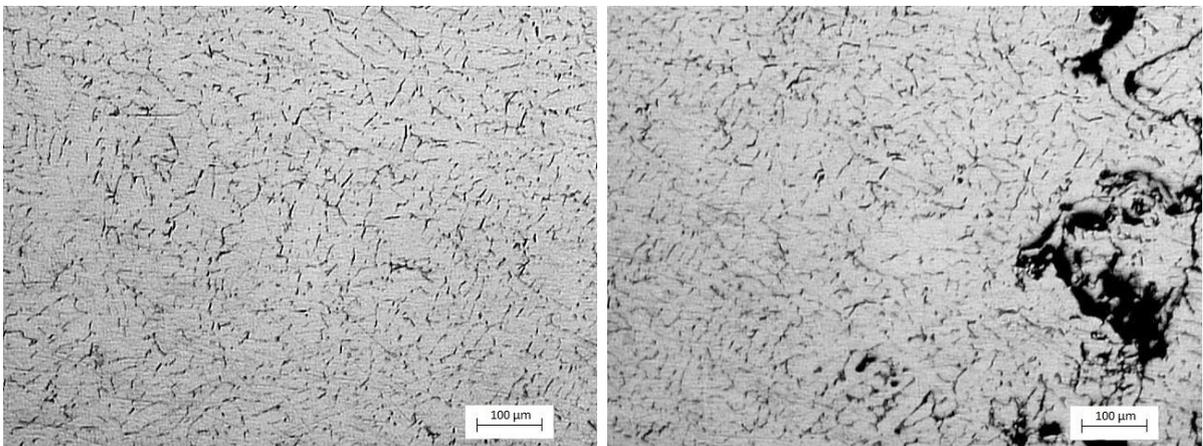
Fonte: Autoria Própria, 2016.

A microestrutura da liga Al-05-41 apresentada na Figura 12 também mostra precipitados de  $\text{CuAl}_2$  na matriz, mas em menor quantidade que a liga Al-00-57. Através das imagens obtidas com o auxílio do microscópio óptico não é possível dizer se os pontos pretos maiores são porosidades ou aglomerações de precipitado.

**Figura 12 - Microestrutura liga Al-05-41**

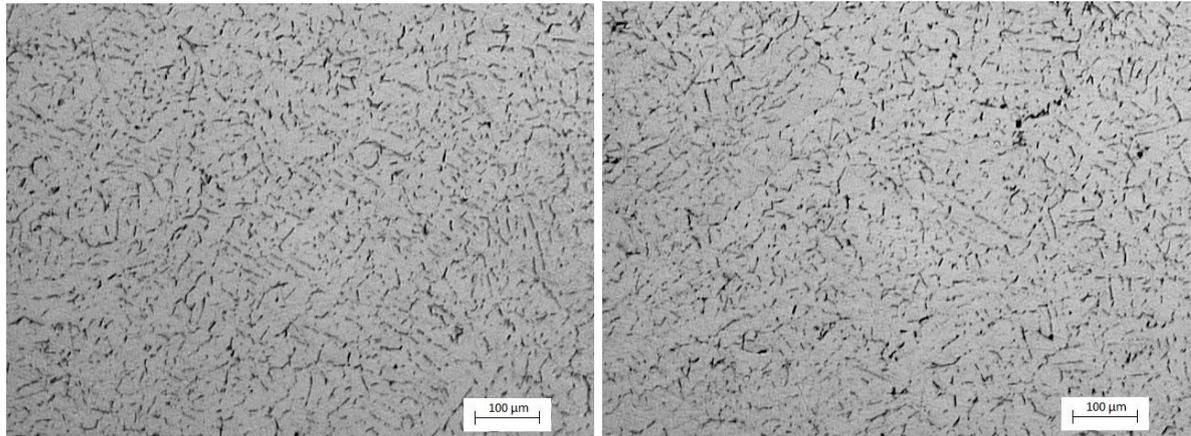
**Fonte: Autoria Própria, 2016.**

A Figura 13 mostra a microestrutura da liga Al-10-19 onde a parte mais escura da primeira imagem são defeitos originados na fundição da liga. A microestrutura apresenta uma matriz com quase todo  $\text{CuAl}_2$  dissolvido, com finos precipitados interdendríticos de  $\text{CuAl}_2$ .

**Figura 13 - Microestrutura Al-10-19**

**Fonte: Autoria Própria, 2016.**

A Figura 14 mostra a microestrutura da liga Al-15-22, que se assemelha muito com a microestrutura mostrada na Figura 13, já que as duas ligas possuem uma variação de apenas 0,3% de cobre.

**Figura 14 - Microestrutura da liga Al-15-22**

Fonte: Autoria Própria, 2016.

#### 4.6 ENSAIOS DE DUREZA NO MASSALOTE

Para a segunda análise realizada nos massalotes, foram utilizadas ligas com a mesma faixa de teor de cobre, as quais são apresentadas na Tabela 15 para baixo cobre e na Tabela 16 para cobre de 4-5%. As ligas marcadas com asterisco (\*) são as ligas apresentadas na Tabela 3.

**Tabela 15 - Composição dos massalotes de ligas com baixo teor de Cobre**

	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ti	Outros total	Al
<b>Al-00-28*</b>	2,82	0,01	0,08	1,37	0,58	0,14	0,01	0,09	94,9
<b>Al-10-19</b>	1,97	0,02	0,09	1,60	0,66	0,15	0,02	0,22	95,29
<b>Al-15-22</b>	2,28	0,02	0,09	1,60	0,59	0,16	0,01	0,07	95,19

Fonte: Autoria Própria, 2016.

**Tabela 16 - Composição dos massalotes 4-5% Cu**

	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ti	Outros total	Al
<b>Al-05-41</b>	4,16	0,01	0,09	1,60	0,59	0,17	0,01	0,10	93,29
<b>Al-10-41*</b>	4,12	0,01	0,08	1,36	0,55	0,14	0,01	0,088	93,65

Fonte: Autoria Própria, 2016.

Tanto os ensaios de dureza HRF e microdureza HV foram realizadas leituras na base e na parte superior do massalote. Os valores de média e desvio padrão obtidos para a dureza HRF e microdureza HV para as ligas com variações de cobre de 4-5%, são mostrados na Tabela 17.

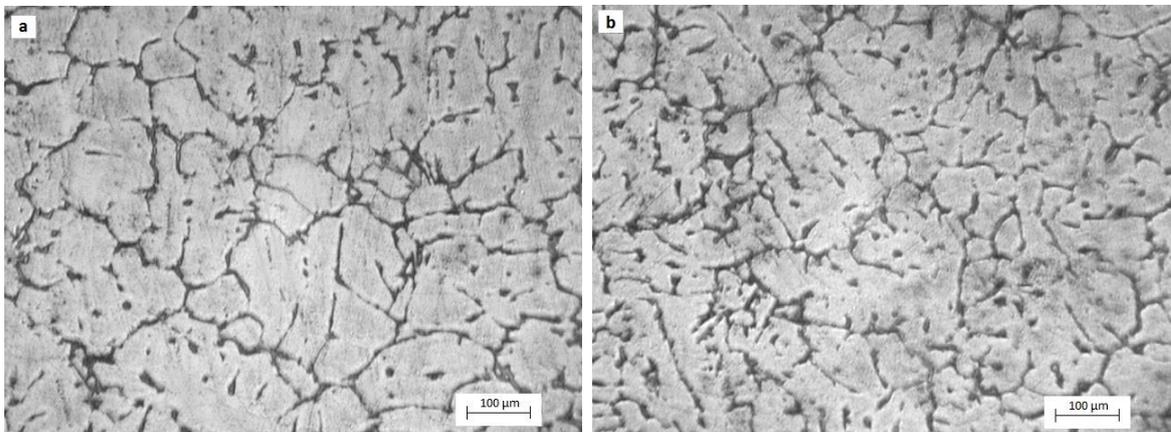
**Tabela 17 - Dureza HRF e microdureza HV dos massalotes com 4-5%Cu**

		Al-05-41		Al-10-41	
Posição		Base	Superior	Base	Superior
<b>HRF</b>	Média	71,6	74	76,6	62,6
	Desvio Padrão	0,58	1,00	2,08	2,08
<b>HV</b>	Média	65,58	63,31	73,06	75,22
	Desvio Padrão	5,32	7,65	6,58	11,98

**Fonte: Autoria Própria, 2016.**

Pela Tabela 16 é possível observar que para uma mesma porcentagem de cobre, a aplicação de uma vibração de 0,5 Bar possui valores de dureza HRF parecidos para variações de módulo de *Chvorinov*, o que não ocorre com a aplicação de 1 Bar de pressão, que possui uma maior variação de valores de dureza HRF entre a base e a parte superior do massalote.

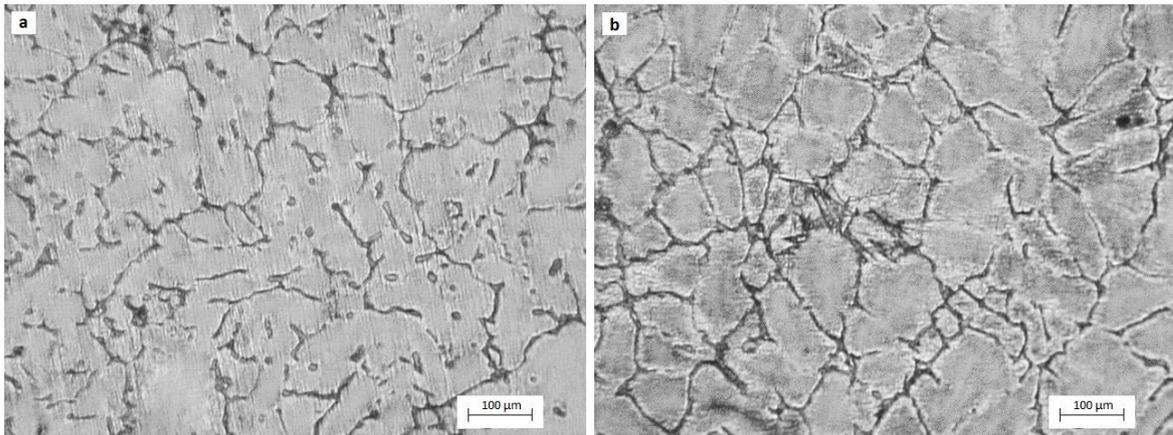
Para as amostras com 4-5%Cu o desvio padrão foi pequeno para todas as amostras, o que torna cada amostra mais homogênea em relação a macrodureza. Esta variação pode ser explicada pela microestrutura das ligas Al-05-41 e Al-10-41 apresentadas nas Figuras 15 e 16.

**Figura 15 - Microestrutura da liga Al-05-41 (a) Parte superior; (b) Base do massalote**

**Fonte: Autoria Própria, 2016.**

A partir da Figura 15 é possível observar que a microestrutura da parte superior e da base do massalote não apresentam diferenças muito significativas, o que é traduzido em valores de dureza HRF parecidos. Com isso é possível dizer que a vibração de 0,5 Bar é efetiva em ligas de 4-5%Cu, visto que a variação de módulo sem a aplicação da vibração geraria grãos mais grosseiros na parte superior e mais refinados na parte inferior. Diferente da liga Al-10-41, apresentada na Figura 16.

**Figura 16 - Microestrutura da liga Al-10-41 (a) Parte superior; (b) Base do massalote**



**Fonte: Autoria Própria, 2016.**

Pela Figura 16 é possível ver que ao final da aplicação da vibração de 1 bar em uma liga com 4,1% de cobre, os grãos da base do massalote estão mais definidos e menos grosseiros que na parte superior do massalote, sendo esta uma estrutura resultante da variação do módulo de *Chvorinov*.

Em relação a microdureza HV também apresentada na Tabela 16, a liga Al-10-41 apresenta maiores valores do que a liga Al-05-41, tanto na base quanto na parte superior do massalote. Podemos observar que o valor de microdureza HV tende a se manter ao longo da variação do módulo.

Pelo desvio padrão apresentado na Tabela 16, podemos dizer que os valores de dureza são muito próximos para as duas condições, visto que em certos valores de dureza elas se sobrepõem.

A segunda análise em relação a variação de módulo, realizada em ligas de baixo teor de cobre, possui os valores de dureza apresentados na Tabela 18.

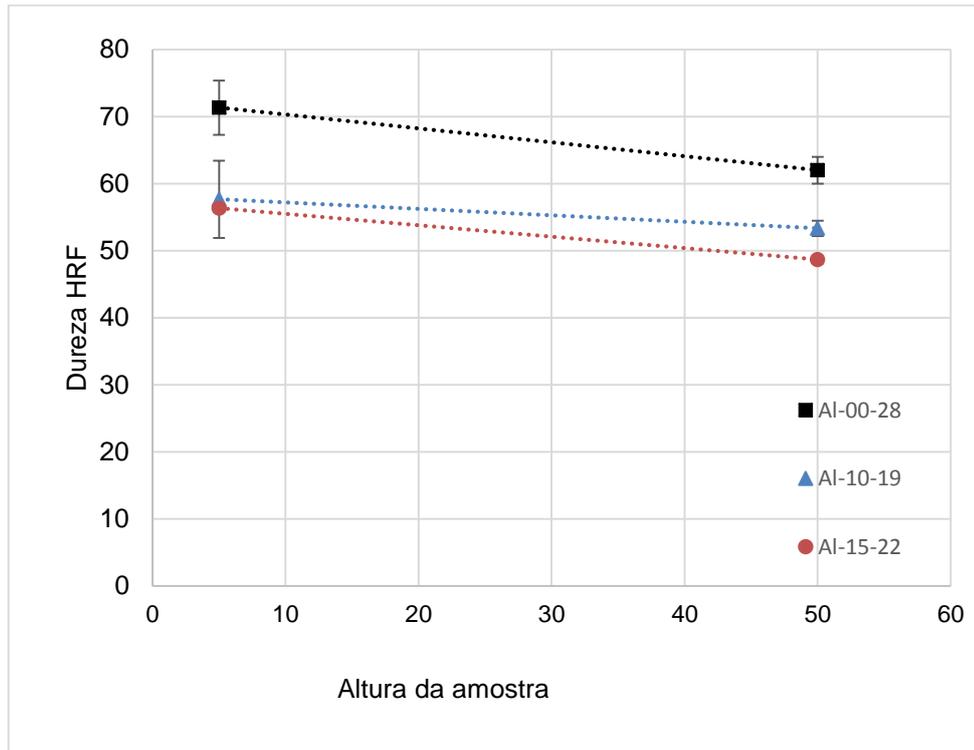
**Tabela 18 - Dureza HRF e microdureza HV dos massalotes com baixo cobre**

		Al-00-28		Al-10-19		Al-15-22	
		Base	Superior	Base	Superior	Base	Superior
<b>HRF</b>	Posição						
	Média	71,3	62	57,6	53,3	56,3	48,6
	Desvio Padrão	4,04	2,00	5,77	1,15	0,58	0,58
<b>HV</b>	Média	75,5	57,8	54,19	57,47	53,28	50,41
	Desvio Padrão	7,11	4,11	3,71	7,86	5,64	3,48

**Fonte: Autoria Própria, 2016.**

Para todas as ligas os valores de dureza HRF diminuíram com o aumento do valor do módulo de *Chvorinov*. O que, como dito anteriormente, acompanha a regra de *Chvorinov*, quanto menor o módulo, mais refinada a estrutura.

**Gráfico 7 - Dureza HRF x Posição do módulo**

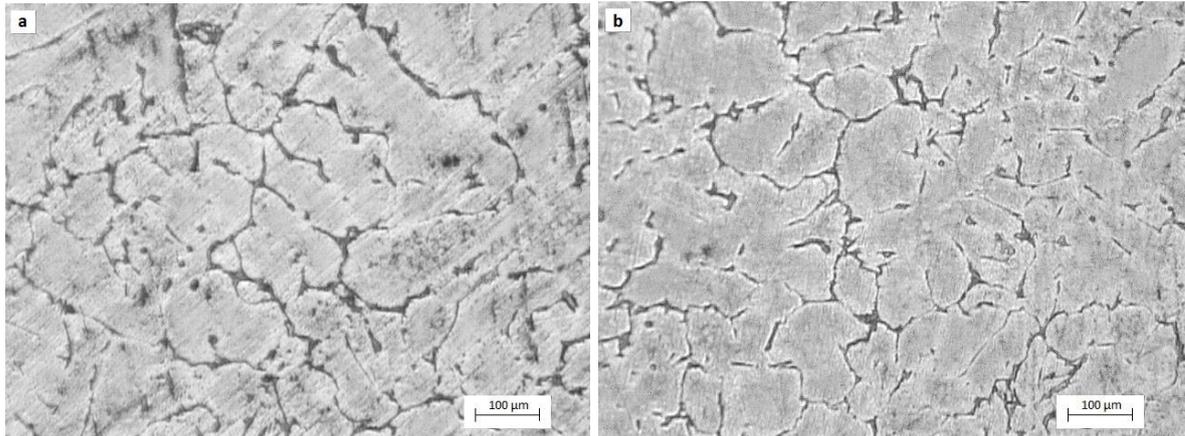


**Fonte: Autoria Própria, 2016.**

Pelo Gráfico 7, é possível observar que a liga com o maior percentual de cobre, também possui o maior valor de dureza HRF encontrado. No caso das ligas com baixo teor de cobre, podemos dizer que a aplicação da vibração não é efetiva, pois a variação do módulo de *Chvorinov* é mais influente que a vibração aplicada.

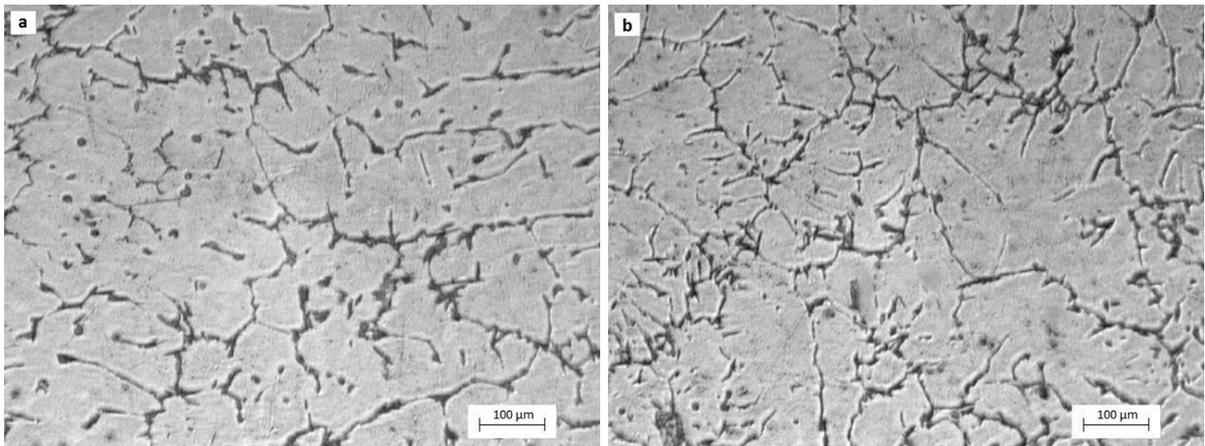
As Figuras 17;18;19 apresentam as microestruturas das ligas com baixo teor de cobre em sua composição. Para todos os casos a parte superior do massalote apresenta uma microestrutura com grãos mais grosseiros do que a parte inferior, o que explica os maiores valores de dureza para todas amostras na parte de baixo do massalote.

**Figura 17 - Microestrutura da Liga Al-00-28: (a) Parte superior; (b) Parte inferior do massalote**



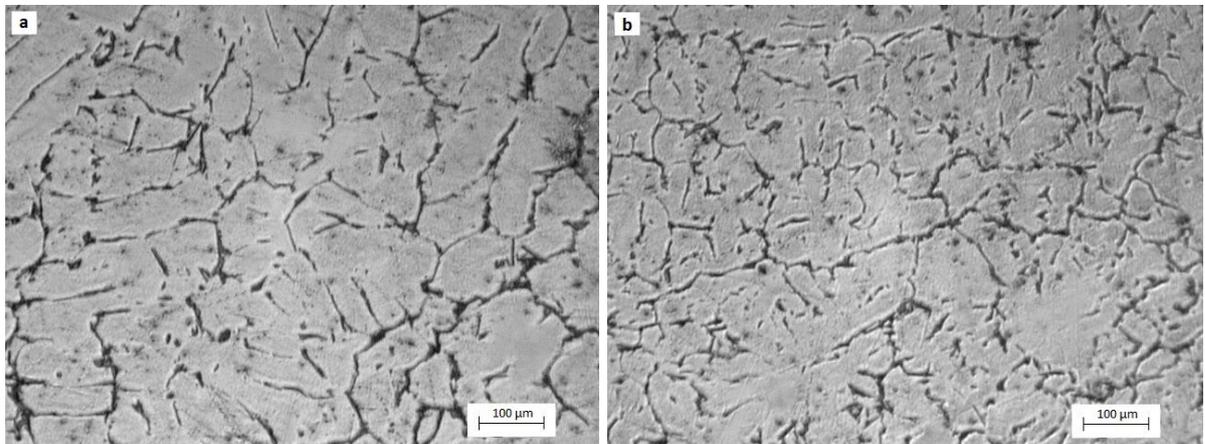
**Fonte: Autoria Própria, 2016.**

**Figura 18 - Microestrutura da Liga Al-10-19: (a) Parte superior; (b) Parte inferior do massalote**



**Fonte: Autoria Própria, 2016.**

**Figura 19 - Microestrutura da Liga Al-15-22: (a) Parte superior; (b) Parte inferior do massalote**

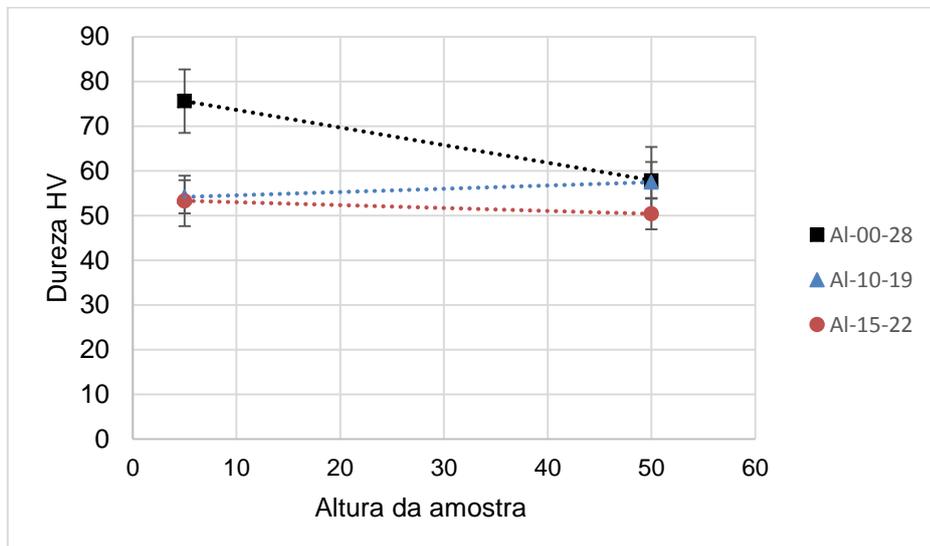


**Fonte: Autoria Própria, 2016.**

Em relação a microdureza HV das ligas com baixo teor de cobre, que são apresentadas na Tabela 18, apenas a liga Al-10-19 sofreu um leve aumento de dureza na parte superior do massalote em relação a parte inferior, o que não pode ser totalmente considerado, já que os valores dos desvios padrão se sobrepõem.

Pelo Gráfico 8 é mais fácil perceber a grande variação de microdureza entre a parte superior e inferior da liga Al-00-28, que diminuiu em torno de 24% da parte inferior para a parte superior. Para a liga Al-15-22 não houve muita variação em seus valores com a alteração do módulo.

**Gráfico 8 - Microdureza HV x Posição do módulo**



**Fonte: Autoria Própria, 2016.**

A partir das duas análises realizadas é possível observar que a aplicação da vibração de fato influencia nas propriedades mecânicas e nas microestruturas dos materiais quando aplicada no seu processamento. Porém, ela nem sempre é efetiva e varia de acordo com a liga que é processada. Logo, deve sempre se buscar encontrar o ponto ótimo de aplicação da vibração para cada liga, o que pode acarretar em uma ótima relação entre custo e melhores propriedades mecânicas, gerando em um campo de aplicação ainda maior para o alumínio.

## 5 CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento deste trabalho foi possível avaliar as propriedades das ligas de Al-Cu com variações de teor de cobre solidificadas com diferentes condições de vibração.

Com teores semelhantes de cobre, a intensidade de vibração tende a diminuir a massa específica do material. Todas as ligas ensaiadas possuem o mesmo teor de Si, responsável por conferir fluidez ao material fundido, neste estudo, o teor de Si foi baixo, o que não permitiu que a vibração atuasse como agente desgaseificante no processo.

Se aplicarmos vibração com 1 bar de pressão em uma liga com 1,9% de cobre é possível conferir uma resistência a tração bem próxima de uma liga com 5,7% de cobre em sua composição, sem a aplicação de vibração. Sendo possível obter uma liga com uma boa resistência a tração aliada a uma maior ductilidade.

No caso da dureza, a relação entre teor de cobre e durezas HRF e HV é mais forte do que a relação entre dureza e intensidade de vibração, quando estas são inversamente proporcionais.

Em ligas de Al-Cu com variações de cobre de 4-5%, em termos de dureza HRF apenas a aplicação de 1 bar foi efetiva, fazendo com que a base e a parte superior do massalote apresentassem valores de durezas próximos. Já para o caso da dureza HV nas ligas de 4-5% Cu, as vibrações geradas por 0,5 bar e 1 bar, foram efetivas. Nas ligas com baixos teores de cobre, a variação do módulo foi mais efetiva do que a aplicação da vibração.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO AMLUMÍNIO – ABAL. **Características físicas e químicas.** Disponível em < [bal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/ligas/](http://bal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/ligas/)> Acesso em: 26 Nov. 2016.

ABU-DHEIR, Numan. KHRAISHEH, Marwan. SAITO, Kozo. MALE, Alan. ***Silicon morphology modification in the eutectic Al-Si using mechanical mold vibration.*** *Materials Science and Engineering A*, vol 393, p.109-117, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS, ***Metals Handbook – Metallography and Microstructures.*** *ASM Handbook*, vol 9, 1992.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS, ***Metals Handbook – Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials.*** *ASM Handbook*, vol 2, 1990.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. ***Standard Test Methods for Tension Testing Wrought and Cast Aluminium- and Magnesium-Alloy Products (Metric).*** ASTM- B557M-10. West Conshohocken, PA, USA. 2014

CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA, **Porosidades – Heterogeneidades físicas.** Disponível em: <[http://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/3684-porosidades-heterogeneidades-fisicas#.VyK9A1YrKt9](http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/3684-porosidades-heterogeneidades-fisicas#.VyK9A1YrKt9)> Acesso em: 27 Abr. 2016.

GERDARD D.A., KOSS D.A. ***Porosity and Crack Initiation During Low Cycle Fatigue.*** *Materials Science and Engineering*, vol 129, p. 77-85, 1990.

GUO, Hong-min. ZHANG, Ai-sheng. YANG, Xiang-jie. YAN, Ming-ming. ***Grain refinement of Al-5%Cu aluminium alloy under mechanical vibration using meltable vibrating probe.*** *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol 50, p. 2489-2496, 2014.

HENRY, S., MINGHETTI T., RAPPAZ, M., ***Dendrite Growth Morphologies in Aluminium Alloys.*** *Acta Materialia*, vol 46, p. 6431-6443, 1998.

JIANG, Wenming. FAN, Zitian. CHEN, Xu. WANG, Benjing. WU, Hebao. ***Combined effects of mechanical vibration and wall thickness on microstructure and mechanical properties of A356 aluminium alloy produced by expendable pattern shell casting.*** *Materials Science and Engineering A*, vol 619, p. 228-237, 2014.

KAPALKJIAN S. SCHIMID S. R. **Manufacturing Engineering and Technology**. 6 ed. 2009.

KOCATEPE, Kadir. **Effect of low frequency vibration on porosity of LM25 and LM6 alloys**. *Materials and Design*, vol 28, p.1767-1775, 2007.

KUMAR, Rahul. ANSARI, Salim Md. MISHRA, Sudhansu S. KUMAR, Amitesh. **Effect of Mould Vibration on Microstructure and Mechanical Properties of Casting During Solidification**. *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol 3, p. 90-92. 2014.

LIMMANEEVICHITR, Chaowalit. PONGANANPANYA, Songwid. KAJORNCHAIYAKU, Julathep. **Metallurgical structure of A356 aluminium alloy solidified under mechanical vibration: Na investigation of alternative semi-solid routes**. *Materials and Design*, vol 30, p.3925-3930. 2005.

LINDER Jan, AXELSSON Markus, NILSSON Henrik. **The influence of porosity on the fatigue life for sand and permanente muld cast aluminium**. *International Journal of Fatigue*, vol 28, p. 1752-1758, 2006.

MARQUES, Andreia Isabel G. Cercas. **Diagnostico de um defeito de fundição. Aplicabilidade da simulação numérica em FLOWCast para previsão e resolução de defeitos**. 2008. Tese (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal.

OHNO, A. **Solidification of Metals**. 1988.

REED-HILL, R. E. **Physical Metallurgy Principles**. Segunda edição, 1973.

RHODES, Regis A. **Metalografia Preparação de Amostras – Uma abordagem prática versão-3.0**. LEMM Laboratório de Ensaios Mecânicos e Materiais. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Santo Ângelo, Rio Grande do Sul, Brasil, 2010.

Shukla DP, Goel DB, Pandey PC. **Effect of vibration on the formation of porosity in aluminium alloy ingots**. *Metallurgical and materials transactions*, vol 11, p. 166–168, 1980.

SKALLERUD B., IVELAND T., HÄRKEGARD G. **Fatigue life assessment of aluminium alloys with casting defects**. *Engineering Fracture Mechanics*, vol 44, p.857-874, 1993.

TAGHAVI, Farshid. SAGHAFIAN, Hasan. KHARRAZI, Yousef H.K.. **Study on the effect of prolonged mechanical vibration on the grain refinement and density of A356 aluminium alloy.** *Materials and Design*, vol 30, p.1604-1611. 2009.

THE ALUMINIUM ASSOCIATION, **Aluminium Recycling.** Disponível em: < <http://www.aluminum.org/sustainability/aluminum-recycling>> Acesso em: 26 abr. 2016.

TIRYAKIOĞLU, M. TYRIAKIOĞLU, E. ASKELAND, D. R. **The Effect Casting Shape and Size on Solidification Times of Castings.** *International Journal of Cast Metals Research*. 1997

U.S DEPARTMENT OF ENERGY, INDUSTRIAL TECHNOLOGIES PROGRAM. **Degassing of aluminium alloys.** 2003. Disponível em: < <http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/resources/aluminum/pdfs/degassing.pdf> > Acesso em: 29 de abr. 2016.

WANG Q, APELIDAN, D. LADOS, D.A. **Fatigue behavior of A356-T6 aluminum cast alloys. Part I. Effect of casting defects.** *Journal of Light Metals I*, vol 1, p. 73-84, 2001.