

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

LAURA FERRAZZA KIRCH

**ESTUDO DO EFEITO DA VIBRAÇÃO MECÂNICA NA SOLIDIFICAÇÃO DA
LIGA DE ALUMÍNIO 356.0**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2017

LAURA FERRAZZA KIRCH

**ESTUDO DO EFEITO DA VIBRAÇÃO MECÂNICA NA
SOLIDIFICAÇÃO DA LIGA DE ALUMÍNIO 356.0**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – DAMEC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, *Campus* Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Dalmarino Setti

PATO BRANCO

2017

FOLHA DE APROVAÇÃO

Estudo do efeito da vibração mecânica na solidificação da liga de alumínio 356.0

Laura Ferrazza Kirch

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 07/06/2017 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**.

Profa. Dra. Maria Nalu Verona
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Profa. MsC. Silvana Patrícia Verona
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Prof. Dr. Dalmarino Setti
(UTFPR – Departamento de Mecânica)
Orientador

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

DEDICATÓRIA

Dedico este Trabalho de Conclusão de Curso à minha família que mesmo longe sempre estiveram presentes dando apoio e incentivo, aos amigos que compartilharam desta conquista e aos professores que trilharam minha caminhada até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família por todo o apoio e incentivo que me deram e que mesmo longe, souberam aguardar com paciência o meu crescimento tanto pessoal quanto profissional. Em especial a minha irmã Geraldine que foi meu modelo durante toda a vida.

À professora Dra. Maria Nalu Verona e ao professor Dr. Dalmarino Setti que fizeram com que eu me apaixonasse pela ciência dos materiais e desde o início me deram a oportunidade de trabalhar, pesquisar e aprender.

Aos parceiros de laboratório Gabriel Stockler, Vitor Baldin e Alessandro Pasa, pela dedicação e ajuda com as etapas de fundição, usinagem e análises físicas e químicas das amostras.

À indústria Alcast do Brasil por ter colaborado com o ensaio de composição química da liga obtida, uma vez que a Universidade não dispunha de tal equipamento.

Ao Guilherme Burato Favretto pelas longas horas de conversa e desabafo, obrigada por estar sempre presente, principalmente nos momentos difíceis.

Por último, mas não menos importante, à Amanda Yuki Shimosaka, que foi crucial nesta longa caminhada, desde os estudos de madrugada, iniciações científicas e até agora, no Trabalho de Conclusão de Curso. Meu muito obrigada por ser um dos pilares da minha conquista.

EPÍGRAFE

“What this power is I cannot say; all I know is that it exists and it becomes available only when a man is in that state of mind in which he knows exactly what he wants and is fully determined not to quit until he finds it.” – Alexander Graham Bell

“O que este poder é, eu não posso dizer; Tudo que sei é que ele existe e só se torna disponível quando um homem está naquele estado de espírito em que ele sabe exatamente o que quer e está totalmente determinado a não parar até que ele o encontre. ” – Alexander Graham Bell.

RESUMO

KIRCH, Laura F. Estudo do efeito da vibração mecânica na solidificação da liga de alumínio 356.0. 2017. 41f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

A vibração na solidificação de ligas de alumínio resulta em refino de grão, microestrutura mais homogênea e contribui para a desgaseificação. O objetivo deste trabalho é avaliar os efeitos que a vibração mecânica possui nas propriedades da liga de alumínio 356.0 durante a solidificação, mediante comparação de ensaios mecânicos e análises de microestrutura de amostras obtidas com diferentes parâmetros de vibração. Um molde metálico em formato “Y” foi confeccionado e apoiado a uma base metálica, a qual estava acoplado o dispositivo de vibração pneumático utilizado. A liga metálica foi obtida mediante adição de Si e Mg ao alumínio puro nas quantidades necessárias à liga 356.0 e a fusão ocorreu em forno tipo cadinho com temperatura de vazamento de 740 °C. Três amostras foram obtidas e a solidificação ocorreu de forma não vibrada, e vibradas com 1 e 2 bar de pressão. Sete corpos de prova cilíndricos foram confeccionados de acordo com a norma ASTM B557M-10 em cada amostra para a realização de ensaios de tração, dureza Rockwell F, microscopia ótica e eletrônica de varredura. O ensaio de tração mostrou que houve um aumento de 6,2% na resistência a tração da amostra vibrada com 2 bar de pressão (163 MPa) em relação a não vibrada (137 MPa) e cerca de 12,5% em relação ao valor máximo citado em norma (145 MPa) para o processo convencional. O ensaio de dureza mostrou um aumento de 12,9% nos resultados da amostra vibrada com 2 bar de pressão (62 HRF) em relação a não vibrada (54 HRF). A amostra obtida com 1 bar de pressão apresentou resultados levemente melhores que a amostra não vibrada e ambas apresentaram porosidade superficial. A análise da microestrutura mostrou que houve mudança microestrutural e os grãos se tornaram mais arredondados à medida que se aumenta a intensidade de vibração.

Palavras-Chave: Solidificação; Alumínio 356.0; Vibração; Microestrutura.

ABSTRACT

KIRCH, Laura F. Study on the effects of mechanical vibration in the solidification of the aluminum alloy 356.0. 2017. 41f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

The vibration on the solidification of aluminum alloys results in grain refining, more homogeneous microstructure and also contributes to degas. The objective of this paper is to evaluate the effects of mechanical vibration on the properties of 356.0 aluminum alloy during solidification by comparing mechanical tests and microstructure analysis of samples obtained with different vibration parameters. A "Y" shaped metal mold was made and supported on a metal base, which was coupled to the pneumatic vibration device. The metal alloy was obtained adding Si and Mg to the pure aluminum in the necessary quantities to the alloy 356.0. The melting occurred in a crucible type oven with a casting temperature of 740 °C. Three samples were obtained, and the solidification occurred non-vibrated, vibrated with 1 and 2 bar pressure. Seven cylindrical test specimens were made according to ASTM B557M-10 in each sample for tensile tests, Rockwell F hardness, metallography and SEM. The tensile test showed that there was a 6.2% increase in the tensile strength of the vibrated sample with 2 bar pressure (163 MPa) over the non-vibrated (137 MPa) and about 12.5% of the maximum value quoted in standard (145 MPa) for the conventional process. The hardness test showed a 12.9% increase in the results of the sample vibrated with 2 bar pressure (62 HRF) versus non-vibrated (54 HRF). The sample obtained with 1 bar pressure had slightly better results than the non-vibrated sample, and both had surface porosity. The analysis of the microstructure showed that there was a change of the microstructure and the grains became more round as the vibration intensity increased.

Keywords: *Solidification; Aluminum 356.0; Vibration; Microstructure.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Representação esquemática do crescimento dendrítico.....	16
Figura 02 – Diagrama de fases binário da liga Al-Si.....	17
Figura 03 - Base metálica com dispositivo de vibração pneumática já acoplado.....	22
Figura 04 - Apoio da base metálica.....	23
Figura 05 - Desenho esquemático do molde “Y” com indicação dos corpos de prova.....	24
Figura 06 – Modelo de corpo de prova para ensaio de tração segundo a norma ASTM B557M-10 para alumínio fundido.....	26
Figura 07 - Corpos de prova (a) 05 e (b) 06 obtidos sem vibração excluídos dos ensaios de tração.....	30
Figura 08 – Porosidade nos corpos de prova não vibrados usados no ensaio de dureza Rockwell F.....	35
Figura 09 – Comparação da metalografia das amostras 27 e 02.....	35
Figura 10 – Comparação da metalografia das amostras 02 e 12.....	36
Figura 11 – Comparação da metalografia das amostras 02 e 27 com presença de Si eutético.....	37
Figura 12 – Comparação das imagens obtidas no MEV com ampliação de 500x das amostras 02 e 12.....	37
Figura 13 – Comparação das imagens obtidas no MEV com ampliação de 500x das amostras 02 e 27.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Parâmetros de processamento por fundição.....	25
Tabela 02 - Resultados da análise da composição química.....	29
Tabela 03 – Resultados do ensaio de tração nas amostras do corpo de prova fundido estaticamente.....	31
Tabela 04 – Resultados do ensaio de tração nas amostras do corpo de prova fundido sob 1 BAR de pressão.....	31
Tabela 05 – Resultados do ensaio de tração nas amostras do corpo de prova fundido sob 2 BAR de pressão.....	32
Tabela 06 – Resultados de resistência a tração acima de 145 MPa de acordo com a norma ASTM B108.....	33
Tabela 07 – Valores de dureza Rockwell F obtidos nos corpos de prova.....	34

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 Objetivos Gerais	14
1.1.2 Objetivos Específicos	14
2 REFERENCIAL TEORICO	15
2.1 SOLIDIFICAÇÃO	15
2.2 A LIGA 356.0	17
2.3 A VIBRAÇÃO	18
2.3.1 A Influência da Vibração na Microestrutura e no Refino de Grão	18
2.3.2 A Influência da Vibração na Porosidade e nas Propriedades Mecânicas	19
3 MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1 MATERIAIS	21
3.2 PROCESSAMENTO POR FUNDIÇÃO	21
3.3 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	25
3.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E MICROESTRUTURAL	26
3.4.1 Determinação da composição química	26
3.4.2 Ensaio de tração	27
3.4.3 Metalografia	27
3.4.4 Ensaio de dureza	28
3.4.5 Microscópio Eletrônico de Varredura	28
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
4.1 ANÁLISE QUÍMICA	29
4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO	29
4.3 ENSAIOS DE DUREZA ROCKWELL F E MICRODUREZA VICKERS	34
4.4 METALOGRAFIA	35
4.5 MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA	37

5 CONCLUSÃO	39
REFERÊNCIAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

O alumínio é um dos metais mais versáteis encontrado no mercado. Características como leveza, resistência a corrosão, facilidade de fabricação e acabamento fazem deste metal um dos mais utilizados no mundo todo. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2011). Sua densidade é cerca de um terço da densidade do aço e, mesmo assim, algumas ligas particulares podem possuir resistência mecânica maior que o aço estrutural (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1990, Metals Handbook, v. 2, p.18). Quando puro é muito dúctil, porém com a adição de alguns elementos de liga como Cu, Mn, Si e Mg, pode-se melhorar as propriedades mecânicas do metal como resistência, usinabilidade e dureza. No mercado há mais de trezentas ligas reconhecidas capazes de fornecer diversas combinações de propriedades (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Metals Handbook, v. 2, 1990, p.17). Além da adição de elementos de liga, é comum utilizar meios de processamento como tratamentos térmicos ou variação de parâmetros como temperatura de molde, temperatura de vazamento e taxa de resfriamento para se alcançar diversas combinações de propriedades mecânicas. A aplicação de vibração mecânica durante o vazamento e/ou solidificação das ligas metálicas é um meio não convencional ainda em estudo de se obter ligas com boas propriedades mecânicas sem a necessidade de adicionar elementos de liga caros (como Ti, Ni e Cr) ou realizar tratamentos térmicos, sendo uma alternativa para reduzir os custos de produção.

O estudo dos efeitos da vibração mecânica aplicada durante a solidificação do metal é realizado com o objetivo de encontrar um meio alternativo de processamento destas ligas para se alcançar as propriedades mecânicas desejadas. A estrutura formada logo após a solidificação determina as propriedades mecânicas do material, portanto aplicar vibração durante a solidificação pode mudar a microestrutura resultante, tornando-a menos porosa e com grãos mais refinados.

Para o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso, o material escolhido foi a liga de alumínio ANSI 356.0 que possui concentrações de 7,5% Si, 0,25% Cu, 0,35% Zn e 0,6% Fe, 0,45% Mg, 0,35% Mn, em valores máximos em peso (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Metals Handbook, v. 2, p. 88). Estes elementos de liga proporcionam ao metal propriedades de fluidez, fazendo com que esta liga seja

ideal para o processo de fundição em molde permanente. Uma vez que a solidificação do alumínio ocorre por meio de crescimento dendrítico, ao aplicar a vibração, espera-se que estas dendritas sejam quebradas à medida que se formam e com isto, o metal adquira uma microestrutura mais homogênea e com grãos refinados.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos Gerais

O objetivo geral deste Trabalho de Conclusão de Curso é avaliar os efeitos que a vibração mecânica possui nas propriedades mecânicas da liga de alumínio 356.0 durante sua solidificação, por meio de comparação dos resultados dos ensaios realizados em amostras obtidas com diferentes condições de processamento.

1.1.2 Objetivos Específicos

Este trabalho possui como objetivos específicos: (i) determinar os parâmetros pertinentes para o estudo do efeito de vibração na liga de alumínio 356.0; (ii) realizar o vazamento da liga de alumínio 356.0 em molde metálico de acordo com os parâmetros determinados anteriormente para a obtenção dos corpos de prova; (iii) realizar ensaios mecânicos para avaliar as propriedades em cada condição de processamento; (iv) avaliar a microestrutura obtida em cada amostra; (v) analisar os resultados obtidos com os ensaios mecânicos e com a análise microestrutural.

2 REFERENCIAL TEORICO

2.1 SOLIDIFICAÇÃO

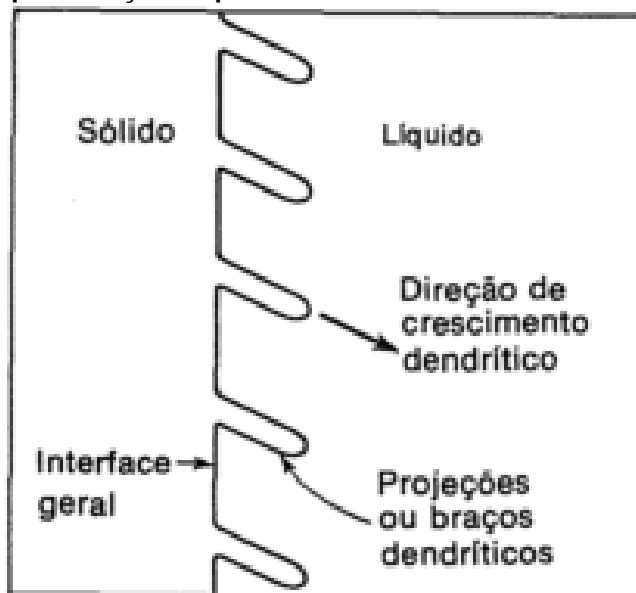
A estrutura formada logo após a solidificação do metal determina as propriedades do produto final. Suas características dependem de fatores como tamanho de grão, espaçamento dendrítico, heterogeneidade da composição química, porosidade, entre outros. Estes aspectos microestruturais dependem fortemente das condições de solidificação, como material, formato e temperatura do molde, temperatura de vazamento e taxa de resfriamento do metal fundido. A primeira variável de influência é a temperatura de vazamento juntamente com a intensidade das correntes convectivas durante o preenchimento do molde, o qual será responsável pela extração de calor do metal, auxiliando na transformação do líquido em sólido. O modo como ocorre a transferência de calor do metal líquido para o molde determina a morfologia de crescimento e conseqüentemente o arranjo microestrutural resultante que definirá, juntamente com a distribuição de defeitos e heterogeneidade química, o perfil de propriedades mecânicas do sólido (GARCIA, 2007, p.21).

A transformação de líquido em sólido se dá primeiramente através da nucleação que pode ser definida como a formação de uma fase a partir de outra. A nucleação pode ser homogênea, quando o próprio metal fornece átomos para formar os núcleos, ou heterogênea quando há presença de agentes nucleantes. Estes agentes nucleantes podem ser impurezas insolúveis, agentes químicos ou, no caso da fundição, as paredes do molde. Quando os núcleos sólidos estão estabilizados, a fase sólida começa a crescer e, ao se agruparem, os núcleos dão forma aos grãos, os quais possuem crescimento cristalográfico em direções diferentes dos outros grãos. A medida que resta pouco líquido, os grãos se encontram e formam uma estrutura desordenada entre eles chamada de contornos de grão (GARCIA, 2007, p.35).

O crescimento destes grãos geralmente é desordenado e depende da maneira como o metal se resfria. Normalmente, o crescimento de células regulares ocorre perpendicularmente a interface sólido-líquido quando a taxa de resfriamento é pequena, ou seja, quando o metal se resfria em baixas velocidades da parede do

molde para o interior. Se esta taxa de resfriamento foi aumentada, a célula começa a mudar suas características e perturbações laterais chamadas de ramificações começam a surgir para formar uma estrutura tipicamente dendrítica (GARCIA, 2007, p.214).

Figura 01 – Representação esquemática do crescimento dendrítico.



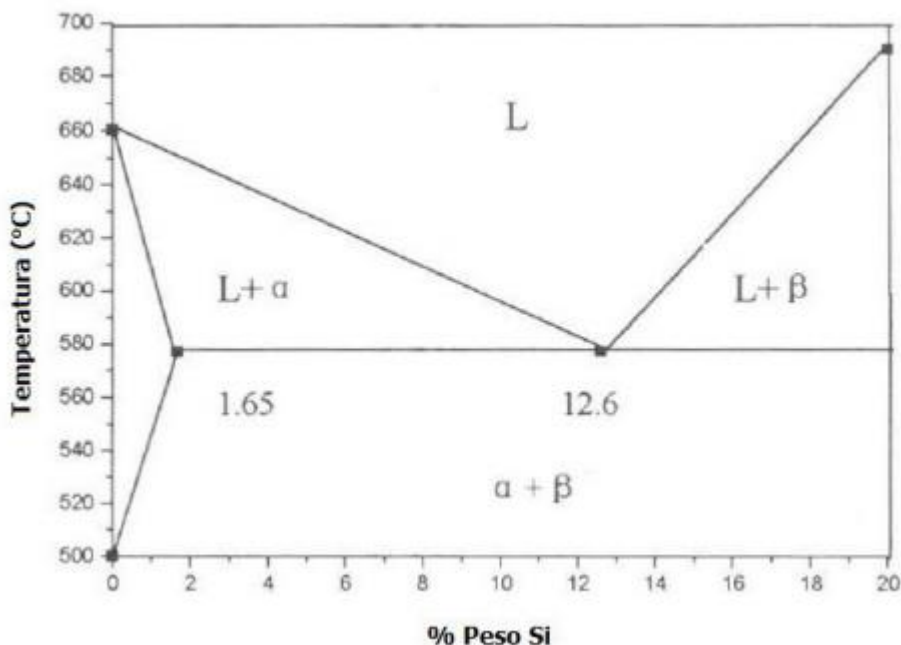
Fonte: REED-HILL, 1982.

O crescimento dendrítico é tridimensional, com ramificações laterais secundárias e terciárias. Com o aumento da taxa de solidificação, estes ramos crescem mais rapidamente e ao se encontrarem dão forma a grãos menores, tornando a microestrutura mais refinada e o metal mais resistente. Outra maneira de refinar a microestrutura é quebrar estes braços dendríticos, os quais dão origem a novos núcleos de solidificação. Com o aumento do número de núcleos, maior a quantidade de grãos, diminuindo o espaço para o seu crescimento, refinando assim a microestrutura.

Em ligas metálicas com composição eutética, o líquido se solidifica com a disposição de duas fases sólidas. No caso da liga 356.0 utilizada neste estudo, ocorrerá formação de fases eutéticas de Si em meio a fase sólida de Al. A disposição destas fases podem se dar de formas muito variadas, porém acredita-se que terão microestrutura lamelar ou fibrosa (GARCIA, 2007, p.243). Esta fase eutética tende a possuir elevada dureza e, dependendo da sua quantidade e disposição pela matriz, o material como um todo se beneficia desta propriedade mecânica. A Figura 02 mostra o diagrama binário de fases para o caso das ligas de Al-Si, onde é possível notar que

o ponto eutético se encontra na composição de 12,6% Si em peso na temperatura de 577°C.

Figura 02 – Diagrama de fases binário Al-Si



Fonte: XIANGFA, 2000.

2.2 A LIGA DE ALUMÍNIO 356.0

A liga de alumínio A356.0 é composta basicamente de alumínio e silício. A composição limite dos elementos de liga em porcentagem de peso é de 0,25%Cu, 7,5%Si, 0,45%Mg, 0,6%Fe, 0,35%Mn, 0,35%Zn e 0,25%%Ti (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Metals Handbook, 1990, v. 2, p.88). Quando excedidos os limites de Cu, Zn e Fe, o metal tende a diminuir a ductilidade, resistência a corrosão e a resistência mecânica (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Metals Handbook, 1990, v. 2 p.637). As propriedades mecânicas desta liga tratada termicamente são, resistência a tração de 325 MPa, tensão limite de escoamento de 160 MPa, tensão de cisalhamento de 185 MPa, módulo de elasticidade de 72 GPa e módulo de cisalhamento de 27,2 GPa. Possui densidade de 2,685 g/cm³ a temperatura ambiente. Possui temperatura de líquido de 615°C e sólido de 555°C, portanto uma liga de longo intervalo de solidificação (60°C). As temperaturas ideais para a fundição e vazamento

ficam entre 675°C a 815°C e 790°C, respectivamente. (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Metals Handbook, v. 2, 1990, p.618)

Esta, em especial, é a principal liga utilizada em fundições devido as características adquiridas com seus principais elementos de liga. Adições de Si melhoram a fluidez do metal e sua resistência a trincas de contração e o Mg tornam a liga tratável termicamente (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Metals Handbook, v. 2, 1990, p.618). De um modo geral, esta liga apresenta elevada resistência mecânica, boa fluidez, usinabilidade e resistência a corrosão. As aplicações desta liga variam desde caixas de transmissão automotivas a acessórios para aeronaves ou em casos em que boa soldabilidade, boa resistência a corrosão e excelente fluidez são necessários (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Metals Handbook, v. 2, 1990, p.619).

2.3 A VIBRAÇÃO

O estudo dos efeitos que a vibração proporciona às características do metal ainda é muito recente, porém vem mostrando resultados satisfatórios. A maioria destes estudos tem por objetivo determinar quais propriedades do metal são realmente influenciadas pela vibração e quais os parâmetros que potencializam os resultados.

2.3.1 A Influência da Vibração na Microestrutura e no Refino de Grão

Alguns estudos utilizaram vibração ultrassônica com frequência de 20kHz aplicada tanto no fundido enquanto o mesmo é vazado quanto no molde onde foi vazada a liga de alumínio A356.0. Quando aplicada a vibração ao molde metálico, a morfologia do silício eutético passou de uma estrutura tipo placa grosseira para uma forma finamente distribuída, reduzindo o tamanho do grão de 26 µm para 2 µm em comprimento e de 2,7 µm para 0,6 µm na largura (JIAN; MEEK; HAN, 2006). Quando aplicada a vibração no metal líquido durante seu vazamento, foi possível obter uma

microestrutura globular não dendrítica quando o mesmo foi resfriado de 634 a 574°C. Quando aplicada isotermicamente durante um curto intervalo de tempo, a vibração conseguiu refinar o grão, porém falhou em produzir uma microestrutura globular. Isto sugere que o mecanismo de refino de grão não ocorre através da quebra das dendritas mas sim pela cavitação que induz a nucleação heterogênea (JIAN; XU; MEEK et al., 2005).

A vibração mecânica com frequência de 100 Hz aliada a variação da espessura da parede do molde foi estudada na solidificação da liga A356.0. Ao variar a espessura da parede do molde, varia-se também a taxa de resfriamento do metal. Este estudo mostrou que apenas com o aumento da espessura da parede, a morfologia das partículas de alumínio primário e silício eutético passaram de uma fina dendrita para dendritas mais grosseiras. Porém com a aplicação da vibração, estas dendritas grosseiras se transformam em grãos equiaxiais uniformes e quanto maior a espessura da parede, mais refinados os grãos se tornam (JIANG; FAN; CHEN et al., 2014).

Estudos realizados com a liga eutética de Al-Si com aplicação de vibração com frequência de 100Hz e amplitudes variando entre 18-199 μm , mostram que até a amplitude de 149 μm houve quebra das dendritas e aumento do percentual de alongamento. Porém ao ultrapassar este valor limite, o tamanho das dendritas quebradas aumentou e acabaram formando estruturas mais grosseiras. Além disto, foi percebido que indiferente da intensidade da vibração, a resistência mecânica a tração não foi melhorada, aumentando em apenas 3% com a variação da vibração (ABU-DHEIR; KHRAISHEH; SAITO et al., 2005)

Os efeitos da vibração na liga A380.0 que possui cerca de 3,5% Cu, mostram que o solidificado não formou microestrutura dendrítica devido à quebra das mesmas e os grãos se tornaram mais homogêneos quando aplicada vibração de 5,75 Hz em uma rampa com inclinação de 60° utilizada para transferir o metal fundido em temperatura de 630°C para o molde (GENCALP; SAKLAKOGLU, 2014).

2.3.2 A Influência da Vibração na Porosidade e nas Propriedades Mecânicas

A aplicação da vibração ultrassônica (20kHz) na liga A356.0 ainda líquida é capaz de promover a desgaseificação. Foi observado que, para o vazamento de

pequenas quantidades de metal com temperaturas de vazamento entre 700-740°C, o processo de desgaseificação é bastante rápido necessitando de apenas alguns minutos para alcançar um estado estacionário de concentrações de hidrogênio. Ao diminuir a temperatura de vazamento para 620-660°C, a desgaseificação ainda ocorre, porém com menor eficiência e velocidade. (XU; JIAN; MEEK *et al.*, 2004).

A aplicação de 100 Hz de frequência em molde com variação de tamanho de parede mostra que a vibração aliada a maiores espessuras proporciona o aumento da densidade do material, da porcentagem de alongamento e das propriedades mecânicas como dureza e resistência a tração e ao escoamento em mais de 30% (JIANG; FAN; CHEN *et al.*, 2014). A aplicação de frequências de 10, 20, 30, 40 e 50 Hz durante tempos de 5, 10 e 15 minutos na solidificação da liga A356.0 fez com que ocorresse um aumento da densidade do material e também refino de grão, onde os melhores resultados destes dois aspectos foram obtidos com tempos e frequências máximas (50 Hz durante 15 min) (TAGHAVI; SAGHAFIAN; KHARRAZI, 2009).

Ao aplicar frequências menores entre 15-41,7 Hz na solidificação da liga A356.0, outro autor constatou que, quanto maior a intensidade e a frequência de vibração, maior a quantidade e tamanho dos poros na estrutura fundida. Além dos poros, também foi possível notar que com o aumento dos parâmetros de vibração, ocorreu a formação de grandes furos na parte superior do lingote (KOCATEPE, 2007).

Outro estudo utilizou a mesma liga, porém aplicou a vibração com um método simples e barato que consistia em leves batidas de intensidade e frequência uniformes no molde através de hastes de aço. O autor conseguiu alcançar diversos benefícios para o fundido, tais como densidade, aumento do percentual de alongamento, dureza e da resistência a tração (PILLAI; KUMAR; PAI, 2004).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

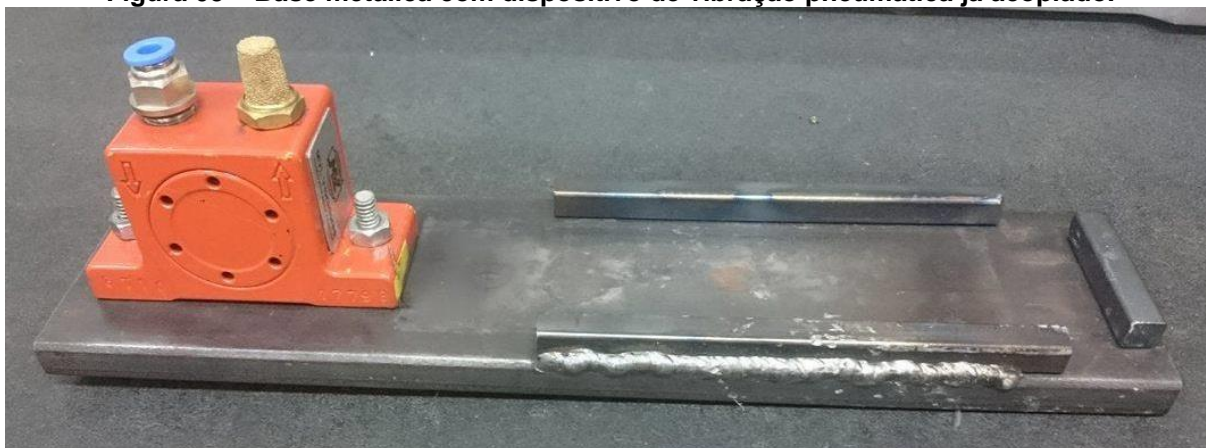
A liga utilizada neste trabalho foi produzida, fundida e vazada dentro das permanências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Pato Branco. Para a produção da liga, foram misturados ao alumínio puro outros elementos de liga nas quantidades necessárias para obtenção da liga de alumínio 356.0 segundo a norma ASTM B108-03.

A liga de alumínio foi obtida a partir de alumínio puro com a adição de silício e magnésio. O cadinho utilizado tem capacidade para cerca de 1 litro de metal e o molde utilizado tem volume de aproximadamente 750 ml. Para se obter 850 g da liga 356.0, suficiente para vazar o molde, foram fundidos 782,5 g de alumínio puro com adições de 63,75 g de Si e 6,88 g de Mg.

3.2 PROCESSAMENTO POR FUNDIÇÃO

A fundição foi realizada em forno elétrico de resistência tipo cadinho. Para realizar a vibração do molde, um dispositivo de vibração pneumático tipo turbina modelo GT-10 da marca MVL foi acoplado a uma base metálica, a qual estava preso o molde metálico em formato "Y". A base metálica pode ser observada na Figura 03.

Figura 03 – Base metálica com dispositivo de vibração pneumática já acoplado.



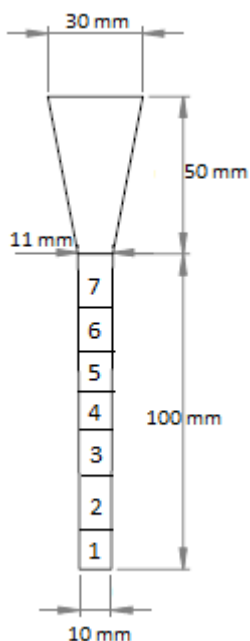
Fonte: Autoria própria, 2017.

A base metálica foi confeccionada com o intuito de transmitir a vibração mecânica para o molde metálico, uma vez que seria inviável acoplar o mesmo ao molde devido as altas temperaturas. A base possuía dois pés emborrachados então com o intuito de não haver amortecimento durante o processo de vibração, um apoio quadrado formado por canaletas soldadas umas nas outras foi confeccionado. Dentro de 2 das 4 canaletas, esferas de mancais de rolamento com diâmetros de 14,3 mm foram postas de modo a permitir a vibração da base metálica em um dos sentidos, como pode ser observado na Figura 04.

Figura 04 – Apoio da base metálica

Fonte: Autoria Própria, 2017.

O molde metálico em formato “Y” utilizado neste estudo foi previamente pensado e calculado de modo a se obter um corpo de prova retangular com pequeno módulo de *Chvorinov* para o ideal escoamento. Por meio de simulações realizadas no *software* SolidCAST versão 8.4.0 foi possível visualizar as concentrações de defeitos da peça fundida, mostrando que as dimensões projetadas atenderiam a necessidade de não haver rechupe e porosidade na peça útil. Suas dimensões podem ser observadas na Figura 05.

Figura 05 – Desenho esquemático do molde “Y” com indicação dos corpos de prova

Fonte: Autoria própria, 2017.

O forno elétrico de resistência utilizado para a fundição foi projetado e confeccionado dentro das dependências da universidade e por ser um protótipo, seu tempo médio de aquecimento até temperaturas de 700 °C é de 40 minutos. Durante este tempo de aquecimento, o alumínio puro, o magnésio e o silício foram aquecidos separadamente em estufa a aproximadamente 200 °C para retirar a umidade presente. Uma vez aquecidos, o cadinho foi carregado primeiramente com alumínio e depois silício. Quando os dois elementos haviam fundido por completo e o metal líquido aparentava estar homogêneo, foi adicionado o magnésio, já que o mesmo queima muito rápido e deve ser adicionado ao metal líquido momentos antes de realizar o vazamento. Durante todo este processo o molde metálico permaneceu dentro de um forno de resistência elétrica pré-aquecendo a uma temperatura de 350 °C para prevenir trincas térmicas e garantir a fluidez do metal durante o vazamento. Quando o metal líquido atingiu a temperatura de vazamento de 740 °C, o molde foi retirado do forno e posto sobre a base metálica para o vazamento.

Foram realizados 3 vazamentos com diferentes condições de solidificação para comparação e definição de um parâmetro ótimo de vibração. Como o dispositivo de vibração utilizado é pneumático, um regulador de pressão foi acoplado ao mesmo e a linha de ar comprimido para que fosse possível variar e controlar as intensidades de vibração. De acordo com o fabricante, a capacidade deste dispositivo é de no máximo 6 bar de pressão. Dois testes foram realizados utilizando o dispositivo de

vibração e o molde para encontrar as frequências e amplitudes atingidas com diferentes pressões e também para saber qual a pressão máxima possível de ser utilizada. Foi possível observar que acima de 3 bar de pressão, o molde já não vibrava com amplitudes significativas, entrando em um modo de quase ressonância. Portanto, os parâmetros ficaram restritos ao máximo de 3 bar. Logo, as amostras utilizadas para o estudo deste trabalho de conclusão de curso foram obtidas estaticamente e com duas intensidades de vibração de 1 e 2 bar de pressão do ar. Com 1 bar de pressão foi possível atingir frequência de aproximadamente 110 Hz e amplitudes de 1 G. Com 2 bar de pressão os parâmetros aumentaram para cerca de 190 Hz de frequência e 2 G de amplitude.

Os parâmetros utilizados nos 3 vazamentos foram iguais e se encontram na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de processamento por fundição

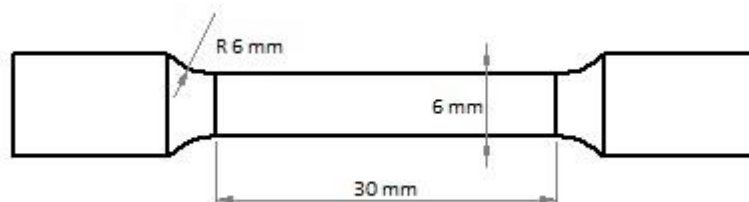
Parâmetro	Valor
Temperatura de vazamento (°C)	740
Temperatura do molde (°C)	350
Tempo de vibração (minutos)	3

Fonte: Autoria própria, 2017.

3.3 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Com a peça fundida e resfriada, os massalotes foram cortados com uma serra manual e a parte retangular inferior foi dividida em 7 amostras de 14 mm de altura cada, totalizando 21 corpos de prova. Corpos de prova em formato cilíndrico foram confeccionados segundo a norma ASTM B557M-10. O padrão escolhido para o corpo de prova cilíndrico segundo a norma está destacado na Figura 06, com 6 mm de diâmetro e 30 mm de comprimento útil. As amostras para os ensaios de dureza, microdureza e metalografia foram obtidos a partir dos corpos de prova de tração.

Figura 06 - Modelo de corpo de prova para ensaio de tração segundo a norma ASTM B557M-10 para alumínio fundido.



Fonte: Norma ASTM B557M-10

Para facilitar a diferenciação dos 21 corpos de prova, uma nomenclatura foi adotada e será utilizada na apresentação dos resultados deste trabalho. A parte útil retangular da peça foi seccionada em 7 amostras de aproximadamente 14 mm de altura cada e numeradas de 1 a 7 de baixo para cima como mostra a Figura 04.

Os corpos de prova vazados sem vibração levam o prefixo 0, de 0 bar. Analogamente, os corpos de prova obtidos com 1 e 2 bar de pressão, levam o prefixo de 1 e 2 respectivamente. Portanto os corpos de prova levam a nomenclatura de 01-07; 11-17 e 21-27.

3.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E MICROESTRUTURAL

3.4.1 Determinação da composição química

Como não foi possível a obtenção da liga de alumínio 356.0 pronta para a fundição, foi necessário adicionar elementos de liga ao alumínio puro para formar a liga em questão. O primeiro ponto de análise dos corpos de prova foi a composição química para certificar de que a liga obtida era de fato a 356.0. A espectrometria foi realizada no equipamento de análise de metais ESPECTROMAXx do fabricante Espectro nas dependências da Alcast do Brasil® de Francisco Beltrão. Foram realizadas três leituras em cada amostra para obtenção da composição química.

3.4.2 Ensaio de tração

O ensaio de tração foi realizado segundo a norma ASTM B557M-10 para a obtenção dos valores limites de resistência a tração bem e percentual de alongamento. Os corpos de prova foram posicionados na máquina de tração marca TIME modelo WDW100E e tracionados até seu rompimento.

3.4.3 Análise Microestrutural

Para a análise microestrutural foi utilizado os corpos de prova já rompidos no ensaio de tração realizado anteriormente. A distribuição das amostras foi realizada da seguinte maneira: Foi escolhido os dois extremos de cada amostra (maior e menor valor de resistência a tração para cada condição de vazamento) resultando em 6 amostras para realização da metalografia.

Os corpos de prova foram cortados na parte central e embutidos em resina em uma embutidora Fortel EF-30. Depois de embutidos, as amostras foram lixadas em 3 lixas com granulometrias de #120, #600 e #1200 e depois polidas em pano para polimento metalográfico, primeiro em alumina 0,3 μm e depois em pasta de diamante natural $\frac{1}{4}$ μm com adição de suspensão de diamante policristalino (*Polycrystalline Diamond Suspension* 0,1 μm) da fabricante BUEHLER para prolongar a umidade da pasta.

Depois de polidos, as amostras foram submetidas ao ataque químico em solução de ácido fluorídrico 0,5% (HF 0,5%). O ataque químico promove a limpeza superficial e permite a visualização da microestrutura metálica bem como suas fases, contornos de grão, imperfeições, porosidades e ocorrência de intermetálicos. As amostras ficaram cerca de 5 segundos imersas no HF, depois passaram por um processo de limpeza em álcool e secagem.

3.4.4 Ensaio de dureza Rockwell F

Para o ensaio de dureza Rockwell F, foram utilizados os corpos de prova rompidos no ensaio de tração, uma vez que a marca deixada pelo ensaio é grande não sendo viável realizar o mesmo nas amostras embutidas. Neste ensaio a carga utilizada é de 60 kg com punção de esfera de 1/16” no aparelho Digimess. Para este ensaio foi utilizado as mesmas amostras que foram embutidas, ou seja, as com maiores e menores valores de resistência a tração, e também uma amostra intermediária.

Para os dois ensaios de dureza foram realizadas sete leituras em cada amostra para fazer a média e o desvio padrão.

3.4.5 Microscópio Eletrônico de Varredura

Imagens foram obtidas através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) ZEISS EVO MA15 da UTFPR *Campus* Curitiba.

As imagens foram retiradas das amostras embutidas, já lixadas, polidas e atacadas quimicamente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE QUÍMICA

Os resultados da análise química foram satisfatórios e mostram que a liga obtida é de fato a liga de alumínio 356.0 com pequenas variações em porcentagem de Fe e Mg. Estas alterações sozinhas não acarretam em formação de outra liga, porém estas pequenas variações podem alterar suas propriedades mecânicas e microestruturais.

A concentração superior a estabelecida por norma de Fe na liga, pode ter efeito sobre a maior quantidade de intermetálicos formados e sua composição. A liga obtida neste trabalho também apresentou teores de magnésio acima do recomendado pela norma ASTM B108-03. O Mg em maiores quantidades aumenta a resistência mecânica e sua ductilidade. As concentrações de cada elemento em cada amostra podem ser analisadas na Tabela 2.

Tabela 2- Resultados da análise da composição química

	<i>Si (%)</i>	<i>Mg (%)</i>	<i>Cu (%)</i>	<i>Fe (%)</i>	<i>Mn (%)</i>	<i>Zn (%)</i>	<i>Ti (%)</i>	<i>Al (%)</i>
356.0	6,5-7,5	0,2-0,45	0,25	0,6	0,35	0,35	0,25	Restante
0 BAR	7,73	0,86	0,092	0,62	0,0539	0,0337	0,0092	90,464
1 BAR	7,48	0,68	0,2198	0,62	0,0686	0,0409	0,0101	90,768
2 BAR	6,98	0,66	0,115	0,5	0,0565	0,0371	0,0127	91,549

Fonte: Autoria própria, 2017.

4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

Durante a usinagem dos corpos de prova notou-se poros na região central de duas amostras obtidas sem vibração (05 e 06) que tiveram de ser excluídas dos ensaios de tração devido a tendência do corpo de prova romper nos poros, como podem ser observados na Figura 07.

Figura 07 – Corpos de prova (a) 05 e (b) 06 obtidos sem vibração excluídos dos ensaios de tração



Fonte: Autoria Própria, 2017.

A porosidade das amostras se deve a alguns fatores: (i) o molde em formato “Y” utilizado para o vazamento do metal possuía o topo aberto; (ii) a posição do forno cadinho e a do molde eram praticamente fixas e distantes entre si; (iii) há possibilidade de incorporação de gases durante a fusão do metal. Uma vez que era inviável aproximar o bocal do cadinho com o molde aberto, o metal líquido foi vazado de modo turbulento. Os dois corpos de prova excluídos do ensaio foram obtidos estaticamente, ou seja, não ocorreu a desgaseificação do metal, ocasionando macro e micro poros. Já nas amostras vibradas, notou-se a presença de microporosidade na superfície usinada, porém, como previsto, a vibração do metal líquido permite que os gases não fiquem presos.

Os resultados obtidos no ensaio de tração segundo a norma B557M-10 são apresentados nas Tabelas 3, 4 e 5.

Tabela 3 – Resultados do ensaio de tração nas amostras do corpo de prova fundido sem vibração

Corpos de Prova	Alongamento [%]	Tensão [MPa]
1	3,66	155,44
2	7,00	125,82
3	10,40	126,27
4	8,33	126,99
7	6,86	151,50
Média	7,25	137,20
Desvio	2,46	14,92

Fonte: Autoria própria, 2017.

De acordo com a Tabela 3 podemos notar que os corpos de prova com valores extremos de tensão limite de ruptura foram amostras 01 e 02 com 155,44 MPa e 125,82 MPa, respectivamente.

Tabela 4 – Resultados do ensaio de tração nas amostras do corpo de prova fundido sob 1 bar de pressão

Corpos de Prova	Alongamento [%]	Tensão [MPa]
11	3,46	163,75
12	9,67	134,16
13	7,66	112,64
14	11,33	147,44
15	x	123,39
16	11,00	107,05
17	x	137,36
Média	8,62	133,01
Desvio	3,22	23,68

Fonte: Autoria própria, 2017.

Já nos corpos de prova vibrados com 1 bar de pressão, as amostras que obtiveram os valores extremos de tensão limite de ruptura foram as amostras 11 e 16, com 163,75 MPa e 107,05 MPa, respectivamente.

Tabela 5 – Resultados do ensaio de tração nas amostras do corpo de prova fundido sob 2 bar de pressão

Corpos de Prova	Alongamento [%]	Tensão [MPa]
21	12,67	178,17
22	8,33	152,49
23	11,33	168,87
24	13,77	166,83
25	8,67	149,07
26	x	140,71
27	12,00	138,52
Média	10,94	163,08
Desvio	2,17	14,74

Fonte: Autoria própria, 2017.

Já nos corpos de prova vibrados com 2 bar de pressão, as amostras que obtiveram valores extremos de tensão limite de ruptura foram as amostras 21 e 27 com 178,17 MPa e 138,52 MPa, respectivamente.

A Tabela 6 mostra os resultados da resistência a tração das 3 condições de fundição que ficaram acima da mínima citada na norma ASTM B-108.

Tabela 6 – Resultados de resistência a tração acima de 145 MPa de acordo com a norma ASTM B-108

Posição do Corpo de Prova	0 Bar	1 Bar	2 Bar
1	155,44	163,75	178,16
2	*	*	152,49
3	*	*	168,87
4	*	147,44	166,83
5	*	*	149,07
6	*	*	*
7	151,5	*	*
Média	153,47	155,60	163,08
Desvio	2,79	11,53	12,08

Fonte: Autoria Própria, 2017.

Nota-se a partir da Tabela 6 que o melhor resultado de resistência a tração é dos corpos de prova vibrados com 2 bar de pressão com valor de 163,08 MPa. Além de ser o maior valor de resistência, também se encontra o menor valor do desvio padrão.

O desvio padrão é um dado numérico que indica a variabilidade dos resultados encontrados. É normalmente utilizado como forma de analisar se a amostra é uniforme e o ensaio confiável. Quanto maior o desvio padrão, maior a variação de resultados, e vice-versa.

Com base na norma ASTM B-108, a resistência mínima a tração para esta liga de alumínio é de 145 MPa e o alongamento mínimo de 3%. Conforme os dados da Tabela 06, é possível observar que vários resultados ficaram abaixo do valor limite de resistência a tração. A amostra não vibrada e a vibrada com 1 bar de pressão foram as que mais tiveram resultados abaixo do limite (cinco), enquanto que a vibrada com 2 bar de pressão foi a que menos teve resultados insatisfatórios (apenas dois). Um dos motivos para tanto é a quantidade e o tamanho dos poros das duas primeiras amostras, que obtiveram valores semelhantes de resistência a tração, como pode ser observado na Figura 07. Já na amostra vibrada com 2 bar de pressão, a média obtida não só é a mais elevada dentre as três como também possui o maior resultado de todos os ensaios realizados, 178,16 MPa.

Quanto ao alongamento, é possível observar que os valores médios do alongamento apresentam valores crescentes para as condições sem vibração, com 1 e 2 bar de pressão, respectivamente. O aumento da ductilidade na amostra obtida

sem vibração se deve ao fato do acréscimo de Mg na liga metálica. O limite da liga de alumínio 356.0 é de 0.45% Mg em peso, e a porcentagem encontrada nesta amostra foi de 0,86% Mg. Nas amostras obtidas com 1 e 2 bar, o valor do Mg diminuiu para 0,68 e 0,66% em peso, respectivamente. Mesmo estando acima do limite estabelecido por norma, o valor é menor do que o obtido na amostra sem vibração e seus alongamentos foram superiores.

4.3 ENSAIOS DE DUREZA ROCKWELL F

A Tabela 7 a seguir mostra os resultados obtidos no ensaio de dureza Rockwell F.

Tabela 7 – Valores de dureza Rockwell F obtidos nos corpos de prova

<i>0 bar</i>		<i>1 bar</i>		<i>2 bar</i>	
CP01	CP02	CP11	CP16	CP21	CP27
52,36 ± 4,82	56,03 ± 2,22	57,79 ± 4,95	53,93 ± 3,01	61,43 ± 1,21	61,93 ± 3,25
54,19 ± 4,08		55,86 ± 4,41		61,68 ± 2,37	

Fonte: Aatoria Própria, 2017.

Com base nos dados da Tabela 7 é possível observar que os valores de dureza são coerentes com desvios padrão baixos. Enquanto as amostras vibradas com 2 bar de pressão tiveram média de 61 HRF, as amostras vibradas com 1 bar de pressão e as obtidas estaticamente obtiveram médias de 55 HRF e 54 HRF, respectivamente. Nota-se, portanto, que as amostras vibradas com 1 bar de pressão ficaram com valores de dureza bem semelhantes ao das amostras não vibradas, ambas bem abaixo dos valores encontrados para as amostras vibradas com 2 bar de pressão.

Apesar do desvio padrão ter permanecido baixo em comparação aos outros ensaios de dureza, nota-se que existe uma discordância entre os valores. Esta amplitude de valores pode ser explicada ao fato das amostras estarem com a superfície porosa. Depois de usinados, ainda era possível notar a olho nu a presença de poros na superfície, como mostra a Figura 08.

Figura 08 – Porosidade nos corpos de prova não vibrados usados no ensaio de dureza Rockwell F

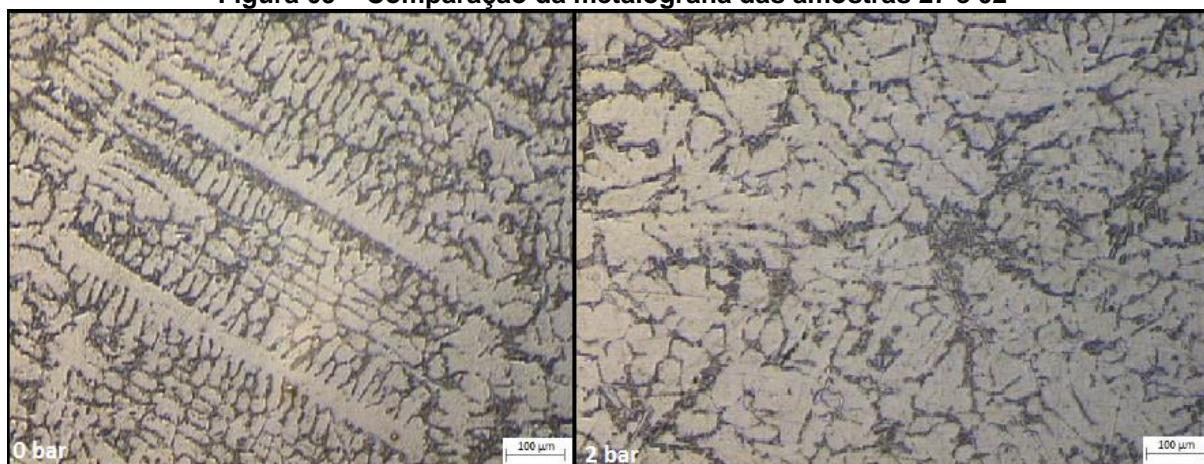


Fonte: Autoria Própria, 2017.

4.4 METALOGRAFIA

A análise da microestrutura resultante da solidificação com uso da vibração permite uma correlação dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos com as fases, contornos de grão, e morfologias

Figura 09 – Comparação da metalografia das amostras 27 e 02



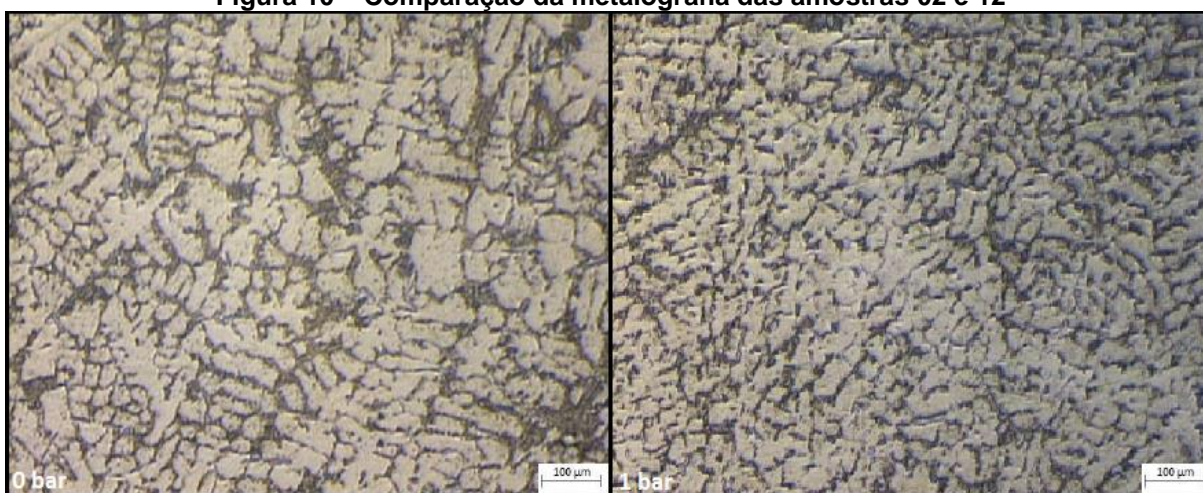
Fonte: Autoria Própria, 2017.

Na Figura 09, podemos notar a diferença de microestrutura existente entre as amostras obtidas estaticamente e com 2 bar de pressão. Na imagem da esquerda, é possível observar duas grandes dendritas, microestrutura característica de um resfriamento rápido. Já na imagem da direita, os grãos estão mais arredondados e com menos formato de lamelas. Os resultados de dureza destas duas amostras foram 56 e 61 HRF, respectivamente. O maior valor de dureza obtido na amostra vibrada

com 2 bar pode ser explicado devido ao formato de seus grãos. Quanto mais refinada a microestrutura, com grãos menores e mais arredondados, maior a dureza e a homogeneidade do material. Esta diferença microestrutural também justifica as diferenças de resultados de resistência a tração entre os dois corpos, 125,82 MPa para a amostra 02 e 138,52 MPa para a amostra 27.

As amostras obtidas com 1 bar de pressão, não tiveram uma mudança tão significativa quando comparada as amostras obtidas estaticamente, como se pode perceber na Figura 10.

Figura 10 – Comparação da metalografia das amostras 02 e 12

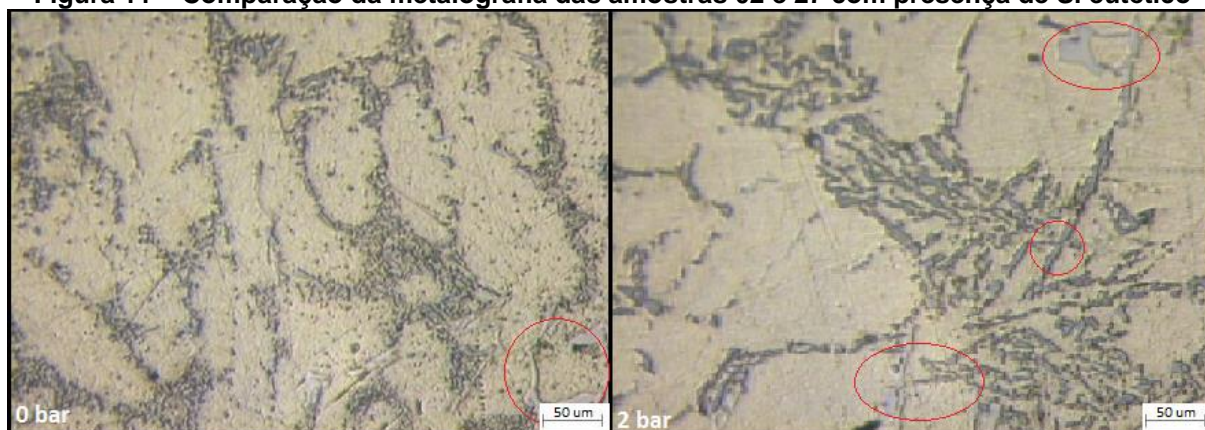


Fonte: Autoria Própria, 2017.

É possível perceber que os grãos de fato ficaram menores e que as dendritas foram quebradas, porém não se nota quase nenhum arredondamento as mesmas. Independente da quebra das dendritas, os grãos da amostra vibrada com 1 bar ainda possuem características lamelares.

Outro ponto importante que foi observado na metalografia, foi a presença de intermetálicos e de fases do Si eutético.

Figura 11 – Comparação da metalografia das amostras 02 e 27 com presença de Si eutético



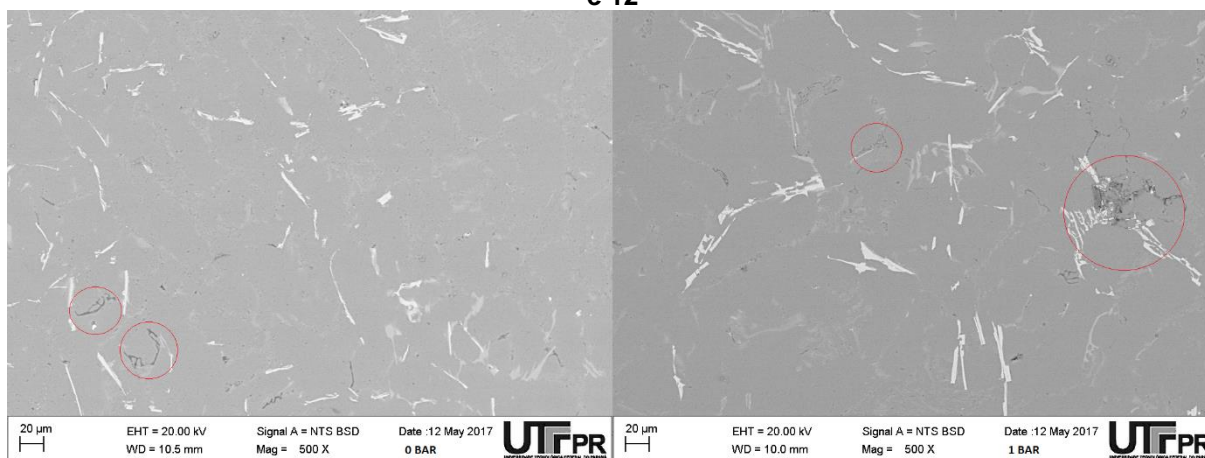
Fonte: Autoria Própria, 2017.

Na Figura 11 é possível notar que além dos grãos e da matriz metálica existe ainda um elemento de formato lamelar mais fino com coloração bem clara, quase branca. Este terceiro elemento é, provavelmente, a formação do Si eutético.

4.5 MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA

Com as imagens obtidas com o microscópio eletrônico de varredura (MEV) foi possível visualizar de forma mais clara a presença da fase do Si eutético e dos intermetálicos de Fe.

Figura 12 – Comparação das imagens obtidas no MEV com ampliação de 500x das amostras 02 e 12

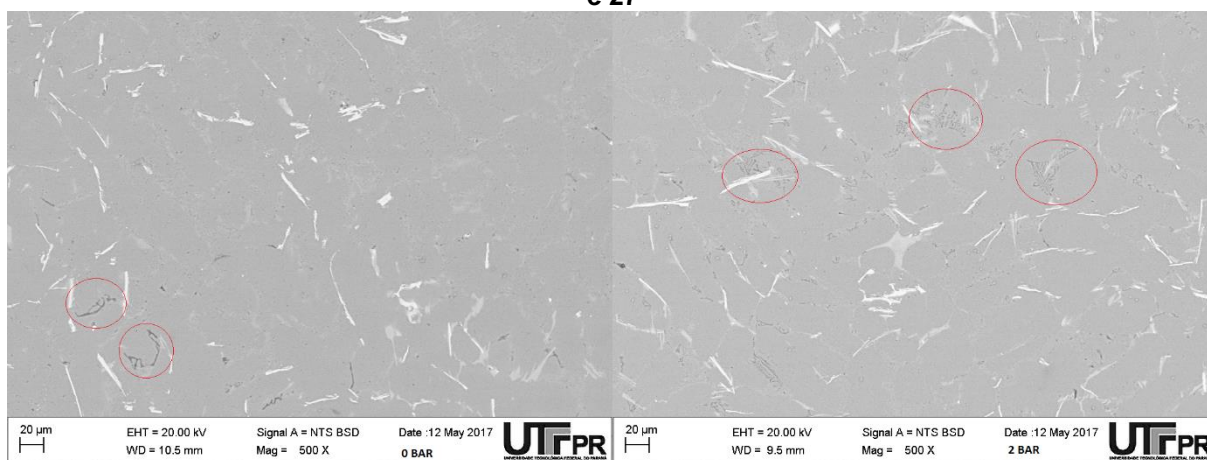


Fonte: Autoria Própria, 2017

É possível notar que na matriz existem dois outros elementos, um lamelar mais claro e um mais escuro, intermetálico de Al_8Fe_2Si , que normalmente aparece em

forma de “espinha de peixe” ou também chamados de “escrita chinesa” (*Chinese Script*). De fato, ambos elementos aparecem nas duas imagens, porém com diferenças de tamanho e quantidade. Na amostra obtida estaticamente (esquerda) as lamelas de Si eutético estão bem dispersas e há pequenos intermetálicos na borda esquerda. Já na amostra obtida com 1 bar de vibração (direita) a quantidade de intermetálicos e seus tamanhos são bem maiores e os Si eutético está mais pronunciado.

Figura 13 - Comparação das imagens obtidas no MEV com ampliação de 500x das amostras 02 e 27



Fonte: Autoria Própria, 2017.

A Figura 13, que compara as amostras 02 e 27, é muito mais fácil notar a diferença microestrutural entre elas. Na amostra 27, vibrada com 2 bar de pressão, nota-se que tanto as lamelas de Si eutético quanto os intermetálicos de Fe estão bem melhor distribuídos na matriz, e em maior quantidade.

5 CONCLUSÃO

Com o objetivo de avaliar os efeitos que a vibração mecânica possui nas propriedades mecânicas da liga de alumínio 356.0 durante sua solidificação e, com base nos resultados obtidos com a realização dos ensaios mecânicos de tração e dureza e análise microestrutural, destaca-se as seguintes conclusões:

A vibração mecânica aplicada ao molde durante o vazamento auxilia na desgaseificação do metal líquido, como foi possível observar no tamanho e quantidade de poros nas amostras não vibrada e vibradas com 1 e 2 bar de pressão.

Houve mudanças na microestrutura das amostras. Enquanto a microestrutura da amostra não vibrada se apresentou de forma lamelar dendrítica, as outras amostras já apresentavam sinais de quebra destas dendritas. Além da quebra das dendritas, os grãos se tornaram mais arredondados e refinados, com presença de intermetálicos de Fe e Si eutético dispersos na matriz. Entre as duas amostras vibradas, notou-se que, à medida que aumenta a intensidade de vibração, mais bem distribuídos ficam os intermetálicos e o eutético.

Tanto a redução da porosidade quanto a mudança microestrutural e presença de outros elementos na matriz influenciam as propriedades mecânicas do material. Da amostra não vibrada para a amostra vibrada com 1 bar de pressão, não foi possível notar um aumento efetivo de propriedades, porém, quando se comparam estas amostras com as obtidas com 2 bar de pressão, o aumento é significativo. A resistência a tração aumentou 6,2% da amostra vibrada com 2 bar de pressão (163 MPa) em relação a não vibrada (137 MPa) e cerca de 12,5% em relação ao valor máximo citado na norma (145 MPa) para o processo convencional. O ensaio de dureza mostrou um aumento de 12,9% nos resultados da amostra vibrada com 2 bar de pressão (62 HRF) em relação a não vibrada (54 HRF).

Quanto ao aumento de ductilidade, mesmo com a redução da concentração de Mg na liga, foi possível obter valores maiores de alongamento. Isto se deve a um dos efeitos da vibração: mudança microestrutural. Como dito anteriormente, a vibração permite quebrar as dendritas resultado em aumento da resistência a tração bem como da ductilidade.

REFERÊNCIAS

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

AMERICAN SOCIETY FOR METALS, **Metals Handbook**, vol 2, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, **Alumínio**. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/aluminio/vantagens-do-aluminio>> Acesso em: 2 out. 2016.

IRIZALP, Simge Gencalp. SAKLAKOGLU, Nursen. **Effect of Fe-rich intermetallics on the microstructure and mechanical properties of thixoformed A380 aluminum alloy**. Engineering Science and Technology, an International Journal, vol 17, p.58-62, 2014.

IRIZALP, Simge Gencalp. SAKLAKOGLU, Nursen. **Semisolid microstructure evolution during cooling slope casting under vibration of A380 aluminum alloy**. Materials and Manufacturing Process, vol 25, p. 943-947, 2010.

JIAN, X. MEEK, T.T. HAN, Q. **Refinement of eutectic silicon phase of aluminum A356 alloy using high-intensity ultrasonic vibration**. Scripta Materialia, vol 54, p. 853-896, 2006.

JIAN, Xiaogang. XU, Hanbing. MEEK, Thomas T. HAN, Qingyou. **Effect of power ultrasound on solidification of aluminum A356 alloy**. Materials Letters, vol 59, p.190-193, 2005.

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 aluminum alloy produced by expendable pattern shell casting**. Materials Science & Engineering A, vol 619, p. 228-237, 2014.

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

LIMMANEEVICHITR, Chaowalit. PONGANANPANYA, Songwid. KAJORNCHAIYAKUL, Julatep. **Metallurgical structure of A356 aluminum alloy solidified under mecânica vibration: Na investigation of alternative semi-solid casting routes**. Materials and Design, vol 30, p.3925-3930, 2009.

LÜ, Shulin. WU, Shusen. DAI, Wei. LIN, Chong. AN, Ping. **The indirect ultrasonic vibration process for rheo-squeeze casting of A356 aluminum alloy.** Journal of Materials Processing Technology, vol 212, p. 1281-1287, 2012.

PILLAI, R.M. KUMAR, K.S.B. PAI, B.C. **A simple inexpensive technique for enhancing density and mechanical properties of Al-Si alloys.** Journal of Materials Processing Technology, vol 146, p. 338-348, 2004.

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

THE ALUMINUM ASSOCIATION, **Sustainability.** Disponível em: <<http://www.aluminum.org/aluminum-sustainability>> Acesso em: 21 set. 2016.

XIANGFA, L.; GUANGHUI, Q.; XIUFANG, B. **The size sudden change and structure evolution of the macro-grains of al-si.** Materials science forum, v.331, n. p. 367-372, 2000.

XU, Hanbing. JIAN, Xiaogang. MEEK, Thomas T. HAN, Qingyou. **Degassing of molten aluminum A356 alloy using ultrasonic vibration.** Materials Letters, vol 58, p. 3669-3673, 2004.