



UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIAS

FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

HÁRITA DA SILVA SILVA

ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO DA LIGA Al-Si

OBTIDA POR *SQUEEZE CASTING*

MARABÁ – PARÁ

2018

HÁRITA DA SILVA SILVA

**ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO DA LIGA Al-Si
OBTIDA POR *SQUEEZE CASTING***

Trabalho de Conclusão de Curso, feito sob a orientação da Prof.^a Dr.^a Camila dos Santos Torres e apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

MARABÁ – PARÁ

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca II da UNIFESSPA. CAMAR, Marabá, PA

Silva, Hárta da Silva

Endurecimento por precipitação da liga Al-Si obtida por *Squeeze Casting* / Hárta da Silva Silva ; orientadora, Camila dos Santos Torres. — 2018.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Engenharia de Materiais, Curso de Engenharia de Materiais, Marabá, 2018.

1. Alumínio. 2. Ligas de alumínio - Tratamento térmico. 3. Micrografia. 4. Engenharia de materiais. I. Torres, Camila dos Santos, orient. II. Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará. III. Título.

CDD: 22. ed.: 669.722

Elaborado por Nádya Lopes Serrão
Bibliotecária-Documentalista CRB2/575

HÁRITA DA SILVA SILVA
TRABAHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO DA LIGA Al-Si
OBTIDA POR *SQUEEZE CASTING*
APROVAÇÃO

Após a aprovação da discente **Hárita da Silva Silva**, matricula nº 201340606022, a Banca Examinadora, composta pelos membros abaixo, reuniu-se e aprovou o presente trabalho que, por atender aos requisitos estabelecidos, recebeu o conceito Requizar.

Marabá, 14/03/2018

Camille Torres

Prof.^a Dr.^a Camila dos Santos Torres
(FEMAT – IGE – UNIFESSPA – Orientador)

Lygia Polícarpio Ferreira

Prof.^aDr.^a Lygia Maria Policarpio Ferreira
(FEMAT – IGE – UNIFESSPA – Membro)

John Bernardo VilcaNeira

Prof.Dr. John Bernardo VilcaNeira
(FEMAT – IGE – UNIFESSPA – Membro)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por sua grandeza e generosidade que me fizeram chegar até aqui. À minha família, por todo apoio dado nestes cinco anos árduos de minha primeira graduação. A minha amiga Brenda Samira Guimaraes de Sousa pela ajuda nas horas necessárias e companheirismo durante todo o período da vida acadêmica. Ao meu colega Alan Cunha dos Anjos por sua ajuda durante a preparação metalográfica no Laboratório de Preparação de Amostras. Ao meu colega Vinicius Teixeira de Moraes por sua ajuda durante o ensaio de dureza. E a professora Lygia Maria Policarpio Ferreira, por se dispor a contribuir para a melhor a discussão deste trabalho.

RESUMO

As ligas de alumínio são utilizadas no processo de fundição devido à excelente vazabilidade, baixa massa específica, boa condutividade térmica e elétrica, boa trabalhabilidade em processos de usinagem e conformação mecânica, alta resistência à corrosão e mecânica. Atualmente, esses tipos de liga são produzidas em uma ampla variedade de composições. Dentre essas ligas, destacam-se as de as ligas de alumínio-silício, por apresentarem uma enorme variedade de aplicações. O silício ao ser adicionado como elemento de liga no alumínio provoca principalmente o aumento da fluidez do alumínio líquido permitindo que o mesmo flua melhor pelas cavidades do molde de fundição e a redução à contração volumétrica durante o resfriamento. As propriedades mecânicas e o comportamento em serviço das ligas alumínio-silício podem ser melhorados por meio dos tratamentos térmicos. Nesse sentido, o presente trabalho se propôs a analisar uma liga de Al-Si obtida pelo processo de *squeeze casting*, no que se diz a respeito ao seu comportamento durante os tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento artificial. E com esses tratamentos térmicos verificou-se uma alteração microestrutural devido os contornos dendríticos não se apresentarem mais tão bem definidos. As medições de dureza indicaram um valor maior na amostra obtida com maior pressão no processo de *squeeze casting*.

Palavras-chave: Alumínio, Tratamentos Térmicos, Micrografia.

ABSTRACT

Aluminum alloys are used in the casting process due to excellent flowability, low specific mass, good thermal and electrical conductivity, good workability in machining processes and mechanical conformation, high resistance to corrosion and mechanics. These types of alloys are currently produced in a wide variety of compositions. Among these alloys, aluminum-silicon alloys stand out because they have a wide variety of applications. Silicon upon addition as an alloying element in aluminum primarily causes increased liquid aluminum flowability allowing it to flow better through the casting mold cavities and reducing to volumetric shrinkage during cooling. The mechanical properties and the behavior in service of the aluminum-silicon alloys can be improved by means of the heat treatments. In this sense, the present work proposed to analyze an Al-Si alloy obtained by the squeeze casting process, in what is said about its behavior during the thermal treatments of solubilization and artificial aging. And with these thermal treatments there was a microstructural change because the dendritic contours did not present themselves as well defined. Hardness measurements indicated a higher value in the sample obtained with higher pressure in the squeeze casting process.

Keywords: Aluminum, Thermal Treatments, Micrograph.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: O uso do alumínio em diversas áreas da indústria do mundo.....	17
Figura 2: Eutético Al-12%Si.....	21
Figura 3: Trecho do diagrama de fases do alumínio-silício.....	21
Figura 4: Esquema para tratamento térmico de envelhecimento.....	28
Figura 5: Fluxograma da metodologia utilizada.....	29
Figura 6: Forno mufla utilizados nos tratamentos térmicos.....	30
Figura 7: Esquema dos tratamentos térmicos.....	30
Figura 8: Equipamento utilizado no ensaio de dureza.....	31
Figura 9: Mapeamento feito nas amostras.....	31
Figura 10: Amostra com aplicação de pré-carga.....	31
Figura 11: Lixamentos das amostras.....	32
Figura 12: Lixadeira e politriz.....	33
Figura 13: Amostras polidas.....	33
Figura 14: (a) amostra da liga Al-Si obtida por <i>squeeze casting</i> sem pressão, com aumento de 100x e ataque com hidróxido de sódio; (b) amostra solubilizada e envelhecida artificialmente, com aumento de 100x e ataque com reagente Keller.....	34
Figura 15: (a) amostra da liga Al-Si obtida por <i>squeeze casting</i> com pressão de 50 MPa, com aumento de 100x e ataque com hidróxido de sódio; (b) amostra solubilizada e envelhecida artificialmente, com aumento de 100x e ataque com reagente Keller.....	35
Figura 16: (a) amostra da liga Al-Si obtida por <i>squeeze casting</i> com pressão de 100 MPa, com aumento de 50x e ataque com hidróxido de sódio; (b) amostra solubilizada e envelhecida artificialmente, com aumento de 50x e ataque com reagente Keller.....	35
Figura 17: (a) amostra da liga Al-Si obtida por <i>squeeze casting</i> com pressão de 150 MPa, com aumento de 50x e ataque com hidróxido de sódio; (b) amostra solubilizada e envelhecida artificialmente, com aumento de 50x e ataque com reagente Keller.....	36
Figura 18: Gráfico - Dureza Rockwell F para as amostras da liga Al-Si após os o tratamento térmico.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação das propriedades físicas, mais relevantes do alumínio puro.....	16
Tabela 2: Composição química da liga de alumínio ABNT 6351	29

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVOS GERAIS	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 PROPRIEDADES DO ALUMÍNIO	15
3.1.1 Propriedades químicas	15
3.1.2 Propriedades físicas	15
3.1.3 Propriedades mecânicas	16
3.2 APLICAÇÕES DO ALUMÍNIO	17
3.2.1 Transporte	17
3.2.2 Edificação e construção	17
3.2.3 Embalagens	18
3.2.4 Energia	18
3.3 LIGAS DE ALUMÍNIO	19
3.3.1 Ligas de alumínio-silício	20
3.3.1.1 Microestrutura das ligas de alumínio-silício	21
3.3.2 Classificação das ligas de alumínio	22
3.3.2.1 Ligas para forjamento	22
3.3.2.2 Ligas para fundição	23
3.4 FUNDIÇÃO EM LIGAS DE ALUMÍNIO	25
3.5 PROCESSO <i>SQUEEZE CASTING</i>	26
3.6 TRATAMENTOS TÉRMICOS	26
3.6.1 Solubilização	26
3.6.2 Envelhecimento	27

4. MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1 FLUXOGRAMA DOS PROCEDIMENTOS REALIZADOS	29
4.1 MATERIAIS	29
4.2 MÉTODOS	29
4.2.1 Tratamentos térmicos.....	29
4.2.2 Ensaio de dureza.....	30
4.2.3 Metalografia	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
5.1 ANÁLISE MICROESTRUTURAL	34
5.2 DUREZA	36
8. CONCLUSÃO.....	38
9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	39
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

1. INTRODUÇÃO

O alumínio é o elemento metálico mais abundante presente na crosta terrestre (cerca de 8,13%). É encontrado apenas no estado combinado como óxidos ou silicatos devido sua forte afinidade com o oxigênio, sendo assim não é encontrado na natureza em sua forma elementar. Da bauxita se extrai a maior quantidade de alumínio produzido comercialmente, encontrado nela uma concentração de 40 a 80% de alumina. O Brasil possui a terceira maior reserva de bauxita do mundo, aproximadamente 3,52 bilhões de toneladas, onde a maior parte fica no estado do Pará (90,8%) (Silva, 2014).

A baixa massa específica, a alta resistência mecânica e à corrosão, uma boa condutividade elétrica e térmica, capacidade de se ligar com uma grande quantidade de elementos, uma boa relação entre resistência mecânica e densidade faz com que o alumínio seja utilizado para muitas aplicações. Essas propriedades são requeridas para as matérias primas da indústria que necessitam diversificar seus produtos e criar soluções para outros mercados, como exemplo, o setor automotivo e de construção civil (Silva, 2014).

Para aumentar as propriedades mecânicas, o alumínio é ligado com outros elementos como o cobre, magnésio, silício e zinco. Uma vez ligado o alumínio aumenta sua resistência mecânica por meio de deformação ou por meio de um tratamento térmico (Cavazos, 1998). Com base no principal elemento de liga, as ligas de alumínio são designadas de acordo com o sistema de design de liga da *Aluminium Association*, que consiste em quatro dígitos numéricos (Nayak, 2011).

As ligas de alumínio e silício são de grande importância para a engenharia, pois apresentam diversas propriedades, dentre elas, alta relação resistência. Além disso, o silício confere alta fluidez e baixo encolhimento, o que resulta em boa soldabilidade (Nayak, 2011).

A fundição é um processo prático para a fabricação de componentes metálicos, permitindo produzir desde peças de pequeno tamanho até peças que pesam várias toneladas. Dentre os tipos de fundição o *squeeze casting* destaque-se por sua inovação (Sampaio, 2013). O processo de *squeeze casting* constitui-se basicamente na solidificação do metal aplicando alta pressão em um molde metálico gerando uma transferência de calor rápida e resultando em uma peça livre de poros e granulação fina (Dorcic, 1988).

O alumínio e suas ligas podem ser tratados termicamente através de homogeneização, solubilização/envelhecimento e recozimento pleno (Silva, 2014). A eficiência do tratamento de solubilização depende da qualidade dos fundidos obtidos do processo de fundição, como ausência de inclusões, microrechupes, porosidades e composição química adequada (Haskel, 2009).

Para realizar o tratamento térmico, os elementos de liga devem ser parcialmente solúveis no estado sólido com o alumínio, com isso o tratamento térmico conhecido como envelhecimento pode ser realizado, chamando-o de natural se efetuado a temperatura ambiente ou artificial se for realizado a uma temperatura mais alta (Cavazos, 1998).

O ensaio de dureza avalia o grau de endurecimento superficial por tratamentos térmicos e a resistência mecânica em geral do material, uma vez que as características mecânicas de sua superfície estão associadas ao grau de transferência térmica. (Luz, 2018).

Nesse contexto, o presente trabalho se propôs a utilizar o tratamento térmico de solubilização e envelhecimento artificial para verificar as alterações que provocam na microestrutura, analisando a resistência mecânica de amostras da liga Al-Si que anteriormente haviam passado por processo de *squeeze casting*.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

O presente trabalho tem por objetivo fundamental, desenvolver uma análise do efeito do tratamento térmico em amostras da liga 6351 obtidas por *squeeze casting*.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o efeito do tratamento térmico de solubilização e envelhecimento artificial;
- Avaliar a resistência mecânica da liga Al-Si por meio do ensaio de dureza Rockwell.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PROPRIEDADES DO ALUMÍNIO

O alumínio é obtido por eletrólise em banho de criolita, sendo o ferro e o silício as impurezas mais usuais do alumínio extraído, então para uma melhor pureza após o banho de criolita passa por um processo de refino. As propriedades do alumínio permitem que ele tenha uma diversa gama de aplicações. Por esse motivo, é um dos metais mais utilizados no mundo todo. É um material leve, durável, versátil, boa condutividade elétrica e térmica, alta relação resistência/peso, maleabilidade, soldabilidade, resistência à corrosão, resistência mecânica, dureza e reciclabilidade (Alumicopper, 2012). A gama de propriedades físicas, químicas e mecânicas que podem ser desenvolvidas é notável.

3.1.1 Propriedades químicas

O alumínio é um metal muito reativo, por causa de seu alto potencial de redução padrão. Ou seja, devido à afinidade com o oxigênio, formando uma camada de óxido superficial (Al_2O_3) dura e compacta (Cádiz, 2018).

Devido à camada protetora de óxido de alumínio se torna resistente à corrosão; resistente a produtos químicos; pode ser exposta ao clima, ao mar, etc. A formação espontânea dessa camada protetora também possibilita com que seja insolúvel em água. (Cádiz, 2018).

3.1.2 Propriedades físicas

O baixo peso, boa resistência à corrosão e alta condutividade térmica e elétrica são as propriedades que mais se destacam do alumínio e suas ligas. De modo que essas propriedades variam de acordo com o conteúdo de impurezas. É um metal branco, com uma alta reflexão de luz e calor. Possui uma boa condutividade elétrica. A condutividade térmica é a propriedade física de qualquer material que mede a capacidade de condução de calor através dele. O alumínio tem uma alta condutividade térmica cerca de 50 a 60% a do Cobre, sendo aplicado em trocadores de calor, em evaporadores e, em aparelhos de aquecimento elétrico (Cádiz, 2018).

O alumínio é um material de elevada leveza, com uma densidade de 2,7 g/cm³. A sua leveza é uma das suas propriedades mais conhecidas. Seu ponto de fusão é baixo. A Tabela 1 apresenta as propriedades físicas mais características do alumínio.

Tabela 1: Relação das propriedades físicas, mais relevantes do alumínio puro.

Propriedade	Característica – Valor
Cor	Branco
Estrutura cristalográfica	Cúbica de face centrada CFC
Parâmetro reticular (20°C)	0,40414 nm
Densidade (20°C)	2,699 g/cm ³
Mudança volumétrica durante a solidificação	6,70%
Calor de combustão	200 kcal/(atm.g)
Ponto de fusão	660,2°C
Ponto de ebulição	2057 ± 2480°C
Calor específico	930 J
Coefficiente Linear de Expansão Térmica (10 ⁶)	23° C (20 ± 100 °C)
Condutividade Térmica	80 ± 230 W/(m.K)
Condutividade Elétrica (Valor máximo)	34 ± 38 m/(Ω.mm ²)
Resistividade Elétrica	2,69 μΩ.cm
Susceptibilidade Magnética (18°C)	0,63

Fonte: Palas, 2012.

3.1.3 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas de um material metálico servem geralmente como base, visando um propósito de aplicação específico. O alumínio é um metal com excelentes propriedades mecânicas dentro do grupo dos metais não ferrosos. As propriedades mecânicas podem ser medidas por meio de ensaios, como o de dureza, fadiga e tração. A ductilidade e maleabilidade do alumínio faz com que o processo de usinagem seja facilitado em comparação com outros metais. Mas o seu ponto de fusão (660°C) e a baixa resistência mecânica não permite que o alumínio seja trabalhado a altas temperaturas, apenas se for ligado com outros metais. O módulo de elasticidade do alumínio puro é relativamente baixo e muito sensível à porcentagem de impurezas (Jimenes, 2012).

3.2 APLICAÇÕES DO ALUMÍNIO

As excelentes propriedades do alumínio resultam em inúmeras aplicações (Ricardez, 2018). A Figura 1 ilustra os seguintes campos que mais utiliza alumínio.

Fonte: Xavier, 2012.

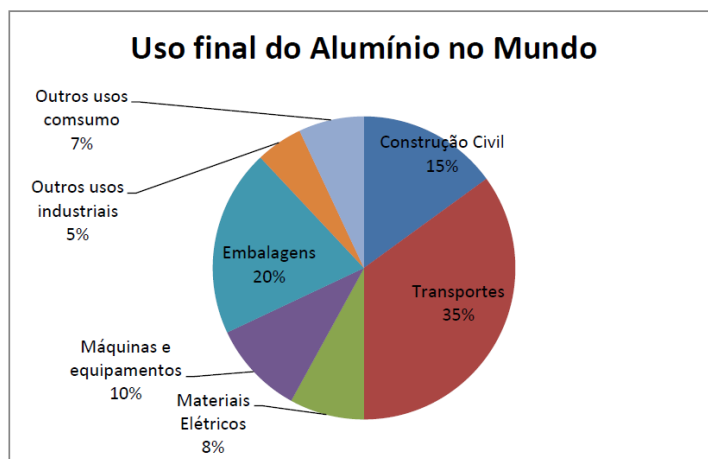


Figura 1: O uso do alumínio em diversas áreas da indústria do mundo.

3.2.1 Transporte

O uso do alumínio na indústria automotiva, durante a última década aumentou e a indústria se dedica para aumentar a sua participação no setor mais ainda. Principalmente, por causa da sua economia e sustentabilidade (Arpal, 2018).

Atualmente, se fábrica peças de alumínio fundidas (pistões, rodas, caixas de transmissão, conjuntos de suspensão), radiadores e estruturas de carrocerias. A utilização deste metal para a fabricação de veículos possui as seguintes vantagens ambientais: a sua leveza que reduz o peso do veículo em até 30%, resultando em economia de combustível, e consequentemente o veículo necessita de menos força e potência para se locomover, reduzindo a poluição. Na América do Norte e Europa, mais de 98% do alumínio contido nos carros é recuperado e reciclado. O setor ferroviário também utiliza alumínio em suas locomotivas e vagões. No setor aeroespacial, o alumínio é indispensável devido à sua leveza, resistência e maleabilidade (Arpal, 2018).

3.2.2 Edificação e construção

As formas estruturais feitas de alumínio são semelhantes com as que são feitas de aço, mas o alumínio possui o módulo de elasticidade menor que o do aço. Assim, as estruturas

feitas do alumínio devem possuir maior espessura. As estruturas de alumínio podem ser obtidas por rolamento, fundição ou extrusão (Civil, 2015).

A maior aplicação na construção civil com o alumínio são em janelas, portas, armações, grades, barras. A utilização de placas de alumínio é também comum em painéis leves que são utilizados em casas e escritórios (Civil, 2015).

3.2.3 Embalagens

Inovações, tecnologia e serviços têm garantido a forte expansão das aplicações do alumínio no setor de embalagens. No mundo e em especial no Brasil, o mercado utiliza alumínio em folhas e laminados que são aplicados em embalagens de produtos farmacêuticos, cosméticos e higiene, de limpeza, bebidas e produtos alimentícios (Abal, 2018).

O alumínio é uma das fontes mais utilizadas para invólucros flexíveis, devido à capacidade de ser reciclado e a rentabilidade. O emprego mais comum deste metal nas embalagens de alimento encontra-se em sachês, cápsulas, tampas, rótulos (Jinshu, 2017). Ela é flexível, fácil de ser revestida ou laminada, reciclável, apresenta baixo peso e tem alto potencial de decoração devido a superfície mate ou brilhante (Jinshu, 2017).

As folhas de alumínio são empregadas em mantimentos que são facilmente afetados pela luz solar, prejudicando a aparência e gosto. Então, a sua utilização como armazenamento de alimentos por longos períodos de tempo, irá evitar o contato com bactérias e germes. Em vista disso, a embalagem de alumínio promove uma barreira, aumentando a resistência à temperatura, boa condutividade térmica e durabilidade (Jinshu, 2017).

3.2.4 Energia

É através de fios e cabos de alumínio que as concessionárias transportam energia elétrica por todo o país. Só o alumínio une boa condutividade elétrica e excelente resistência mecânica com extrema leveza. Diferenciais que se revertem em maior capacidade de transmissão de energia, resistência a altas temperaturas sem perda de propriedades físicas e economia na montagem, manuseio e manutenção dos sistemas (Abal, 2018).

É por isso que o alumínio é hoje o material número um para aplicação nas linhas subterrâneas e aéreas, de transmissão, subtransmissão, distribuição e também em cabos para-raios que protegem os sistemas. Com peso específico significativamente inferior aos outros

metais, o uso de cabos de alumínio para transporte de corrente elétrica reduz o peso nas estruturas de sustentação, minimizando o custo das redes com menores investimentos e menos manutenção (Abal, 2018).

Na área rural, os cabos de alumínio são utilizados para distribuição de cargas individuais de baixas e altas tensões por grandes distâncias com alto desempenho e custo baixo (Abal, 2018).

3.3 LIGAS DE ALUMÍNIO

As ligas de alumínio, de acordo com o Callister (2002), apresentam características diferentes do alumínio primário, visto que suas propriedades dependem da sua composição, microestrutura ou tratamento térmico ou mecânico ao qual ele for submetido (Silva, 2014).

O alumínio quando fundido dissolve outros metais e metalóides, como o silício, que atua como metal. Quando ele se resfria e se solidifica, alguns dos constituintes da liga podem ser retidos em solução sólida. Isto proporciona à estrutura atômica do metal uma forma mais rígida. Os átomos podem ser vistos como sendo arranjados em uma rede cristalina regular, formando átomos de tamanhos diferentes daqueles do elemento de liga principal. O metal quente pode manter uma grande quantidade de elementos de liga em solução sólida do que quando frio. Consequentemente, quando ocorre seu resfriamento, ele tende a precipitar o excesso dos elementos de liga da solução. Este precipitado pode ser na forma de partículas duras, consistindo de compostos intermetálicos, tais como: CuAl_2 ou Mg_2Si ; estes agregados de átomos metálicos tornam a rede cristalina mais rígida (Silva, 2014).

A adição de elementos de liga no alumínio puro é devido a sua baixa resistência mecânica, melhorando suas características mecânicas sem aumentar significativamente sua densidade. Os principais elementos de liga utilizados são o silício, cobre, magnésio, zinco (Silva, 2014).

Um dos primeiros elementos testados que provou ser endurecedor de alumínio foi o zinco. Ligas de alumínio-zinco foram rapidamente aplicadas, na proporção de até 33% de elemento de liga. Apesar das promissoras perspectivas iniciais que mostraram este material, com boas características mecânicas, resultou em mau comportamento em frente à corrosão, corrigindo com a adição de outros elementos (Palas, 2012).

Assim, as ligas de alumínio possuem além do metal base, as impurezas. O ferro, titânio, sódio, estrôncio e antimônio que possuem baixa solubilidade são impurezas cuja presença deve ser controlada. Adições de cromo, níquel, vanádio, boro, prata, chumbo, bismuto, zircônio e lítio conferem propriedades especiais as ligas bifásicas, como resistência a corrosão sob tensão, controle de recristalização ou usinabilidade (Silva, 2014).

3.3.1 Ligas de alumínio-silício

As ligas de alumínio-silício são mais utilizadas como ligas de fundição, ou seja, para obtenção de peças na indústria de fundição. Mas, também encontra algumas aplicações como produtos trabalhados (Barbosa, 2014).

A diferença de densidade do alumínio e do silício é bastante pequena. O silício é, portanto um dos poucos elementos que podem ser adicionados ao alumínio sem que exista uma mudança significativa na densidade desde último. Os efeitos mais significantes do silício nas ligas de alumínio são: redução da mudança volumétrica durante a solidificação e aumento da fluidez do metal líquido permitindo que o mesmo flua melhor através das cavidades do molde de fundição (Barbosa, 2014).

As propriedades mecânicas destas ligas dependem do tamanho, forma e distribuição das partículas de silício presentes nas microestruturas que podem ser manipuladas pela apropriada seleção das condições de solidificação ou por adição dos elementos de liga (Palas, 2012). A ampla utilização das ligas Al-Si em aplicações que a qualidade da estrutura resultante da solidificação é essencial está relacionada com as características que seu principal elemento de liga, o silício, onde seu teor é usado em até 12% ou 13% (Barbosa, 2014).

Para uma liga Al-Si, a solidificação do silício é mais rápida que a do alumínio, devido o silício possuir o ponto de fusão mais alto. Ou seja, o silício nucleia mais rápido, podendo forma-se na forma de cubóides ou de agulhas (Elorz, 2012). Um exemplo, dessa estrutura resultante pode ser observada na Figura 2.

Fonte: Sekban, 2017.

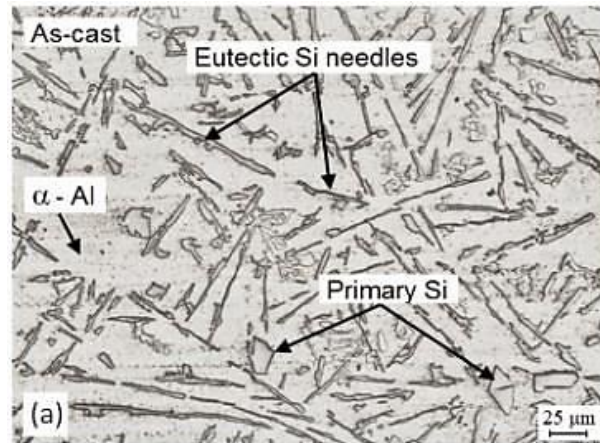


Figura 2: Eutético Al-12%Si.

As ligas de Al-Si são muito dúcteis e resistentes ao choque; tem baixo coeficiente de dilatação e uma elevada condutividade calorífica e elétrica, mas são difíceis de trabalhar mecanicamente devido à natureza abrasiva do silício (Palas, 2012).

3.3.1.1 Microestrutura das ligas de alumínio-silício

Na solidificação de ligas de alumínio com conteúdo menor que 12% de silício (hipoeutética), a primeira fase a formar é a fase rica em alumínio (Redón, 2013). A Figura 3 apresenta o trecho inicial do diagrama alumínio-silício.

Fonte: Barbosa, 2014.

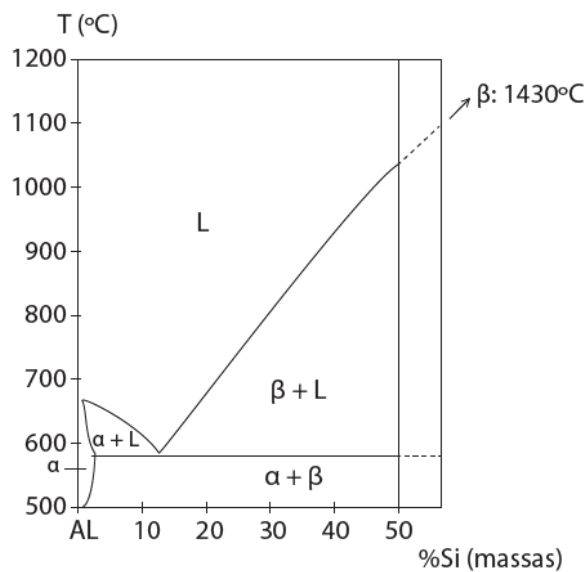


Figura 3: Trecho do diagrama de fases do alumínio-silício.

Análises da microestrutura mostram que as ligas de alumínio são caracterizadas por uma estrutura dendrítica de solução sólida α , como matriz da liga, com formação de grandes placas irregulares da fase Si- β presentes na matriz de uma maneira desordenada, grãos eutéticos ($\alpha+\beta$) com uma morfologia que depende da concentração de silício e outros elementos (Palas, 2012).

As microestruturas das ligas Al-Si se caracterizam pela presença de ferro como impureza, em teores acima de 1,5% pode levar a formação de partículas grosseiras de fase AlFeSi, prejudicando as propriedades mecânicas desses materiais. Mas, teores de ferro mais baixos minimiza a tendência da liga Al-Si soldar-se ao molde metálico na fundição em molde permanente (Barbosa, 2014).

3.3.2 Classificação das ligas de alumínio

As ligas de alumínio são divididas em duas categorias principais: produtos forjados e produtos de fundição (Palas, 2012).

As ligas forjadas (trabalhadas ou conformadas) são destinadas a fabricação de produtos semi-acabados, como laminados planos e não planos, e perfis extrudados. Sendo 85% da produção mundial de ligas de alumínio forjadas. As ligas fundidas são destinadas a fabricação de componentes fundidos (Silva, 2014).

3.3.2.1 Ligas para forjamento

Essas ligas são submetidas à deformação mecânica (trabalhado a quente ou a frio, em processo de extrusão, forjamento ou trefilação) a fim de transformar o lingote de alumínio na forma desejada (Silva, 2014).

A IADS (*International Alloy Designation System*) adaptou um sistema de designação numérico para o alumínio e as ligas de alumínio forjadas, consistindo em quatro dígitos (Silva, 2014).

O primeiro dígito da designação identifica o tipo de liga, que se refere ao principal elemento de liga, o segundo dígito está relacionado com modificações que foram feitas à liga, em que a original tem esse dígito igual a zero e as numeradas de 1-9 sofreram modificações. Os últimos dois dígitos na série 1xxx estão relacionados com a pureza da liga, por exemplo, a liga 1140 tem pureza 99,40% enquanto a 1200 tem uma pureza de 99% (Silva, 2014). Nas séries de 2 a 8 os últimos dois dígitos não tem nenhum significado em especial, servindo

apenas para identificar as diferentes ligas no grupo, por exemplo, 3003, 3004, 3005, são completamente diferentes, assim como as ligas 6061, 6063, também são diferentes (Palas, 2012). As séries das ligas de alumínio para forjamento estão a seguir:

- Série 1xxx: indica um alumínio de pureza 99,00% ou maior, com aplicações na mecânica, elétrica e química. Excelente resistência à corrosão, alta condutividade térmica e elétrica, baixa resistência mecânica, boa usinabilidade. Não tratável termicamente;
- Série 2xxx: cobre como elemento principal de liga. Apresenta resistência corrosiva inferior as outras ligas, mas boas propriedades mecânicas. Utilizadas em peças estruturais e aeronaves. Tratável termicamente;
- Série 3xxx: manganês como elemento principal de liga. Possui resistência mecânica em média 20% maior que as das ligas da série 1xxx. Não tratável termicamente;
- Série 4xxx: silício como elemento principal de liga. A porcentagem de silício pode ser até 12%, ocasionando diminuição do ponto de fusão. Por esta razão este tipo de liga é muito usada para fundição e soldas. Não tratável termicamente;
- Série 5xxx: magnésio como elemento principal de liga. Boas características para solda e boa resistência à corrosão, inclusive em atmosfera marítima. Não tratável termicamente;
- Série 6xxx: magnésio e silício são os elementos principais de liga. Menos resistente que as ligas 2xxx e 7xxx, mas com boa resistência à corrosão, média resistência mecânica e usada em soldas. Tratável termicamente;
- Série 7xxx: zinco como elemento principal de liga, mas outros elementos como o cobre, magnésio, cromo e zircônio podem-se especificar. Tratável termicamente;
- Série 8xxx: ligas com grande variedade de elementos, mas frequentemente possui lítio. Sendo aplicada a estrutura de aviões e aeronaves. Com ferro e manganês esta liga é usada para utensílios de cozinha. Podem ou não ser tratadas termicamente;
- Série 9xxx: outros elementos de liga (Palas, 2012).

3.3.2.2 Ligas para fundição

As ligas para fundição são particularmente adequadas quando os componentes a fabricar são de forma complexa. A produção de peças equivalentes por processos de

conformação plástica e união teriam custos de produção muito superiores. Na indústria de automóvel existem inúmeros exemplos desses componentes, como blocos de motor, cabeças de cilindros, caixas de transmissão e componentes de suporte estrutural do veículo, apenas possíveis de produzir por fundição. Nesta área as ligas de alumínio oferecem uma redução significativa do peso dos componentes comparativamente com os produzidos em ferro fundido (Oliveira, 2012).

A *Aluminum Association* estabelece quatro números para as ligas forjadas, mas para as de fundição incorpora um ponto decimal antes do último dígito, para diferenciar as ligas de alumínio de fundição das de forjamento (Silva, 2014).

O primeiro dígito indica o grupo das ligas. Para as series 2xx.x a 9xx.x, o grupo de ligas é determinado pelo elemento de liga presente em maior porcentagem (Palas, 2012). As series das ligas fundidas estão a seguir:

- Série 1xx.x: pertence ao alumínio puro;
- Série 2xx.x: cobre como maior elemento de liga;
- Série 3xx.x: silício com o cobre ou magnésio são os maiores elementos ligantes. Representa quase 90% de todas as ligas fundidas produzidas;
- Série 4xx.x: silício como maior elemento de liga, aumentado assim a fluidez do alumínio líquido e a obtenção de produtos com formatos complexos;
- Série 5xx.x: magnésio como maior elemento de liga;
- Série 6xx.x: não está em uso;
- Série 7xx.x: zinco como maior elemento de liga, com adição de cobre, magnésio, cromo, manganês ou combinação destes elementos na liga;
- Série 8xx.x: estanho como maior elemento de liga;
- Série 9xx.x: outros elementos (Palas, 2012).

O segundo e terceiro dígito indicam na série 1xx.x a porcentagem mínima de pureza maior que 99%, nas séries de 2xx.x a 9xx.x não possui significado especial servindo unicamente para identificar as diferentes ligas no grupo (Palas, 2012).

O último dígito, que está à direita do ponto decimal, indica a forma de fornecimento do produto, sendo: xxx.0 para peças fundidas; xxx.1 para lingotes fundidos, a partir de fusão de peças de retorno e xxx.2 para lingotes das ligas, cuja composição é controlada (Palas, 2012).

Se a liga for modificada ou contém certas impurezas, se indica essa modificação com uma letra na designação da liga. A designação das letras se faz em sequência alfabética excluindo as letras I, O, Q e X. Devido já ser usadas para outras finalidades, por exemplo, a letra X é utilizada em ligas experimentais (Palas, 2012).

3.4 FUNDIÇÃO EM LIGAS DE ALUMÍNIO

A fundição é um tipo de processamento de ligas, reportado há muito anos atrás (cerca de 5500 anos), entretanto apenas no final do século XIX é que a fundição de ligas de alumínio tomou proporções industriais; evoluindo ao longo do tempo, assim como a implementação de processos alternativos de forma a constituírem uma alternativa viável aos processos obsoletos (Kaufman, 2004).

As ligas de alumínio para fundição foram desenvolvidas, proporcionando assim qualidades de fundição ideais, como fluidez, contração relativamente pequena e a pouca tendência da formação de fissuras na contração, assim como suas propriedades melhoradas (Palas, 2012).

Os processos de fundição principais utilizados nos alumínios são: fundições em areia (areia verde ou areia seca), fundição em molde metálico permanente (baixa gravidade ou baixa pressão centrífuga) e fundição por pressão ou injeção (Kaufman, 2014).

A ampla aplicação de processos de fundição e as variações do processo na produção de composições de base de alumínio requer uma compreensão completa das características do processo e de suas capacidades (Palas, 2012).

A fundição pode ser desde pequenas peças, como próteses dentárias que pesam poucas gramas até partes de máquinas pesadas (várias toneladas), sendo assim utilizado para formas que são impossíveis de fabricar por outros procedimentos convencionais, como forjamento, laminação (Palas, 2012).

3.5 PROCESSO *SQUEEZE CASTING*

A fundição é o processo de fabricação mais econômico para se transformar material bruto em ferramentas úteis, porém assim como os outros processos ela apresenta suas falhas. Uma das maiores falhas para a fundição convencional, ou mesmo para técnicas avançadas de fundição, é a formação de defeitos tais como porosidades e defeitos de segregação. Por esse motivo novas técnicas de fundição foram desenvolvidas para compensar tais problemas, entre essas técnicas o *squeeze casting* possui grande potencial para criar componentes fundidos com menos defeitos (Ghomashchi et al;2000).

Squeeze casting é um termo genérico para especificar uma técnica de fabricação onde a solidificação é realizada sob alta pressão em um molde permanente. É um processo que combina a fundição e o forjamento em um único processo onde o metal líquido é solidificado ao mesmo tempo em que sofre uma pressão hidrostática (Ghomashchi et al; 2000).

Pelo processo de *squeeze casting*, os componentes fabricados geralmente possuem granulação fina, excelente acabamento superficial e quase livre de porosidade, além de poderem ser de diferentes tamanhos e formatos. Comparando ao método tradicional de fundição, as propriedades mecânicas são aumentadas significativamente e, além disso, melhora a soldabilidade, sendo aptas a tratamentos térmicos. O consumo de energia no processo é menor devido às peças fabricadas serem formadas em uma só operação (Vilar, 2000).

3.6 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Os tratamentos térmicos alteram as características mecânicas e estruturais dos materiais em função da sua aplicação como, por exemplo, diminuição ou aumento da dureza, aumento da resistência mecânica e melhoria da ductilidade. Os principais fatores que influenciam o resultado do tratamento térmico são aquecimento, tempo de permanência à temperatura, resfriamento e atmosfera (Silva, 2014).

3.6.1 Solubilização

A solubilização é o aquecimento do material a uma temperatura alta, geralmente relativamente próxima do ponto de fusão. Os coeficientes de difusão dos elementos de liga do alumínio são suficientemente aumentados com a elevação da temperatura, ficando de modo, que seja possível a migração desses átomos, proporcionando a dissolução, completa depois de certo tempo de permanência nesta temperatura, assim como das fases secundárias

inicialmente presentes na liga. A solubilização é fundamental para assegurar que o envelhecimento subsequente, que é realizado em temperatura mais baixa e tempo mais prolongado, ocorram controladamente, assim os precipitados serão formados controladamente, principalmente no que se refere ao tamanho dos mesmos e consequentemente sua coerência com a matriz (Infomet, 2018).

A solubilização é o aquecimento de uma liga a certa temperatura para dissolver os átomos de soluto formando uma solução sólida monofásica (Palas, 2012).

Com o resfriamento mais ou menos rápido, após o aquecimento, ocorre a esferoidização de partículas tornando a liga mais dura e deformável. Este tratamento é usual quando as ligas apresentam soluções sólidas terminais com diferença acentuada nos limites de solubilidade entre a temperatura ambiente e o máximo de solubilidade nas isothermas, sendo elas eutéticas, peritéticas, monotéticas ou mesmo eutetóides. O tempo de manutenção na temperatura de tratamento depende das características das fases presentes, de suas quantidades e grau de dispersão, de processos de conformação prévios, da temperatura e meio de aquecimento do tratamento (Silva, 2014).

A melhor resistência nas ligas é obtida pelo tratamento de solubilização. O processo consiste no aquecimento uniforme que proporciona a dissolução dos elementos de liga em meio à solução sólida (peça), em seguida resfria rapidamente, geralmente em água (Silva, 2014).

É importante ressaltar que o uso de temperaturas muito elevadas na solubilização, pode provocar redução das propriedades mecânicas devido a levar ao início de fusão da liga. E se, não for atingida a temperatura adequada à solubilização completa não ocorre, não obtendo as melhores propriedades (Silva, 2014).

Assim, deve-se considerar que a solubilização seja efetiva ao longo da peça deve ser considerado o tempo de permanência que depende da espessura da mesma (Silva, 2014).

3.6.2 Envelhecimento

O envelhecimento é a última etapa após o tratamento térmico de solubilização que consiste na precipitação controlada do soluto, formando precipitados finamente dispersos na matriz. O movimento das discordâncias durante a deformação é impedido pelos precipitados finos na liga, forçando as discordâncias a rodear os precipitados. Restringindo o movimento

das discordâncias durante a deformação, aumenta-se a resistência mecânica. Ou seja, após a etapa de resfriamento rápido, o estado de solução sólida supersaturada que é relativamente instável tende a passar para um estado de menor energia através da precipitação de fases metaestáveis ou de equilíbrio (Oliveira, 2014). A Figura 4 mostra a sequência que deve ser feita para obter um envelhecimento.

Fonte: Callister, 2002.

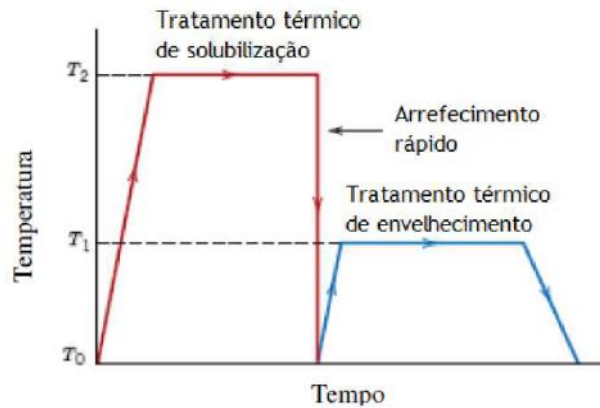


Figura 4: Esquema para tratamento térmico de envelhecimento.

Se o envelhecimento for realizado por longos períodos e/ou a altas temperaturas, os precipitados coalescem aumentando o espaçamento entre partículas. Com o crescimento os precipitados tornam-se incoerentes. A liga sobre-envelhece e fica menos resistente, em comparação com o ponto de envelhecimento máximo. A formação e o crescimento dos precipitados estão relacionados com a resistência mecânica (Oliveira, 2014).

O envelhecimento quando ocorre à temperatura ambiente designa-se por envelhecimento natural, com o uso de temperaturas elevadas designa-se por envelhecimento artificial, sendo que a maior parte das ligas requer este último tipo de envelhecimento (Oliveira, 2014).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 FLUXOGRAMA DOS PROCEDIMENTOS REALIZADOS

A Figura 5 apresenta o fluxograma da metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho.

Fonte: Autor.



Figura 5: Fluxograma da metodologia utilizada.

4.1 MATERIAIS

O material utilizado neste trabalho foi um lingote da liga Al-Si designada pela *Aluminum Association* como uma liga da série 6351. Na Tabela 2 é apresentada a composição química teórica da liga utilizada.

Tabela 2: Composição química da liga de alumínio ABNT 6351.

Análise Química da Liga 6351	Temperatura Líquido: 650°C	Temperatura Sólido: 555°C	Densidade: 2,71 g/cm ³						
Porcentagem em peso	Elementos								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Outros	Alumínio
Mínimo	0,7	-	-	0,4	0,4	-	-	-	-
Máximo	1,3	0,5	0,1	0,8	-	0,2	0,2	0,15	Restante

Fonte: Alcoa, 2010.

As amostras utilizadas, foram obtidas por *squeeze casting*, aonde foram aplicadas em cada amostra uma pressão diferente, sendo nos valores de 50 MPa, 100 MPa e 150 MPa.

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Tratamentos térmicos

Todas as amostras foram aquecidas em forno tipo mufla da marca Jung (Figura 6).

Fonte: Autor.



Figura 6: Forno mufla utilizados nos tratamentos térmicos.

Para a realização da solubilização as amostras foram aquecidas a uma temperatura de 550°C , por um período de 1 hora (com taxa de $7,5^{\circ}\text{C}$ por minuto), logo após as amostras foram resfriadas em água.

Antes de realizar o envelhecimento artificial as amostras sofreram o processo de solubilização, logo após, as amostras foram aquecidas por uma temperatura de 200°C , por um período de 2 horas, depois resfriadas dentro do forno. A Figura 7 apresenta o esquema dos tratamentos térmicos realizados.

Fonte: Autor.

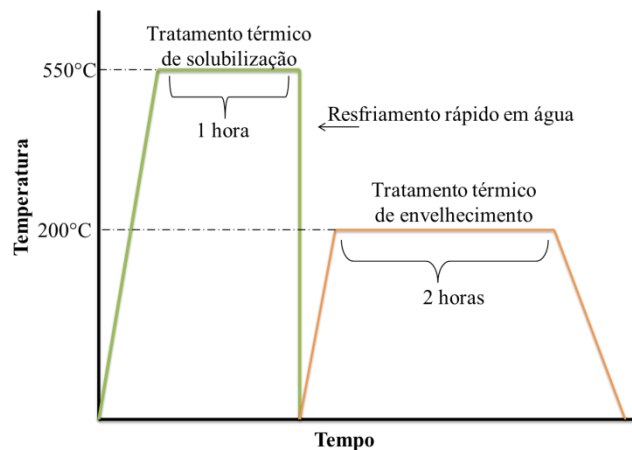


Figura 7: Esquema dos tratamentos térmicos.

4.2.2 Ensaio de dureza

Em seguida, com auxílio de um durômetro da marca Pantec (Figura 8), mediu-se a dureza das amostras da liga ensaiadas utilizando o padrão Rockwell.

Fonte: Autor.



Figura 8: Equipamento utilizado no ensaio de dureza.

A medição de dureza foi realizada por meio de um mapeamento, ou seja, a cada três mm em linha da largura da amostra foi feita uma linha onde se realizou o ensaio (Figura 9). Inicialmente mediu-se a peça bruta de fundição e em seguida as outras amostras de acordo com valor de pressão que sofreram.

Fonte: Autor.



Figura 9: Mapeamento feito nas amostras.

Ao posicionar cada amostra (Figura 10), aplicou-se a mesma uma pré-carga de 10 kgf e em seguida à carga total de 60 kgf, mostrando assim no visor do equipamento o valor da dureza.

Fonte: Autor.



Figura 10: Amostra com aplicação de pré-carga.

Adotou-se para a medição de dureza a grande Rockwell F, a escolha desta escala foi em vista que é mais indicada pela literatura além de ser aplicada principalmente as ligas de alumínio, tentou-se realizar os experimentos utilizando outra escala de dureza, a Rockwell H, mas não foi possível a análise, utilizando essa escala, visto que as amostras era muito macias para ela, se fosse-se utilizado a Rockwell H os valores obtidos no ensaio seriam abaixo do valor mínimo dessa escala.

4.2.3 Metalografia

Para um melhor manuseio das amostras, as mesmas foram cortadas com um arco de serra para diminuição das suas dimensões, seguido de um embutimento a frio.

Logo após, com auxílio de uma lixadeira manual (Figura 11), realizou o lixamento das amostras a serem utilizadas e analisadas. Cada amostra foi lixada com as lixas d'água com granulometria de #80, #120, #150, #180, #280, #360, #600, #1200, #2000, respectivamente.

Fonte: Autor.



Figura 11: Lixamentos das amostras.

Na etapa de polimento nas amostras para auxílio foi usado uma politriz de modelo PLF da marca FORTEL (Figura 12) com a utilização de alumina como abrasivo. Gerando uma superfície lisa e espelhada (Figura 13) para a análise metalográfica.

Fonte: Autor.



Figura 12: Lixadeira e politriz.

Fonte: Autor.

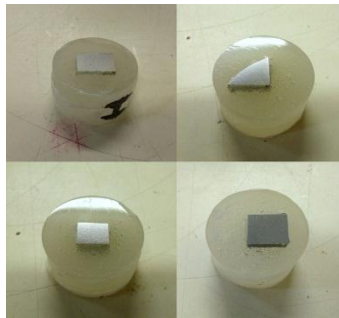


Figura 13: Amostras polidas.

Após o polimento realizou-se o ataque químico nas amostras utilizando o reagente Keller ($\text{HFHClHNO}_3\text{H}_2\text{O}$) com imersão de 5 segundos. Em seguida, depois de aplicar o reagente a análise metalográfica foi realizada no microscópio ótico da marca Zeiss Axioscop 40, onde foi realizada a caracterização microestrutural das amostras com um aumento de 50 e 100 vezes e um computador para analisar as imagens visualizadas no microscópio.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

São apresentados os resultados da microestrutura e dureza resultantes.

5.1 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Para uma melhor análise dos tratamentos realizados pelas amostras utilizou-se as micrografias do Araújo (2017) sem aplicação dos tratamentos térmicos, a fim de comparação. Nas micrografias da Figura 14, as áreas escuras são o silício que cerca as dendritas de alumínio (áreas claras).

Fonte: Autor.

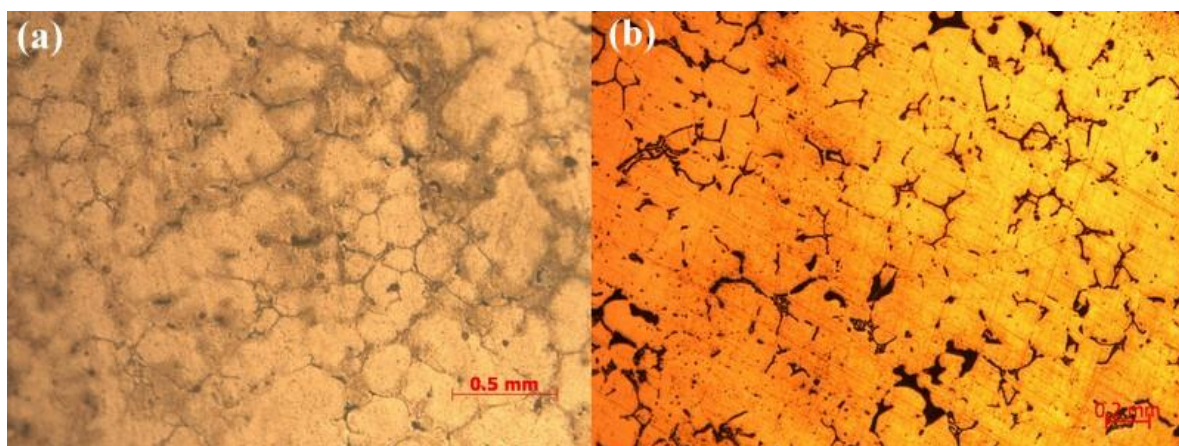


Figura 14: (a) amostra da liga Al-Si obtida por *squeeze casting* sem pressão, com aumento de 100x e ataque com hidróxido de sódio; (b) amostra solubilizada e envelhecida artificialmente, com aumento de 100x e ataque com reagente Keller.

A Figura 14 apresenta as micrografias da amostra obtida por *squeeze casting* sem pressão, antes e após o tratamento térmico de solubilização e envelhecimento artificial. É possível observar que mesmo após o processo as dendritas ainda ficaram com seus contornos bem definidos, assim como a segunda fase continua distribuída de forma irregular nos contornos de grãos. E como a amostra não sofreu pressão há uma presença considerável de poros.

O aspecto irregular desta liga de alumínio-silício antes do tratamento térmico está relacionada a diversos fatores, mas principalmente pela grande diferença entre os pontos de fusão do alumínio (660 °C) e do silício (1414 °C), ou seja, exibiram taxas de crescimento diferentes; a diferença na proporção relativa de tais constituintes e a diferença na entropia de fusão de ambos (1,35 para alumínio e 7,15 J.mol⁻¹K¹ para o silício). Então, em razão da

elevada entropia de fusão, o silício nucleia e cresce antes que o alumínio inicie a solidificação do eutético (Fisher e et al;1980).

A amostra que sofreu pressão de 50 MPa (Figura 15), os seus contornos grãos apresentam tamanho menor que a sem aplicação de pressão possivelmente devido a pressão aplicada durante a solidificação que possibilita o refinamento da microestrutura. A fase secundária ficou mais bem distribuídos nas regiões interdendríticas.

Fonte: Autor.

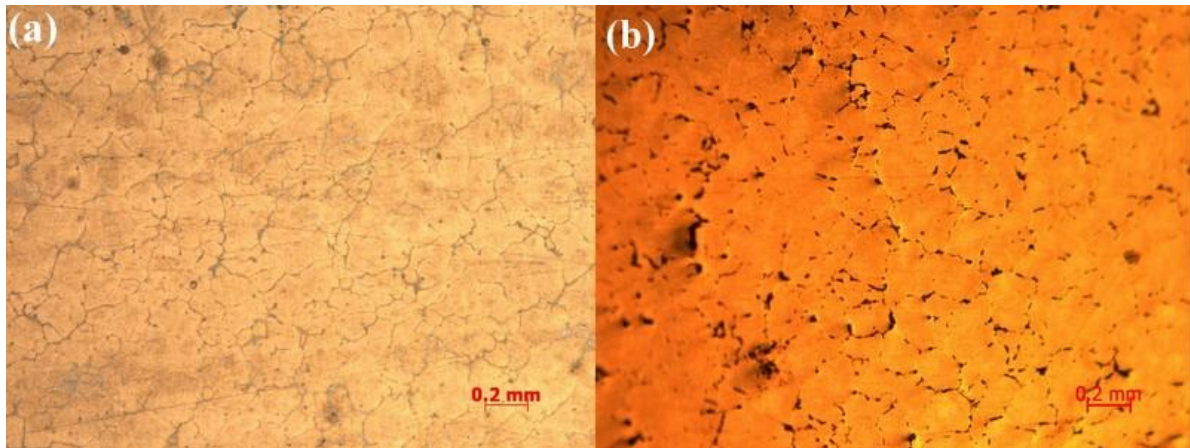


Figura 15: (a) amostra da liga Al-Si obtida por *squeeze casting* com pressão de 50 MPa, com aumento de 100x e ataque com hidróxido de sódio; (b) amostra solubilizada e envelhecida artificialmente, com aumento de 100x e ataque com reagente Keller.

As Figuras 16 a 17 apresentam as micrografias das amostras obtidas anteriormente por *squeeze casting* nas pressões 100 MPa e 150 MPa, respectivamente.

Fonte: Autor.

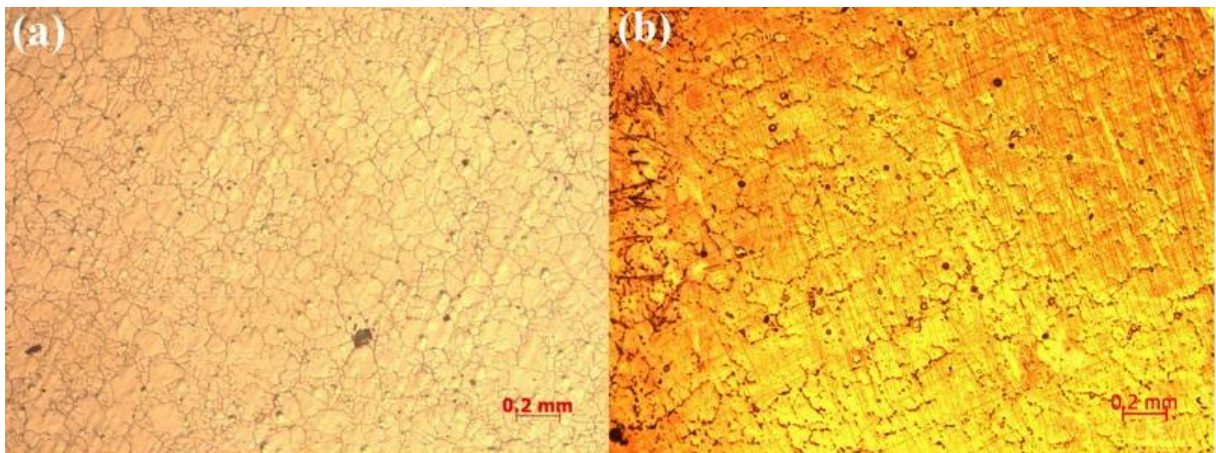


Figura 16: (a) amostra da liga Al-Si obtida por *squeeze casting* com pressão de 100 MPa, com aumento de 50x e ataque com hidróxido de sódio; (b) amostra solubilizada e envelhecida artificialmente, com aumento de 50x e ataque com reagente Keller.

Fonte: Autor.

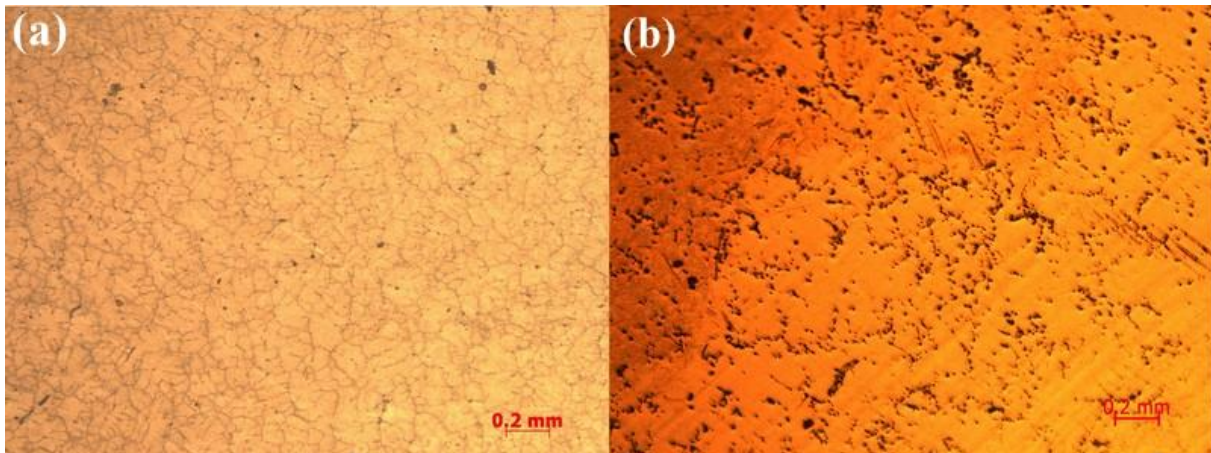


Figura 17: (a) amostra da liga Al-Si obtida por *squeeze casting* com pressão de 150 MPa, com aumento de 50x e ataque com hidróxido de sódio; (b) amostra solubilizada e envelhecida artificialmente, com aumento de 50x e ataque com reagente Keller.

Os contornos de grãos da amostra de 100 MPa (Figura 16) apresentam-se mesmo após o tratamento térmico, de forma nítida. A amostra que passou *squeeze casting* de 150 MPa (Figura 17) apresenta uma diminuição desses contornos e seus precipitados ficaram melhor distribuídos e com aparência fragmentada. E de acordo com o Moreira (2011) isso pode ter ocorrido devido às altas taxas de solidificação que foram submetidas que promoveram o aumento das ramificações que favorecem o processo de fragmentação (Moreira, 2011).

A microestrutura da liga é afetada com o tratamento térmico, isso pode ser percebido quando se compara micrografias de antes e após tratamento. Com a solubilização e o envelhecimento artificial, os contornos dendríticos não devem se apresentar mais tão bem definidos como antes da aplicação desses tratamentos. Assim como, as partículas de silício ficam melhores distribuídas na matriz, ou seja, uma microestrutura resultante mais refinada e homogênea.

5.2 DUREZA

O resultado final da dureza foi calculado com base na média das medidas obtidas no ensaio de dureza de cada amostra.

A Figura 17 mostra o gráfico com a média de dureza de cada amostra obtida pelo processo *squeeze casting*.

Fonte: Autor.

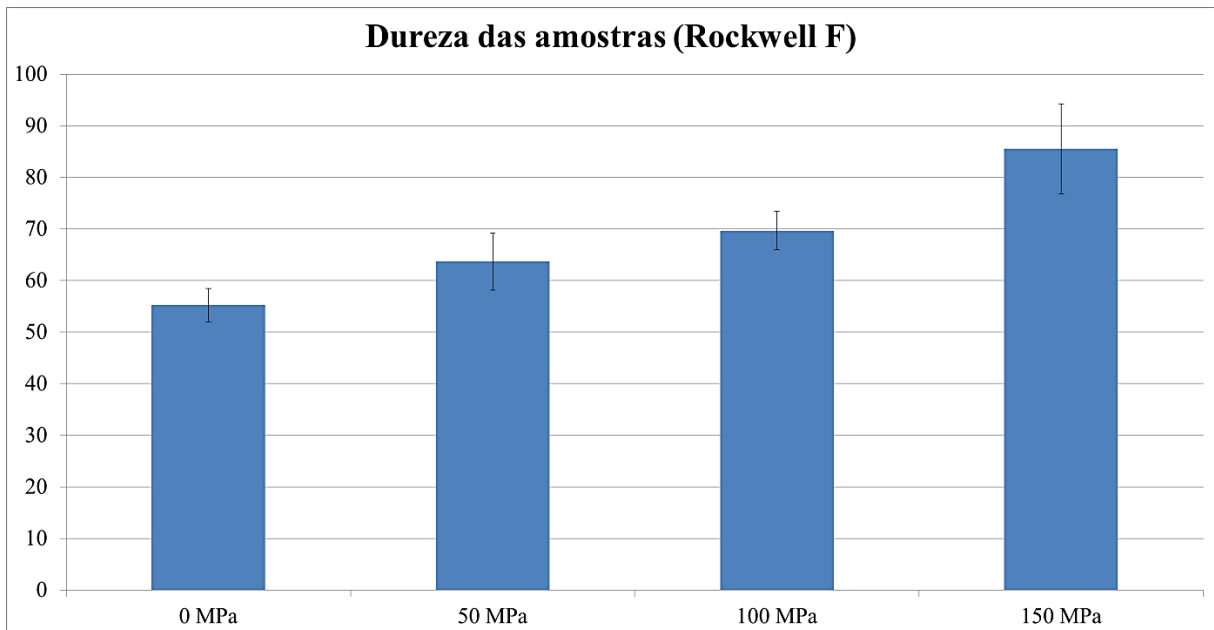


Figura 18: Gráfico - Dureza Rockwell F para as amostras da liga Al-Si após os o tratamento térmico.

A resistência mecânica pode ser relacionada com tamanho do grão, aonde são inversamente proporcionais, quanto menor o tamanho de grão maior é a resistência mecânica do material (Brito et al; 2008). E como a dureza e a resistência mecânica estão diretamente relacionadas, é possível dizer que quanto menor o tamanho de grão maior a dureza do material (Luz, 2018).

Com o tratamento térmico de solubilização, observa-se que a um incremento na dureza, devido à solubilização dos precipitados na matriz que promove o endurecimento da liga. Em vista disso, a amostra com maior dureza pode ser justificada devido a maior saturação da matriz com os elementos endurecedores da liga que precipitam durante o envelhecimento (Brito et al; 2008).

8. CONCLUSÃO

As amostras da liga Al-Si, apresentam suas microestruturas compostas por uma fase dendrítica de alumínio primário (α -Al) e pela fase de silício nas regiões interdendríticas . Com a aplicação de tratamento térmico alterou a microestrutura, especialmente na morfologia e distribuição de silício em decorrência do processo de solubilização.

Em vista disso, o tratamento térmico de solubilização, os contornos dendríticos ficam menos evidentes e a fase de silício mais refinada e melhor distribuída na microestrutura, obtendo-se uma homogeneização da microestrutura. As micrografias mostraram que a solubilização e envelhecimento artificial adotado não foi o suficiente para ocasionar a solubilização completa, e o envelhecimento artificial também não ocasionou o refinamento dos solutos nem a solubilização completa dos mesmos.

Os tratamentos térmicos promoveram a fragmentação do silício presente nas amostras, sendo mais acentuado na que sofreu maior pressão no processo de *squeeze casting*, favorecida pela microestrutura mais refinada de silício com menor tamanho.

A dureza é correlacionada com os tratamentos térmicos já que a mesma avaliar a resistência mecânica nas ligas. Esse fator foi evidenciado pelo aumento de dureza de 54,28% da amostra fundida sem aplicação de pressão para a amostra fundida com a aplicação de 150 MPa de pressão.

9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudo dos envelhecimentos utilizando diferentes temperaturas, onde pode ser possível melhoras nas propriedades mecânicas;
- Fazer uma análise mais aprofundada da microestrutura para detecção dos microconstituintes presentes na liga bruta de fundição e solubilizada e envelhecida artificialmente, bem como uma análise quantitativa.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abal. **Manual: fundamentos e aplicações do alumínio.** 2007.

Abal. **Aplicações do alumínio.** Disponível em: < <http://abal.org.br/aplicacoes/automotivo-e-transportes/>>, acessado em: 21/02/2018.

Alumicopper. **Informações técnicas do Alumínio 6061.** Disponível em: < http://www.alumicopper.com.br/pdf/aluminio/info-tec-alumi_aluminio_6061.pdf>, acessado em 07/03/2018.

Araújo, R. L. A. da S. **Influência da pressão na microestrutura e dureza da liga AlSi1Mg0.5Mn obtida pelo processo squeeze casting.** 48º Seminário de Aciaria, Fundição e Metalurgia de Não-Ferrosos – ABM WEEK – São Paulo, 2017.

Arpal, A. **Usos y propiedades del aluminio.** Disponível em: <<http://aluminio.org/?p=821>>, acessado em: 07/03/2018.

ASM Handbook, Edição Nove, volume 9. **Metallography and Microstructures.** ASM International, 1988.

Barbosa, C. **Metais não ferrosos e suas ligas.** E-papers Serviços Editoriais. Rio de Janeiro, 2014.

Brito, R; Queiroga, S; Macedo, J. **Caracterização microestrutural e microdureza de uma liga de al-si processada por fundição sob alta e baixa pressão.** Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – Manaus, 2008.

Cádiz, U. **Tabla periodica.** Disponível em: < <http://tablaperiodica.uca.es/Tabla/elementos/Aluminio/Grupo1/Prop.%20Al>> , acessado em 07/03/2018.

Callister, W. D. Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução.** 5a. Edição, LTC – Rio de Janeiro, 2002.

Civil, C. **Aluminio Empleado en la Construcción.** Disponível em: <<http://www.elconstructorcivil.com/2011/02/de-las-propiedades-del-aluminio.html>>, acessado em 07/03/2018.

Dorcic, J. L.; Verma, S. K. **Squeeze Casting**. IN.: American Society for Metals: ASM Handbook, vol. 15, “Casting”, 9a edition, pp. 323-327, 1988.

Elorz, J. A. P.. **Ciencia e ingeniería de materiales**. Cuarta Edición, 2000.

Garcia, A. **Solidificação: Fundamentos e Aplicações**. 1º ed., Editora da Unicamp, 399p. São Paulo, 2001.

Garcia, A.; Spim, J.; A., Santos, C. A. **Ensaio dos Materiais**. Editora LTC S.A. Rio de Janeiro, 2000.

Ghomashchi M. R.; Vikhrov A. **Squeeze Casting: an Overview**. **Journal of Materials Technology**, v.101, p. 1-9, 2000.

Haskel, T. **Efeito do Tratamento Térmico de Solubilização na Microestrutura e nas Propriedades Mecânicas da Liga A356**. Dissertação de Mestrado – PGCEM UDESC – Joinville, 2009.

Infomet. **Tratamentos térmicos de ligas de alumínio**. Disponível em: <<http://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=57>>, acessado em: 26/02/2018.

Jimenes, Y. B. H. **Propiedades mecánicas del aluminio** . Disponível em: <<https://pt.scribd.com/user/257346623/HugoYunuenBanuelosJimenes>>, acessado em 07/03/2018.

Jinshu. **Alumínio em embalagem de alimentos**. Disponível em: <<http://lodecjinshu.com/pt/aluminio-em-embalagem-alimentos/>>, acessado em 07/03/2018.

Kaufman, J.G; E.L. Rooy. **Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications**. 1ª ed. 2004.

Luz, K. Dureza. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/244664181/Dureza-docx>>, acessado em 07/03/2018.

Mhirdani, M. **Caracterização da liga de alumínio A356 solidificada rapidamente por centrifugação e fundida em areia**. Departamento de Engenharia de Materiais – UFSCar – Projeções, v. 23, p. 55-62 – Janeiro/Dezembro, 2005.

Moreira, S. P. **Efeito da Taxa de Resfriamento e dos Tratamentos Térmicos sobre as Propriedades Mecânicas da Liga Al-Si-Mg (A356.0) Fundida.** Rede Temática em Engenharia de Materiais – UEMG – Ouro Preto, 2011.

Nayak, S; Karthik A. **Synthesis of Al-Si alloys and study of their mechanical properties.** Department of metallurgical & materials engineering – National institute of technology – India, 2011.

Neto, J. **Estudo comparativo da microestrutura e microcureza da liga Al-5%Si0,3%Mg antes e após o tratamento térmico T6.** Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC' 2015 – 15 a 18 de setembro de 2015 – Fortaleza, Ceará.

Oliveira, G. R. G. **Tratamento térmico de uma liga Al-Si-Mg-Mn.** Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Porto, 2012 .

Palas, M. **Reconocimiento de fases en aleaciones de aluminio em estado modelado.** Tese para optar o título de engenheiro mecânico – Programa acadêmico de engenharia mecânica – Faculdade de Engenharia – Universidade de Piura – Peru, 2012.

Pedrini, H. **Efeito da temperatura de solubilização no envelhecimento da liga de alumínio 6061.** Universidade federal do espírito santo centro tecnológico departamento de engenharia mecânica projeto de graduação – Vitória, ES – Julho, 2006.

Pirone, L. **Tratamento térmico e caracterização de uma nova liga Al-Si para conformação no estado semi-sólido.** Instituto Federal do Espírito Santo – Campus Vitória – Espírito Santo, 2010.

Polastro, D. **Tratamentos térmicos em ligas de alumínio-silício (Al-Si).** Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo – Curso de Engenharia de Materiais – Universidade do Vale do Paraíba – São José dos Campos, 2011.

Rendón, F. M. **Estudo da adesividade entre uma liga de alumínio A319.0 e uma base de Al-Si-Cu-Mg para aplicações automotivas.** Direção Geral de Bibliotecas – Universidade Autónoma de Novo León – México, 2003.

Ricardez, A. **Aplicaciones Del Aluminio** Disponível em: <<https://pt.scribd.com/user/115025137/Angel-Ricardez>>, acessado em: 07/03/2018.

Sampaio, R. **Análise de resistência ao impacto da liga Al-Mg-Zn solidificada através do método de solidificação “squeeze casting”**. Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará – Marabá, 2015.

Segundo, E. **Análise dos efeitos dos tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento artificial sobre a microestrutura da liga de alumínio A356**. Revista Matéria – v. 20 n. 04. ISSN 1517-7076 – artigo 11663, pp. 936-945, 2015.

Sekban, D. M; Yanar, H; Purçek, G; Aktarer, S. M. **Effect of friction stir processing on tribological properties of Al-Si alloys**. Department of Automotive Technology – University Rize – Turkey, 2017.

Silva, J.C.P. **Avaliação do comportamento das ligas de alumínio 6005, 6063, 6351 submetidas a diferentes tratamentos térmicos**. Trabalho de conclusão de curso – Departamento de Engenharia Mecânica – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Goiânia, 2014.

Struers Ensuring Certainty. **Como embutir em frio**. <<https://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Mounting/Cold-mounting#>>, acesso em: 11 de Fevereiro de 2018.

Vilar, D. **Influência de parâmetros operacionais na microestrutura e propriedades mecânicas de ligas diluídas do sistema Al-Zn solidificadas através do processo squeeze casting**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal da Paraíba - Centro de Tecnologia Programa de pós graduação em Engenharia Mecânica – Joao Pessoa, 2015.

Xavier, C. L. **Alumínio**. EBC, USP, Ribeirão Preto – São Paulo, 2012.