



**Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará**  
**Instituto de Geociências e Engenharias**  
**Faculdade de Engenharia de Materiais**

Brenda Samira Guimarães de Souza

**Efeito do Tratamento Térmico de Envelhecimento Artificial sobre a Microestrutura e Dureza da Liga de Al-Cu**

Marabá  
2018

Brenda Samira Guimarães de Souza

**Efeito do Tratamento Térmico de Envelhecimento Artificial sobre a Microestrutura e Dureza da Liga de Al-Cu**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado para obtenção do grau de  
Bacharel em Engenharia de Materiais,  
Universidade Federal do Sul e Sudeste do  
Pará. Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Camila dos  
Santos Torres.

Marabá  
2018

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

---

Souza, Brenda Samira Guimarães de

Efeito do tratamento térmico de envelhecimento artificial sobre a microestrutura e dureza da liga de Al-Cu / Brenda Samira Guimarães de Souza; 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. Fundição. 4. Ligas de cobre. 5. 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

Brenda Samira Guimarães de Souza  
Trabalho de Conclusão de Curso  
Efeito do Tratamento Térmico de Envelhecimento Artificial sobre a  
Microestrutura e Dureza da Liga de Al-Cu

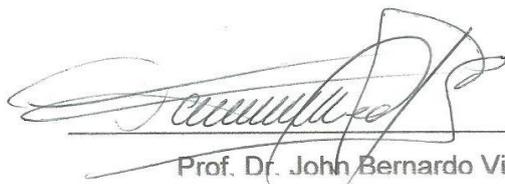
APROVAÇÃO

Após a exposição da discente Brenda Samira Guimarães de Souza, matrícula n.º 201340606022, sobre a realização do Trabalho de Conclusão de Curso, a Banca Examinadora, composta pelos membros abaixo, reuniu-se e aprovou o presente relatório que, por atender aos requisitos estabelecidos, recebeu o conceito Bom.

Marabá, 15/03/2019

Camilla Torres

Prof. Dra. Camila dos Santos Torres  
(FEMAT – IGE – UNIFESSPA – Orientadora)



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

Lygia (P. Policarpio) Ferreira

Prof. Dra. Lygia Maria Policarpio Ferreira  
(FEMAT – IGE – UNIFESSPA – Membro)

*Dedico este trabalho aos meus pais,  
Maria Conceição e Benivaldo  
Ferreira.*

*“A persistência é o caminho do  
êxito.”*

*Charles Chaplin.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado saúde e forças para enfrentar as dificuldades.

Aos meus amados pais, Maria Conceição Guimarães de Souza e Benivaldo Ferreira de Souza, por estarem sempre ao meu lado e por todo incentivo que me deram nas horas difíceis, de desânimo e cansaço, não há palavras suficientes para expressar minha gratidão, também a minha tia Izabel Guimarães por todo apoio e carinho e a todos os meus familiares.

A minha orientadora Camila dos Santos Torres por me direcionar nesse último período de minha graduação. Agradeço também Alan Cunha pela ajuda e os conselhos para realização desse trabalho.

A minhas amigas, Ana Carolina, Jéssica Lopes e Naiana Carvalho por todos os momentos alegres e tristes que passamos juntas, por toda ajuda no decorrer do curso, não teria me formado sem vocês. Agradeço principalmente a minha amiga Haritá da Silva, pois esteve ao meu lado em todos os momentos durante o curso, sua amizade significa muito para mim.

A todos da Engenharia de Materiais (colegas de turma, funcionários, professores, coordenadores) que direta ou indiretamente contribuíram para minha formação profissional.

## Resumo

O alumínio e suas ligas constituem um dos materiais metálicos mais versáteis, econômicos e atrativos para uma série de aplicações. As ligas de alumínio são geralmente divididas em duas categorias: ligas trabalhadas e ligas fundidas, destinadas à produção de componentes via fundição. As ligas Al-Si-Cu são as mais empregadas dentre as ligas de fundição. Este trabalho teve como objetivo analisar a influência dos tratamentos térmicos de solubilização em dois meios de resfriamentos diferentes, água e salmoura e envelhecimento artificial da liga Al-Cu. Para verificar a influência dos tratamentos térmicos foi feita a análise microestrutural e ensaio de dureza Rockwell F. A análise dos resultados permitiu verificar a influência do tratamento térmico sobre a microestrutura e a dureza da liga, onde foi observado aumento nos valores de dureza de acordo com os tratamentos térmicos, onde a amostra que apresentou maiores valores de dureza foi a solubilizada resfriada em salmoura e envelhecida.

Palavras-chave: *Alumínio; Cobre; Solubilização; Envelhecimento Artificial.*

## **Abstract**

Aluminum and its alloys are one of the most versatile, economical and attractive metal materials for a range of applications. Aluminum alloys are generally divided into two categories: worked alloys and cast alloys, intended for the production of components via casting. The Al-Si-Cu alloys are the most used among the cast alloys. This work aimed to analyze the influence of the thermal treatments of solutioning in two different cooling media, water and brine and artificial aging of the Al-Cu alloy. In order to verify the influence of the thermal treatments, a microstructural analysis and a Rockwell F hardness test were carried out. The analysis of the results allowed to verify the influence of the thermal treatment on the microstructure and the hardness of the alloy, where an increase in the hardness values was observed according to the heat treatments, where the sample with the highest values of hardness was solubilized in brine and aged.

Keywords: *Aluminum; Copper; Solutioning; Artificial Aging.*

## Lista de Figuras

<b>Figura 1:</b> Diagrama de equilíbrio de fases do sistema Al-Si. ....	28
<b>Figura 2:</b> Diagrama de equilíbrio de fases do sistema Al-Cu.....	29
<b>Figura 3:</b> Micrografia obtida da liga de alumínio bruta de solidificação.....	30
<b>Figura 4:</b> Microestrutura de uma liga Al-3,8%Cu. ....	31
<b>Figura 5:</b> MEV da liga Al-4%Cu. ....	31
<b>Figura 6:</b> Diagrama de uma liga que pode ser solubilizada. ....	34
<b>Figura 7:</b> Diagrama de uma liga que pode ser solubizada.....	37
<b>Figura 8:</b> Amostras após tratamentos térmicos, a) amostra solubizada em água; b) e c) amostras solubilizadas (resfriada em água e salmoura, respectivamente), e envelhecidas; d) amostra sem tratamento térmico. ....	42
<b>Figura 9:</b> Amostras após mapeamento de dureza. ....	43
<b>Figura 10:</b> Durômetro Pantec.....	43
<b>Figura 11:</b> Peças embutidas, a) e c) amostras solubilizadas (resfriadas em água e salmoura respectivamente) e envelhecidas; b) amostra sem tratamento térmico; d) amostra apenas solubilizada. ....	44
<b>Figura 12:</b> Etapa de lixamento. ....	45
<b>Figura 13:</b> Peça durante processo de polimento. ....	45
<b>Figura 14:</b> Amostra bruta de solidificação. Aumento 100x. Ataque Keller. ....	47
<b>Figura 15:</b> a) amostra solubilizada resfriada em água e b) amostra solubilizada resfriada em água e envelhecida. Aumento 100x. Ataque Keller. ....	48
<b>Figura 16:</b> a) amostra solubilizada resfriada em água e envelhecida e b) amostra solubilizada resfriada em salmoura e envelhecida Aumento 100x. Ataque Keller. ....	48
<b>Figura 18:</b> Gráfico de dureza Rockwell F para as amostras estudadas.....	50

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1:</b> Valores de composição das ligas de alumínio para conformação.....	19
<b>Tabela 2:</b> Valores de composição das series de alumínio para fundição.....	25
<b>Tabela 3:</b> Temperaturas de solubilização e envelhecimento artificial para algumas ligas da série 2XX.X e 3XX.X.....	38
<b>Tabela 4:</b> Resultados do estudo para diferentes valores de teor de cobre. ....	39
<b>Tabela 5:</b> Composição química da liga de alumínio.....	41
<b>Tabela 6:</b> Composição química do cobre.....	41

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>2. OBJETIVOS GERAIS</b> .....	<b>15</b>
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>16</b>
3.1 ALUMÍNIO .....	16
3.2 LIGAS DE ALUMÍNIO .....	18
3.2.1 Ligas para conformação .....	19
3.2.2 Ligas para fundição .....	24
3.3 SÍLÍCIO COMO ELEMENTO DE LIGA NO ALUMÍNIO .....	27
3.4 ADIÇÃO DE COBRE NO ALUMÍNIO .....	28
3.5 LIGAS AL-SI-CU .....	32
3.6. TRATAMENTOS TÉRMICOS .....	32
3.6.1 Solubilização das ligas Al-Cu .....	32
3.6.2. Envelhecimento das ligas Al-Cu .....	35
3.7. FUNDIÇÃO .....	39
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>41</b>
4.1. FUSÃO E SOLIDIFICAÇÃO .....	41
4.2. TRATAMENTO DE SOLUBILIZAÇÃO .....	42
4.3. ENVELHECIMENTO ARTIFICIAL .....	42
4.4. ENSAIO DE DUREZA .....	42
4.5. ANÁLISE METALOGRAFICA .....	44
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>47</b>
5.1. ANÁLISE MICROESTRUTURAL .....	47
5.2. DUREZA ROCKWELL .....	49
<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	<b>51</b>
<b>7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>52</b>
<b>8. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>53</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O aumento no consumo de alumínio é prova do que este metal significa na indústria moderna. O alumínio segue o ferro entre os metais de maior consumo anual (DNPM, 2008). A variedade de uso do alumínio está relacionada com suas características físico-químicas, com destaque para sua baixa densidade, resistência à corrosão e alta condutividade elétrica/térmica, que lhe conferem uma multiplicidade de aplicações, especialmente nas soluções de engenharia aeronáutica (ABAL, 2017). O alumínio é um material leve, durável e resistente e mostra uma excelente performance e propriedades superiores na maioria das aplicações (ABAL, 2017).

A fundição é um dos principais processos industriais utilizados na produção de peças de metal. A fundição em alumínio pode ser feita por gravidade, com uso de areia ou molde metálico, e sob pressão, (alta ou baixa). Além desses há também processos especiais, como cera perdida e tixofundição. As peças fundidas de alumínio têm suas principais aplicações na área automotiva e de transportes (ABAL, 2017).

Para melhorar algumas propriedades do alumínio, pode ser empregado a utilização de tratamentos térmicos. Os tratamentos térmicos visam modificar as propriedades dos materiais adequando-os aos meios nos quais serão utilizados. Ao submeter um material a um tratamento térmico podem ocorrer mudanças como variação de microconstituintes presentes, mudança na concentração e redistribuição dos defeitos cristalinos como também alterações das fases presentes dentre outras (BAIA *et al.*; 2013).

Outra forma de melhorar as propriedades do material é adicionando a ele um ou mais elementos químicos. O silício, como principal elemento de liga do alumínio, aumenta a fluidez do alumínio líquido, propicia a redução da contração durante o resfriamento, reduz a porosidade nas peças fundidas e o coeficiente de expansão térmica e melhora a soldabilidade (ROSSI, 1996). O cobre quando adicionado a ligas de Al-Si, tem a vantagem de aumentar a resistência mecânica da liga, tanto antes como após tratamento térmico. Sendo assim, o cobre torna a liga tratável termicamente, ou seja, passível de endurecimento mediante tratamento térmico de envelhecimento (BERETA, 2007).

O seguinte trabalho tem por objetivo a aplicação dos tratamentos térmicos

de solubilização em dois meios de resfriamento, água e salmoura, e envelhecimento artificial a uma liga de Al-2%Cu e analisar seus efeitos sobre a microestrutura e a dureza do material.

## **2. OBJETIVOS GERAIS**

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o efeito do tratamento térmico de solubilização em dois meios de resfriamentos, água e salmoura, e envelhecimento artificial na mudança das propriedades físico-químicas da liga de Al-Cu obtida por processo de fundição.

### **2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Análise dos efeitos dos tratamentos térmicos de solubilização em dois meios de resfriamento, água e salmoura, e envelhecimento artificial nas propriedades físico-químicas das amostras obtidas;
- Comparação entre as amostras com tratamento e sem tratamento.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 ALUMÍNIO

O alumínio é considerado o terceiro elemento químico mais abundante na crosta terrestre e o mais abundante entre os elementos metálicos, porém ele não é encontrado na forma metálica que conhecemos, mas sim em diversos minerais e argilas (MACEDO *et al.*; 2016). Quando puro, o alumínio possui a forma de um metal prateado, leve e que reage a com água formando um filme de óxido e em pó reage com o oxigênio quando aquecido liberando luz e calor (QUIMLAB, 2018).

A obtenção do alumínio é feita a partir da bauxita, um minério de onde é retirada a alumina que, por meio do processo de redução, é transformada em alumínio (MOURA *et al.*; 2008).

Possui um aspecto cinza prateado e fosco, forma película passiva o que aumenta sua resistência a corrosão. O alumínio não é tóxico como metal, não-magnético, e não cria faíscas quando exposto ao atrito (QUIMLAB, 2018).

Possui ponto de fusão de 660°C, o que é relativamente baixo comparado ao do aço, que é da ordem de 1570°C. A leveza é uma das principais características do alumínio. Seu peso específico é de cerca de 2,70 g/cm<sup>3</sup>, aproximadamente 35% do peso do aço e 30% do peso do cobre. O alumínio puro possui condutividade elétrica de 62% da IACS (International Annealed Copper Standard), a qual associada à sua baixa densidade significa que um condutor de alumínio pode conduzir tanta corrente quanto um condutor de cobre que é duas vezes mais pesado e proporcionalmente mais caro (ABAL, 2017), mas apesar disso, não há a substituição porque o cobre apresenta maior resistência aos fatores externos como oxidação e corrosão galvânica reduzindo o risco de superaquecimento das fiações (IMPACTA, 2018).

Alumínio possui condutibilidade térmica 4,5 vezes maior que a do aço, uma refletividade acima de 80%, a qual permite ampla utilização em luminárias (ABAL, 2017).

Por não ser magnético, o alumínio é frequentemente utilizado como proteção em equipamentos eletrônicos. Além disso, o metal não produz faíscas, o que é uma

característica muito importante para garantir sua utilização na estocagem de substâncias inflamáveis ou explosivas, bem como em caminhões-tanque de transporte de combustíveis. Possui boa ductilidade (estrutura CFC) e é impermeável à ação da umidade e do oxigênio, tornando a folha de alumínio um dos materiais mais versáteis no mercado de embalagens (ABAL, 2017).

Quanto às propriedades mecânicas, apresentam os seguintes valores:

- Limite de resistência a tração: para o alumínio puro recozido, essa razão é de aproximadamente 48 MPa (4,9 kg/mm<sup>2</sup>). O valor aumenta em função da liga, do trabalho a frio e do tratamento térmico (quando possível);
- Limite de escoamento: O limite do alumínio puro é de aproximadamente 12,7 Mpa (1,3 kg/mm<sup>2</sup>);
- Modulo de elasticidade: 7030 kg/mm<sup>2</sup>. A adição de outros materiais nas ligas não altera esse valor consideravelmente, que pode chegar a até 7500 kg/mm<sup>2</sup>. Portanto, o índice do alumínio representa um terço do módulo de elasticidade do aço. Essa propriedade dá ao alumínio a vantagem de dar às estruturas de alumínio uma elevada capacidade de amortecer golpes e reduzir as tensões produzidas pela variação da temperatura;
- Temperaturas baixas: Quando exposto a temperaturas abaixo de zero, o alumínio não se torna frágil. Sua resistência aumenta sem perder a ductilidade (ABAL, 2017).

Todas essas características apresentadas conferem ao alumínio uma extrema versatilidade. Na maioria das aplicações, duas ou mais destas características entram em jogo, por exemplo: baixo peso combinado com resistência mecânica; alta resistência à corrosão e elevada condutibilidade térmica (ABAL, 2017).

Para citar o seu valor econômico, ele é o metal não ferroso mais usado pelo homem. Consideremos os diversos produtos que são constituídos do alumínio ou das suas ligas metálicas (AlunosOnline, 2018):

- Meios de Transporte: Como elementos estruturais em aviões, barcos, automóveis, tanques, blindagens e outros;
- Embalagens: Papel de alumínio, latas e outras;
- Construção civil: Janelas, portas, divisórias, grades e outros;
- Bens de uso: Utensílios de cozinha, ferramentas e outros;
- Como recipientes criogênicos até  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  e, no sentido oposto, para a fabricação de caldeiras.

### 3.2 LIGAS DE ALUMÍNIO

Apesar de suas boas propriedades, o alumínio puro apresenta algumas desvantagens como, baixa resistência a esforços mecânicos, baixos níveis de dureza e a principal limitação do alumínio está em algo que para algumas aplicações é um ponto forte que é a sua baixa temperatura de fusão de  $660^{\circ}\text{C}$ , o que restringe a temperatura máxima em que o alumínio pode ser utilizado (CALLISTER, 2002). Por isso, para peças que estão sujeitas a esforços elevados, a resistência do alumínio puro não é suficiente. Existem várias maneiras para melhorar as propriedades de um metal, como por exemplo por meio de processos mecânicos, como laminação ou prensagem, pode-se torná-lo mais resistente. Também é possível obter esse tipo de resultado com um processo de tratamento térmico. (Wiki, 2018).

Para melhorar ou modificar as propriedades do alumínio, pode-se adicionar a ele um ou mais de um elemento químico. As ligas são formadas principalmente com a adição de cobre (Cu), magnésio (Mg), manganês (Mn), silício (Si) ou zinco (Zn) ao alumínio (Al). A escolha dos elementos e sua proporção nessa adição dependem das propriedades finais que se quer obter. Para organizar e facilitar a seleção das ligas de alumínio, a ABNT e outras associações de normas técnicas classificaram essas ligas de acordo com o processo de fabricação e a composição química (Wiki, 2018).

Elas foram divididas em ligas para conformação (ou dúcteis) e ligas para fundição. Somando as ligas conformadas e as fundidas, existem mais de 600 ligas reconhecidas industrialmente. Essa divisão foi criada porque as diferentes ligas têm que ter características diferentes para os diferentes processos de fabricação

(GONÇAVES, 2012). Tanto as ligas para conformação quanto as ligas para fundição seguem um sistema de designação de acordo com a norma da ABNT NBR 6834, conforme o principal elemento de liga presente em sua composição.

### 3.2.1 Ligas para conformação

As ligas para conformação devem ser obrigatoriamente bastante dúcteis para serem trabalhadas a frio ou a quente pelos processos de conformação mecânica, que são a laminação, a trefilação, o forjamento e a extrusão. Após passarem por esses processos, as ligas são comercializadas sob a forma de laminados planos (chapas e folhas), barras, arames, perfis e tubos extrudados e peças forjadas. O sistema de classificação das ligas de conformação é descrito na Tabela 1.

**Tabela 1:** Valores de composição das ligas de alumínio para conformação.

<b>Alumínio e suas ligas para conformação</b>	
<b>Designação da série</b>	<b>Indicação da composição</b>
1XXX	99,0% mínimo de alumínio
2XXX	Cobre – Cu
3XXX	Manganês – Mn
4XXX	Silício – Si
5XXX	Magnésio – Mg
6XXX	Magnésio/Silício (Mg/Si)
7XXX	Zinco – Zn
8XXX	Outros elementos

**Fonte:** Adaptada da Norma ABNT NBR 6834

O significado dos 4 dígitos difere-se entre a série 1xxx e demais séries. Na série 1xxx, o segundo algarismo, se igual a zero, indica que as impurezas presentes são as naturais do processo de fabricação. Se diferente de zero, indica que há controle especial na concentração de determinada impureza. O terceiro e quarto dígitos indicam o percentual de alumínio, além dos 99% existentes. Por exemplo, no caso de

um alumínio 1045, o percentual de alumínio presente será 99,45%, sendo o restante, impurezas naturais do processo (ABNT, 2006).

Para as séries de 2xxx a 9xxx, o primeiro dos dígitos indica a série a qual a liga pertence e, por conseguinte o principal elemento de adição. O segundo dígito irá indicar se a composição da liga é igual à liga desenvolvida originalmente (se igual à zero) ou se a liga original sofreu alteração na sua composição química (algarismos de 1 a 9). O terceiro e quarto dígitos apenas diferenciam as ligas dentro de uma mesma série (ALMEIDA, 2013).

Dentre estas séries, é ainda possível fazer-se uma subdivisão quanto ao mecanismo de endurecimento aos quais as ligas respondem e que promovem o aumento da dureza e da resistência mecânica. As ligas das séries 2xxx, 6xxx e 7xxx são classificadas como tratáveis termicamente, enquanto as ligas das séries 3xxx, 4xxx e 5xxx são denominadas de endurecíveis por deformação (ALMEIDA, 2013).

A seguir descreve-se as características gerais de cada uma das séries de ligas de alumínio, bem como suas mais frequentes áreas de aplicação.

Série 1xxx: Com teor de pureza igual ou superior à 99%, encontra aplicação principalmente nas áreas elétricas e química. Possui excelente resistência à corrosão, elevadas condutividades térmica e elétrica, elevada ductilidade e baixa resistência mecânica. Respondem moderadamente aos processos de endurecimento por deformação devido ao alto teor de pureza (ALMEIDA, 2013).

Série 2xxx: Tendo o cobre como principal elemento de liga, as propriedades mecânicas desta série podem ser superiores às de alguns aços com baixo teor de carbono. São largamente utilizadas em aplicações estruturais. Possui boa usinabilidade, baixa soldabilidade e baixa resistência a corrosão. Normalmente as características à corrosão são melhoradas por meio de recobrimento com alumínio de alta pureza ou por ligas da série 6xxx (ALMEIDA, 2013).

Série 3xxx: As ligas desta série são de moderada resistência mecânica, encontrando aplicações nos mais diversos segmentos, desde utensílios domésticos, até latas de bebidas. O principal elemento de liga é o manganês, embora apresente solubilidade máxima de apenas 1,5%. A máxima resistência mecânica é obtida por

meio de trabalho mecânico (ALMEIDA, 2013).

Série 4xxx: O principal elemento de liga desta série é o silício, em teores de até 12%. Sua função é baixar a temperatura de fusão destas ligas sem que ocorra fragilização. Por fundir-se em temperaturas mais baixas que as demais séries, estas ligas são utilizadas principalmente como arames de solda (ALMEIDA, 2013).

Série 5xxx: O magnésio, principal elemento de liga desta série, em combinação com o manganês resulta em ligas de média/alta resistência mecânica. De boa soldabilidade e com destacada resistência à corrosão (principalmente em atmosfera salina), esta série encontra aplicação em diferentes setores. (ALMEIDA, 2013).

Série 6xxx: Nesta série magnésio e silício são adicionados em proporções suficientes para formação de silicato de magnésio ( $Mg_2Si$ ). As ligas desta série possuem elevadas resistências à corrosão, boa conformabilidade boa soldabilidade e são de fácil usinagem. São utilizadas em quadros de bicicletas e também estruturas soldadas (ALMEIDA, 2013).

Série 7xxx: Em teores de 1 a 8%, o zinco é o principal elemento de liga, embora magnésio, cobre, cromo e zircônio também podem estar presentes em menores quantidades. O zinco combinado ao magnésio confere às ligas desta série altíssima resistência mecânica, o que as torna muito utilizadas em aplicações estruturais, principalmente pela indústria aeronáutica (ALMEIDA, 2013).

Esta denominação também pode vir acompanhada do estado de endurecimento da liga quando realizado tratamentos térmicos. O sistema de nomenclatura de tratamentos térmicos se baseia em letras, e as subdivisões destas são indicadas por um ou mais números, que especificam as operações básicas que o material deve sofrer (ABDOU, 2002). As designações básicas são:

- F (como fabricadas) – aplica-se a produtos laminados à frio, à quente ou sobre os quais não se exerce nenhum controle sobre suas condições de processo. Não há garantia de propriedades mecânicas.
- O (recozido) – aplica-se aos produtos que são recozidos para que sejam obtidos a máxima ductilidade e conformabilidade do material.

- W (solubilizado) – Têmpera instável aplicada somente em ligas que envelhecem naturalmente após a solubilização. Esta designação é específica somente quando o período do envelhecimento natural está indicado. Por exemplo: W 1/2h.
- H (encruado) - Aplica-se às ligas não tratáveis termicamente, em que o aumento de resistência é obtido por deformação mecânica. Será sempre seguido por um ou mais dígitos.
- T (tratados termicamente) – aplicável as ligas tratáveis termicamente, gerando propriedades mecânicas estáveis diferentes de “F” ou “O”, podendo ou não ter encruamento adicional. Será sempre seguido de um ou mais dígitos (ABDOU, 20012).

Vale citar que todas as têmperas são aplicáveis às ligas fundidas, exceto a têmpera H, já que esta precisa de trabalho mecânico (encruamento) para ser realizada.

O “T” é sempre seguido de um ou mais dígitos. Um período de envelhecimento natural pode ocorrer entre ou após as operações listadas e o controle desse período é exercido quando é metalurgicamente importante. Números de 1 a 10 indicam sequências específicas de tratamentos (ABDOU, 2002):

- T1: Resfriado de um processo de conformação a temperatura elevada e envelhecimento naturalmente a uma condição estável. Aplica-se a produtos que não foram trabalhados a frio depois de um resfriamento de uma elevada temperatura do processo de conformação.
- T2: Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada, encruado e envelhecido naturalmente a uma condição estável. Aplica-se aos produtos trabalhados à frio a fim de aumentar a dureza depois de um resfriamento à uma elevada temperatura do processo de conformação.
- T3: Solubilizado, encruado e envelhecido naturalmente a uma

condição estável. Aplica-se à produtos trabalhados à frio a fim de fornecer maior dureza ao material após tratamento térmico de solubilização.

- T4: Solubilizado e envelhecido naturalmente a uma condição estável. Aplica-se à produtos que não foram trabalhados à frio depois de tratamento térmico de solubilização.
- T5: Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada e envelhecido artificialmente. Aplica-se a produtos que não foram trabalhados à frio depois de um resfriamento de uma elevada temperatura do processo de conformação, fundição ou extrusão e para aqueles que tiveram suas propriedades mecânicas substancialmente mudadas por precipitação em tratamento térmico.
- T6: Solubilizado e envelhecido artificialmente. Aplica-se à produtos que não foram trabalhados à frio após tratamento térmico de solubilização.
- T7: Solubilizado e estabilizado (superenvelhecido). Aplica-se a produtos que são estabilizados após tratamento térmico de solubilização a fim de levá-los além do ponto de máxima dureza a fim de promover o controle de algumas características especiais.
- T8: Solubilizado, encruado e envelhecido artificialmente. Aplica-se à produtos trabalhados à frio a fim de fornecer maior dureza.
- T9: Solubilizado, envelhecido artificialmente e encruado. Aplica-se à produtos trabalhados à frio a fim de fornecer maior dureza especialmente após de haverem sido precipitados por tratamento térmico.
- T10: Resfriado de um processo de conformação em temperatura elevada, envelhecido artificialmente e encruado. Aplica-se à produtos trabalhados à frio a fim de fornecer maior dureza após um resfriamento de um processo de trabalho à quente

### 3.2.2 Ligas para fundição

As ligas para fundição devem ter resistência mecânica, fluidez e estabilidade dimensional e térmica para suportar os diferentes processos de fundição em areia, em molde permanente por gravidade ou sob pressão. Diferentemente dos materiais trabalháveis, que estão sujeitos a uma variação dos processos de aquecimento e de resfriamento, as ligas de fundição adquirem suas propriedades na condição de fundida (em alguns casos, com tratamentos térmicos posteriores), e conseqüentemente, um grupo diferente de ligas tem sido formulado para a produção de peças fundidas (REIS, 2009).

As ligas fundidas empregadas nas aplicações gerais de engenharia frequentemente contêm silício para melhorar suas características de fundibilidade, tais como fluidez (no vazamento e preenchimento do molde) e resistência a trincas de contração (quando o metal quente solidifica e contrai). O cobre também é frequentemente utilizado como um elemento de liga para proporcionar às propriedades mecânicas uma maior dureza e resistências exigidas em serviço. As ligas alumínio-magnésio apresentam maiores problemas na fundição, mas possuem boa resistência e ductilidade. Elas são amplamente utilizadas, particularmente em ambientes agressivos, como, por exemplo, em peças e acessórios da indústria naval. Uma pequena proporção de magnésio também está presente em algumas ligas em conjunto com silício para tornar a liga mais suscetível a tratamentos térmicos (REIS, 2009).

Quando o alumínio se resfria e se solidifica, alguns dos constituintes da liga podem ser retidos em solução sólida. O metal quente pode manter mais elementos de liga em solução sólida do que quando frio. Conseqüentemente, quando resfriado, 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:  $\text{Al}_2\text{Cu}$  ou  $\text{Mg}_2\text{Si}$  (CALLISTER, 2002).

Para as ligas de fundição, o sistema de designação é visto na Tabela 2.

**Tabela 2:** Valores de composição das series de alumínio para fundição.

<b>Alumínio e suas ligas para fundição</b>	
<b>Designação da série</b>	<b>Indicação da composição</b>
1XX.X	99,0%, mínimo de alumínio
2XX.X	Cobre
3XX.X	Silício e cobre e/ou magnésio
4XX.X	Silício
5XX.X	Magnésio
6XX.X	Série não utilizada
7XX.X	Zinco
8XX.X	Estanho
9XX.X	Outros elementos

**Fonte:** Adaptada da Norma ABNT NBR 6834

Na coluna designação da série, as ligas de alumínio para fundição são indicadas por três dígitos, um ponto e um dígito (Wiki, 2018). Da mesma forma como nas ligas para conformação, cada dígito tem um significado:

- O primeiro dígito classifica a liga segundo o elemento principal da liga;
- O segundo e o terceiro dígitos indicam centésimos da porcentagem mínima de alumínio (para o alumínio puro) ou diferentes ligas do grupo;
- O dígito após o ponto indica a forma do produto: 0 para peças fundidas e 1 para lingotes.

As ligas de alumínio para fundição são as mais versáteis de todas as ligas empregadas em fundição (Wiki, 2018). Suas principais características são:

- Baixa viscosidade, o que facilita o preenchimento de seções finas;
- Baixa temperatura de fusão, possibilitando o emprego de moldes metálicos;
- Elevado coeficiente de transferência de calor, possibilitando a realização de ciclos de fundição curtos;

- A maior parte das ligas de alumínio não apresenta tendências ao fenômeno de trinca a quente;
- São ligas que não apresentam interações ou reações do tipo metal/molde e conseqüentemente, apresentam bom acabamento superficial após a fundição.

De uma forma genérica podemos destacar as principais características de cada uma das famílias das ligas de alumínio fundidas, a saber (Wiki, 2018):

- Ligas Al-Cu (série 200) caracterizam-se pela elevada resistência mecânica e boa usinabilidade, apresentando, de uma maneira geral, baixa resistência à corrosão atmosférica e grande tendência à formação de microporosidades. Suas aplicações típicas são: peças estruturais, carcaças e pistões para motores diesel.
- Ligas Al-Si (série 300) são as ligas de alumínio que apresentam as melhores características de fundição, motivo pelo qual cerca de 90% das peças fundidas em alumínio pertencerem à série 300. As ligas binárias apresentam elevada resistência à corrosão, boa soldabilidade, mas são de usinagem difícil. Adições de Cu às ligas Al-Si melhoram a usinabilidade e aumentam a resistência mecânica (com redução da ductilidade). Adições de Mg tornam as ligas endurecíveis por meio de tratamentos térmicos, elevando sua resistência mecânica com a precipitação de fase endurecedora de silicato de magnésio ( $Mg_2Si$ ). As ligas com menores teores de Si (5 a 7% Si) são normalmente empregadas para a fundição em moldes de areia, enquanto que ligas de maior teor (9 a 13% Si) são normalmente utilizadas em moldes permanentes ou sob pressão. As ligas hipereutéticas destacam-se por sua elevada resistência ao desgaste, baixo coeficiente de dilatação térmica e elevada condutividade térmica. As principais aplicações envolvem peças de uso geral, coletores de admissão e componentes de suspensão.
- Ligas Al-Mg (série 500) caracterizam-se pela elevada resistência à corrosão e excelente usinabilidade, apresentando, por outro lado,

moderada tendência a defeitos de fundição e tendência a oxidação. Após tratamento térmico desenvolvem resistência mecânica elevada. Suas aplicações típicas envolvem: peças estruturais para a indústria química, de alimentos e naval.

- Ligas Al-Zn (série 700) são muito similares às ligas Al-Mg, principalmente quando apresentam Mg em sua composição química. Suas características de fundição são consideradas moderadas, devido a sua tendência a oxidação.
- Ligas Al-Sn (série 800) apresentam boa usinabilidade e boas propriedades aplicações típicas envolvem mancais, buchas e bronzinas.

### 3.3 SÍLCIO COMO ELEMENTO DE LIGA NO ALUMÍNIO

Utilizado em até 13%, é o elemento de liga mais empregado entre todas as composições de ligas de alumínio utilizadas em processos de fundição. Adições de silício melhoram a fluidez do alumínio líquido permitindo que ele flua através de paredes finas na cavidade do molde reproduzindo detalhes mais delicados e na resistência a trincas de contração durante o resfriamento. Como a densidade do silício é de apenas 2,3 g/cm<sup>3</sup>, ele é um dos poucos elementos que podem ser adicionados ao alumínio, sem provocar grandes variações na densidade da liga. Provoca a redução da porosidade nas peças fundidas, permitindo assim a obtenção de produtos com formatos mais complexos e do coeficiente de expansão térmica (FERRARINI, 2005).

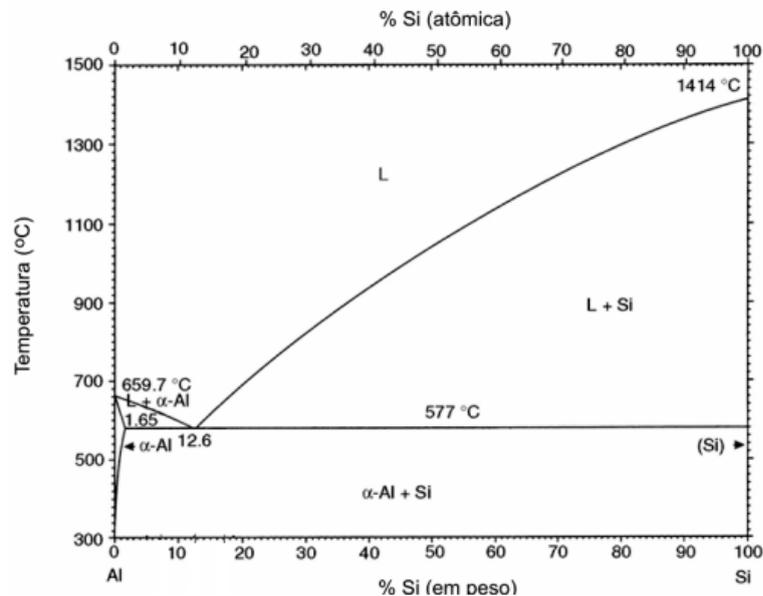
A razão para a ampla utilização desta série deve-se à atrativa combinação entre propriedades mecânicas e a excelente fundibilidade, baixo coeficiente de expansão térmica e alta resistência ao desgaste ligado com os outros elementos tais como o cobre, magnésio e níquel (HAMN, *et al.*; 1996).

As propriedades das ligas alumínio-silício são fortemente dependentes do processo de fundição empregado, das adições de elementos de liga para modificação do eutético, da estrutura granulométrica, da morfologia do silício primário e do tratamento do metal líquido. Sabe-se que para a maioria das condições de

solidificação, a morfologia dendrítica é a característica dominante da microestrutura. Microestruturas dendríticas finas em fundidos, caracterizadas pelos espaçamentos dendríticos, são reconhecidas pelas propriedades mecânicas superiores, particularmente quando se considera a resistência à tração e ductilidade. O silício também tem a vantagem de não reduzir a boa resistência à corrosão apresentada pelo alumínio, aumentando inclusive a resistência à corrosão em ambientes mediamente ácidos (BRITO, *et al.*; 2015).

Este sistema binário, cujo diagrama de fases pode ser visto na Figura 1, apresenta um eutético simples que ocorre a 577°C em uma composição correspondente a 12,61 % de silício. Nesta temperatura eutética, o alumínio e o silício formam soluções sólidas com 1,65% de silício e 0,5% de alumínio, respectivamente (GARCIA, 2016).

**Figura 1:** Diagrama de equilíbrio de fases do sistema Al-Si.



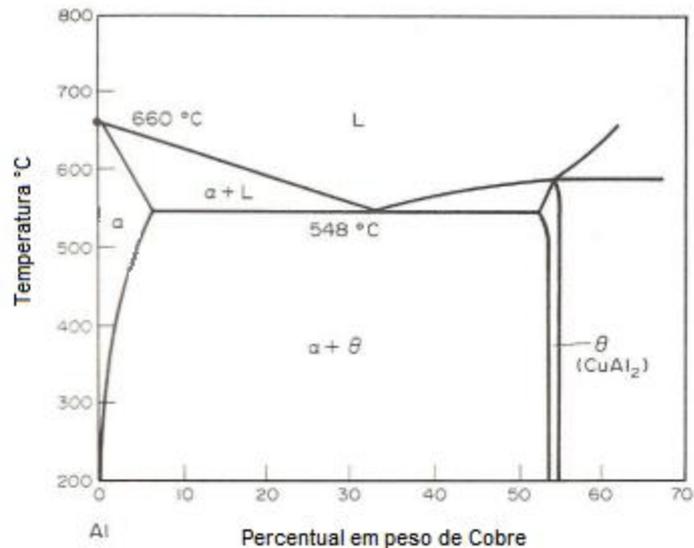
**Fonte:** GARCIA, 2016.

### 3.4. ADIÇÃO DE COBRE NO ALUMÍNIO

O cobre aumenta a dureza das ligas, porém, diminui o alongamento e prejudica a fluidez do material. Aumenta a resistência da liga com ou sem tratamento térmico. É bastante solúvel no alumínio em altas temperaturas (5,65% a 548°C, solubilidade máxima do cobre no alumínio) como pode ser visto no diagrama de fase Al-Cu na Figura 2, e apenas ligeiramente solúvel em temperatura ambiente (0,5%).

Essa característica torna essas ligas termicamente tratáveis e permite melhoramento nas propriedades mecânicas (MONTEIRO, 2011).

**Figura 2:** Diagrama de equilíbrio de fases do sistema Al-Cu.



**Fonte:** DEMEC, 2018.

De acordo com Rossi (2004) ao produzir uma liga de alumínio com cobre e submetê-la a processos especiais de tratamento térmico, esse material terá como característica resistência à tração igual ou até maior do que de alguns aços de baixo teor de carbono. Ela ainda apresenta ótima usinabilidade proveniente da alta relação entre resistência (maior) e o peso (menor). Essa liga é indicada para a indústria automobilística e aeronáutica, na fabricação de rodas de carros, na estrutura e revestimento de asas e rodas de aviões, também é indicada para peças que devem suportar temperaturas em torno de 150°C (RODRIGUES, 2015).

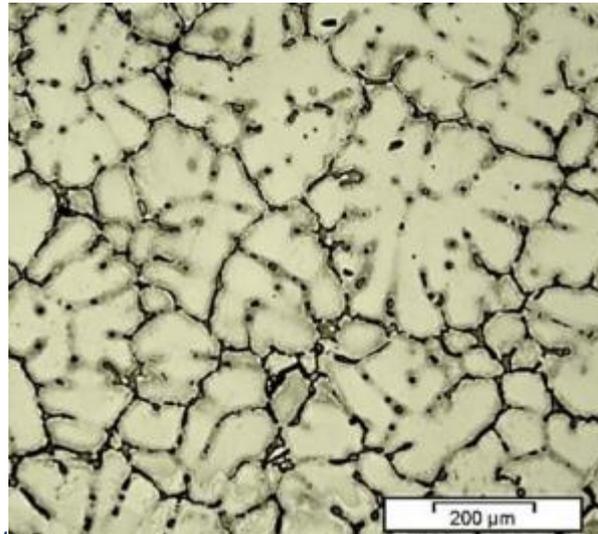
O cobre é adicionado nas ligas fundidas usualmente entre 4% e 5% (podendo chegar a 10%) dependendo da aplicação do componente fundido. As vantagens da presença do cobre nas peças fundidas, são uma diminuição na contratação de solidificação e melhoramento na usinabilidade devido à precipitação de compostos Al<sub>2</sub>Cu (FUOCO, 2001).

A precipitação do composto Al<sub>2</sub>Cu reduz severamente a resistência à corrosão da peça, devido à redução galvânica entre o composto e a matriz (alfa), onde a aplicação em ambientes úmidos ou atmosfera salina, pode levar à corrosão

(MONTEIRO, 2011).

A Figura 3 mostra a micrografia de uma liga de alumínio AA2024 com adição de cobre, sem tratamento térmico.

**Figura 3:** Micrografia obtida da liga de alumínio bruta de solidificação

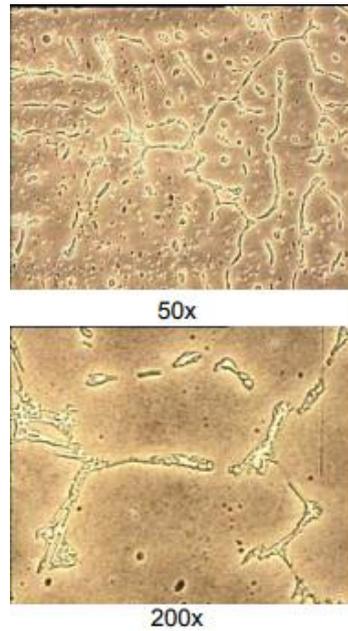


**Fonte:** DA SILVA, 2017.

A microestrutura observada na Figura 3, consiste em dendritas primárias de uma matriz rica em alumínio com uma rede interdendrítica de compostos intermetálicos nos contornos de grãos. Pode-se observar o “coring”, isto é, o centro dos grãos, composto de uma fase primária rica em alumínio (parte clara), e a medida que se aproxima dos contornos ocorre um sombreamento indicando enriquecimento de soluto (parte cinza). O autor (SILVA, 2017) observou que a segregação do elemento cobre, na região interdendrítica é mais severa do que dos outros elementos (SILVA, 2017).

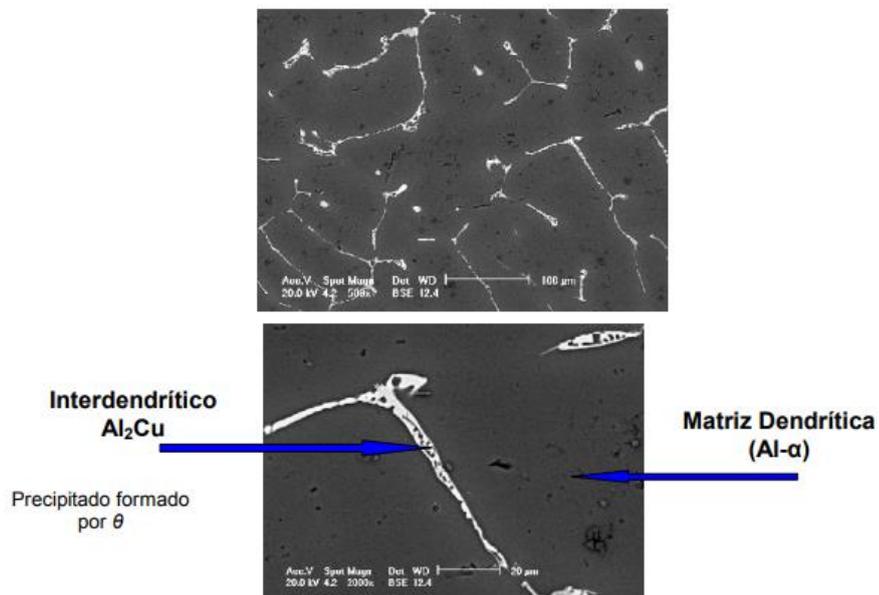
REIS (2009) estudou e verificou que em amostras que passam por tratamento térmico, é possível identificar a formação da fase interdendrítica  $Al_2Cu$ , como pode ser visto nas Figuras 4 e 5.

**Figura 4:** Microestrutura de uma liga Al-3,8%Cu.



**Fonte:** REIS, 2009.

**Figura 5:** MEV da liga Al-4%Cu.



**Fonte:** REIS, 2009.

Na Figura 4 observa-se uma matriz dendrítica de Al- $\alpha$  e regiões interdendríticas de Al<sub>2</sub>Cu, vistas em ampliações de 50x e 200x.

### **3.5. LIGAS AL-SI-CU**

Essas ligas são umas das mais importantes pois combinam as vantagens do silício (boa fluidez) com as vantagens das ligas tratáveis termicamente. A presença do silício permite o processamento de peças complexas (KAUFMAN, et al.; 2004).

A adição de cobre aumenta a resistência mecânica destas ligas e a resistência à fadiga sem a perda das boas características de fundibilidade das mesmas. É adicionado em quantidades superiores a 4,5% quando a resistência mecânica é, sobretudo, o principal aspecto tecnológico da liga (BERETA, 2007).

São ligas essencialmente para fundição, possuindo excelente moldabilidade, fluidez e melhores propriedades mecânicas após tratamento térmico que ligas binárias. Apresentam boa estanqueidade (baixo nível de porosidade) e boa resistência à corrosão (HERMMAN et al.; 1994).

Em razão de suas propriedades, as ligas Al-Si-Cu têm sido escolhidas como material para peças de motores, apresentam características como redução em massa, ótima transferência de calor, redução de temperaturas que promovem desgaste nas superfícies de contato, expansão térmica similar entre as peças dos motores, o que resulta em redução de ruído do conjunto, eliminação da usinagem de materiais dissimilares alumínio / metais ferrosos, e propriedades ótimas de reciclagem (HERMMAN et al.; 1994).

### **3.6. TRATAMENTOS TÉRMICOS**

Os tratamentos térmicos têm como finalidade modificar as propriedades dos materiais pela alteração do tipo e proporção das fases presentes, pela variação da morfologia dos microconstituintes ou pela variação da concentração e distribuição de defeitos cristalinos; essas modificações têm por consequência alterações nas propriedades mecânicas e comportamento em serviço (DE ARAUJO *et al.*; 2014).

Os principais tratamentos aplicados ao alumínio e suas ligas são homogeneização, recozimento, alívio de tensões, solubilização e envelhecimento.

#### **3.6.1 Solubilização das ligas Al-Cu**

O tratamento de solubilização baseia-se no aquecimento da liga a uma temperatura suficiente alta para que ocorra a dissolução dos precipitados endurecedores, no caso de ligas alumínio cobre a fase endurecedora da liga é a fase  $\theta$ , ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ). A precipitação ocorre em temperatura intermediária, na qual o processo de difusão precipita a fase dura, invertendo, portanto, o processo de solubilização, formando as fases endurecedoras  $\theta$  iniciais até a condição estável a temperatura ambiente (GARCIA, 2016).

Na prática, deve-se estabelecer também uma temperatura máxima para que o aquecimento não venha causar fusão localizada de constituintes de baixo ponto de fusão presentes na liga, o que comprometeria o acabamento ou até a integridade estrutural da peça tratada, dependendo da quantidade e da distribuição desses constituintes (RODRIGUES, 2015).

Além disso, quanto mais alta a temperatura e mais longo o tempo de tratamento, maior a tendência para o crescimento de grãos recristalizados, o que resulta na perda de propriedades mecânicas e prejuízo do acabamento superficial do produto final (ABAL, 2017).

O processo de solubilização consiste em elevar a temperatura da liga acima da temperatura de solubilização, manter o material nesta temperatura em tempo suficiente para a dissolução do soluto na matriz e, posteriormente, resfriá-la rapidamente para que a estrutura seja homogeneizada e permaneça de maneira estática nesta condição, até que novamente a precipitação das fases  $\theta$  ocorram, reiniciando o processo de envelhecimento natural, ou artificial (GARCIA, 2016).

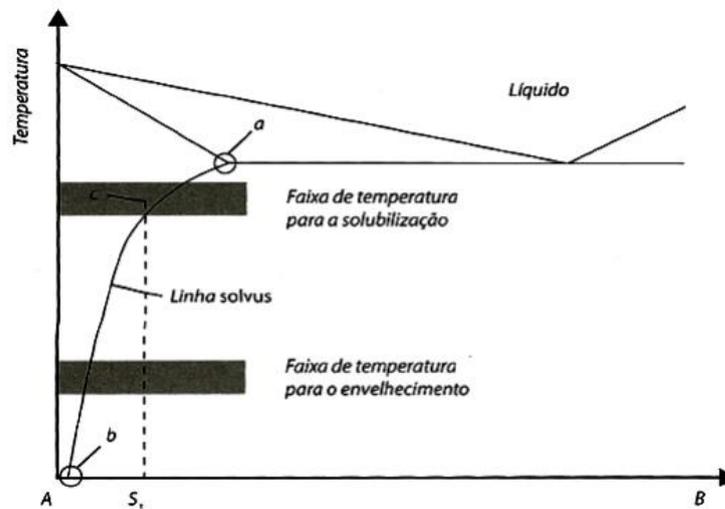
O objetivo do tratamento de solubilização é dissolver em solução sólida a maior quantidade possível de átomos de soluto, como cobre, magnésio, silício ou zinco, na matriz rica em alumínio. Para algumas ligas, a temperatura na qual a máxima quantidade de soluto pode estar dissolvida corresponde à temperatura eutética. Sendo assim, as temperaturas de solubilização devem ser limitadas a um nível seguro no qual as consequências do superaquecimento e da fusão parcial sejam evitadas (OLIVEIRA, 2010).

Neste tratamento o alumínio é solubilizado em temperaturas na faixa dos 400°C a 540 °C, durante o processo, alguns elementos de liga são redissolvidos para

produzir uma solução sólida rica em soluto. O objetivo deste processo é maximizar a concentração de elementos de endurecimento, entre eles, cobre, zinco, magnésio e/ou silício na solução sólida (ROSSI, 2004).

De acordo com Freitas (2014), a concentração e a taxa de dissolução desses elementos aumentam com a temperatura. Portanto, as temperaturas de solubilização são geralmente próximas à temperatura *solvus* da liga. A Figura 6 mostra esquematicamente o diagrama de uma liga que pode ser solubilizada.

**Figura 6:** Diagrama de uma liga que pode ser solubilizada.



**Fonte:** Freitas (2014, p. 121)

O resfriamento rápido que se segue após a solubilização é uma etapa crítica do tratamento, porque é fundamental para manter à temperatura ambiente a solução sólida obtida em alta temperatura. Além disso, o resfriamento rápido permite manter à temperatura ambiente a mesma concentração de lacunas existentes em alta temperatura, e estas lacunas são importantes para acelerar o processo de difusão dos átomos de soluto que ocorre no tratamento posterior de envelhecimento (endurecimento por precipitação). O meio de resfriamento rápido mais usado é a água, embora, caso seja necessária uma taxa de resfriamento mais baixa, possam ser usados diversos líquidos orgânicos como meios de resfriamento rápido. O resfriamento ao ar é muito lento para a maioria das ligas de alumínio, permitindo o prosseguimento do processo de precipitação, embora não seja tão lento como o resfriamento ao forno, evidentemente (GARCIA, 2016).

A temperatura aplicada é diferente para cada tipo de liga que esteja sendo trabalhada, então é feito um resfriamento rápido em água, para que se possa prevenir temporariamente a precipitação dos elementos da liga. Importante também é o tempo de transferência do meio de aquecimento para o resfriamento; caso seja demorado, pode ocorrer uma solubilização incompleta, que refletirá num resultado insatisfatório (PHILIPSON, 2002). O propósito do resfriamento é evitar a formação da fase de equilíbrio durante o resfriamento e a obtenção da maior quantidade possível destes elementos em solução sólida em baixa temperatura. A obtenção de alta resistência é dependente das altas taxas de extração de calor. Entretanto, a taxa de resfriamento não deve ser muito elevada. A fim de evitar distorções e tensões residuais nos componentes tratados (FREITAS, 2014).

No tratamento de solubilização para uma liga de alumínio com 5% de cobre, durante 2 horas, estudada por JANG et al. (2013) foi observado que conforme a temperatura de solubilização aumentava, o tamanho de grão também crescia.

### **3.6.2. Envelhecimento das ligas Al-Cu**

O envelhecimento tem como objetivo proporcionar a precipitação de constituintes dissolvidos na matriz de solução sólida durante o tratamento de solubilização na forma de partículas muito pequenas, que proporciona o aumento da dureza do material (JUNIOR, 2010).

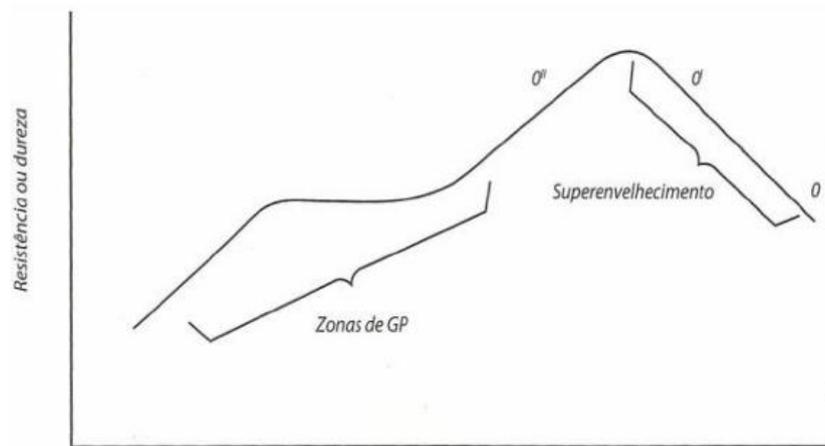
O endurecimento por precipitação obtido pelo tratamento de envelhecimento artificial, é um tratamento térmico bastante utilizado em ligas não-ferrosas onde são formadas pequenas partículas de segunda fase, ou seja, precipitados que melhoram a resistência do material. A razão para o interesse em sistema de ligas que apresentam precipitação de fases é justificada, principalmente, pela superioridade das propriedades mecânicas que estas ligas podem obter através de tratamentos (REIS, 2009).

Historicamente, o fenômeno de envelhecimento foi observado pela primeira vez em 1906 em uma liga Al-Cu-Mg cuja dureza aumentava com o tempo, na temperatura ambiente, pelo alemão Alfred Vilm (ABAL,2017). Em 1919 Merick, Scott e Valtenberg relacionaram o aumento da dureza do duralumínio com a mudança de solubilidade do composto  $Al_2Cu$  na liga. A partir da década de 30, com o advento da

microscopia eletrônica e com o uso do raio-X, o envelhecimento de ligas à base de alumínio obteve significativa importância em processos industriais (REIS, 2009). A temperatura e o tempo de envelhecimento determinam a mobilidade dos átomos de cobre, que tendem a formar a fase  $\theta$ . (JUNIOR, 2010).

De acordo com Bradaschia (1988), após o processo de solubilização, a liga está fora de equilíbrio, isto é, a solução sólida obtida está supersaturada com o soluto e apresenta força motriz para gerar a precipitação de outras fases durante o processo de envelhecimento. O primeiro precipitado a ser nucleado no processo de envelhecimento é chamado de zona de Guinier e Preston (GP) que são os átomos de cobre agrupados em pequenos aglomerados, e é coerente com a matriz e, portanto, possui baixa energia de interface. Este precipitado minimiza a energia de deformação, adquirindo a forma de disco. Segundo Rossi (2004), quando as zonas de GP se formam, a dureza aumenta em virtude de tensões necessárias para movimentar as discordâncias através das zonas coerentes que geram a deformação e tensão no reticulado cristalino. A dureza continua a aumentar com a formação dos precipitados  $\theta''$ , porque agora as discordâncias se deslocam através de uma matriz altamente deformada pelos precipitados coerentes. Com a formação de  $\theta'$ , o espaçamento entre os precipitados torna-se maior, de maneira que as discordâncias são capazes de passar entre eles e a dureza começa a diminuir. A máxima dureza é obtida com a combinação dos precipitados  $\theta''$  e  $\theta'$ . Com mais tempo no envelhecimento, a distância entre os precipitados aumenta, fazendo com que as discordâncias contornem mais facilmente e a dureza diminua (RODRIGUES, 2015). A Figura 7 mostra esse mecanismo.

**Figura 7:** Diagrama de uma liga que pode ser solubizada.



**Fonte:** Freitas (2014, p. 122)

Segundo Rossi (2004), o endurecimento por envelhecimento ocorre porque existe interação entre os campos de tensão associados às discordâncias e aos precipitados (assim como existe uma atração magnética entre um ímã e uma peça de aço). De uma forma ou de outra existe uma “neutralização” dos efeitos dos campos de tensão entre discordância e precipitado, o que diminui a energia interna do sistema. Philipson (2002) diz que no início do envelhecimento ocorre a migração progressiva dos elementos de liga em solução sólida para zonas GP e para os precipitados. A fração volumétrica de precipitados aumenta com o tempo de tratamento e, quanto mais “carregada” a liga, maior a quantidade de precipitados formados. Uma vez que quase todo o elemento de liga está fora da solução sólida, a fração volumétrica de precipitados permanece constante, após isso os precipitados menores irão se dissolver, “alimentando” os maiores. Isso diminui a quantidade de precipitados por unidade de volume e aumenta a distância entre eles.

O efeito da precipitação é bastante acelerado mediante aquecimento em temperaturas da ordem de 95°C a 205°C para ligas alumínio-cobre, muito inferiores à temperatura *solvus* (acima da qual ocorre a solubilização dos átomos de cobre), porém suficientes para a obtenção de energia térmica necessária para a difusão dos átomos de cobre que permite a formação dos precipitados endurecedores. Entretanto, o máximo de dureza atingido por uma liga através de tratamento térmico também corresponde a uma considerável queda de ductilidade e tenacidade. Por outro lado, o

superenvelhecimento, resultante do prolongamento do envelhecimento por longos períodos ou envelhecimento em altas temperaturas, provoca queda de dureza, porém simultaneamente aumento de ductilidade e tenacidade em comparação com a condição de máxima de dureza. Cada tipo (série) de liga de alumínio endurecível por precipitação (séries 2XXX, 6XXX, 7XXX e 8XXX) tem a sua faixa de temperaturas de envelhecimento artificial (em forno), assim como sua faixa de temperaturas de solubilização. Utiliza-se o termo envelhecimento natural para designar os processos de precipitação que ocorrem com a manutenção da liga de alumínio à temperatura ambiente - evidentemente muito mais lento e com níveis de dureza resultantes bem mais baixos que aqueles decorrentes do envelhecimento artificial (MURRAY, 1985).

Com a progressão do envelhecimento em uma temperatura suficientemente alta (artificial), formam-se precipitados metaestáveis, inicialmente coerentes e posteriormente semi-coerentes com a estrutura matriz de alumínio. Com o aumento do envelhecimento, ocorre a perda total da coerência cristalina havendo uma interface entre o precipitado e a matriz, aliviando as tensões criadas pelas fases theta anteriores, fazendo com que haja o amolecimento do material. Estes precipitados são por natureza estáveis, muito grandes e estão afastados, deixando espaço para o escorregamento das discordâncias, diminuindo a dureza e a resistência mecânica. Nas ligas de alumínio tratáveis, o envelhecimento é realizado em temperaturas de até 280°C (dentro do campo  $\alpha + \theta$ ) por um intervalo de tempo precisamente determinado. A combinação temperatura e tempo de envelhecimento determinam as características da dispersão da fase  $\theta$ . Para uma determinada temperatura existe um tempo “ótimo” em que a dispersão de precipitados é, na maior parte, coerente provocando o endurecimento máximo da liga (REIS, 2009).

Na Tabela 3 apresentam-se as temperaturas indicadas para solubilização e envelhecimento artificial para as séries das ligas alumínio-cobre fundidas.

**Tabela 3:** Temperaturas de solubilização e envelhecimento artificial para algumas ligas da série 2XX.X e 3XX.X.

Liga	T solubização (°C)	T envelhecimento (°C)
201.0	525-530	155
204.0	530	140-180
206.0	525-530	155

Fonte: HANDBOOK, 1993

O estudo de ELGALLAD et.al (2010), para ligas de Al-Cu com teores de soluto efetivos variando de 2% a 2,31% de cobre, solubilizadas a 495°C durante 8 horas e posteriormente envelhecidas artificialmente, mostrou que os maiores níveis de dureza ocorreram após 2 horas de tratamento, utilizando temperaturas de 180°C e 220°C, como pode ser visto na Tabela 4.

**Tabela 4:** Resultados do estudo para diferentes valores de teor de cobre.

Estudo	Teor de Cobre	Temperatura de Envelhecimento	Tempo de pico de dureza
<b>ELGALLAD (2010)</b>	2,09%	180°C e 220°C	2 Horas
	2,24%		
	2,31%		
	2,31%		

**Fonte:** ELGALLAD, 2010.

### 3.7. FUNDIÇÃO

A fundição é o processo de fabricação que visa transformar metais e ligas metálicas em peças de uso industrial tendo como ponto de partida o metal líquido ou fundido que é vazado no interior de um molde cuja cavidade é conformada de acordo com a peça que se deseja produzir (CHIAVERINI,1986). Na maioria dos casos a fundição é o processo inicial, pois permite a obtenção de peças com os formatos definidos ou possibilita a produção de lingotes para uso posterior em processos de conformação mecânica. O fator que diferencia os processos de fabricação é a confecção do molde que pode ser molde de areia ou molde permanente (coquilha) e a forma como o metal líquido toma a forma da cavidade do molde, que pode ser: por gravidade, baixa pressão, alta pressão (BRITO, 2015).

O termo molde permanente é usado na fundição para descrever um molde que pode ser usado repetidamente. Em contraste com a moldagem em areia que será destruída para remover o fundido, o molde permanente é projetado de maneira que possa ser separado para remover o fundido solidificado. Se o metal é vazado manualmente para o molde sem pressão exterior, os fundidos produzidos em moldes permanentes são chamados "fundidos por gravidade". Se o metal é forçado a entrar para o molde, os fundidos são designados por "fundidos sob pressão" (FERNANDES, *et al.*; 2001).

O fluxo de metal num molde permanente sob condições de gravidade é designado como molde permanente por gravidade. Existem duas técnicas em uso: vazamento estático, onde o metal é introduzido no topo do molde através de agitos de descida similar à areia em fundição; e vazamento inclinável, onde o metal é vazado numa bacia enquanto o molde está numa posição horizontal e flui para a cavidade à medida que o molde é gradualmente inclinado para a posição vertical. Normalmente, a moldação por gravidade é usada porque é mais precisa do que a moldagem em casca. É preferido quase exclusivamente a moldagem em casca para componentes de ligas leves (FERNANDES, *et al.*; 2001).

A moldação permanente produz fundidos densos tendo propriedades mecânicas superiores. Uma vez que os moldes são feitos de aço ou ferro fundido ligado, resistente ao calor e às repetidas mudanças de temperatura e relativamente estável, os fundidos produzidos são bastante uniformes na forma e muitas vezes têm um grau de exatidão dimensional mais elevado do que fundidos produzidos em areia, o que reduz ou elimina alguma maquinação que possa ser requerida. O processo de moldação permanente é também capaz de produzir uma qualidade consistente do acabamento dos fundidos. O processo também permite muito bem o uso de machos de peças múltiplas e torna possível a produção de peças que por uma razão ou outra não são apropriados para o processo de fundição em molde sob pressão. O processo pode ser usado para uma grande variedade de ligas ferrosas e não ferrosas. No entanto, a técnica de vazamento de metal por gravidade em moldes reutilizáveis atingiu um elevado grau de perfeição na fundição de alumínio e ferro fundido (FERNANDES, *et al.*; 2001).

Uma desvantagem é que o custo das ferramentas é usualmente mais elevado do que para a fundição em areia e deve ser amortizada ao longo de um vasto número de fundidos. No entanto, existe um requerimento básico para a fundição em moldes permanentes que é o seguinte: o número de fundidos a produzir tem de ser relativamente grande. O processo é geralmente limitado à produção de fundidos com um tamanho pequeno a médio com uma forma exterior simples. (FERNANDES, *et al.*; 2001).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os métodos experimentais e as técnicas de análise empregadas neste trabalho. O procedimento de fundição e os tratamentos térmicos foram realizados para verificar o efeito do tratamento térmico na liga Al-2%Cu.

### 4.1. FUSÃO E SOLIDIFICAÇÃO

Após cortados, o alumínio e o cobre foram pesados para obtenção da composição da liga em massa Al-2%Cu. A amostra foi obtida a partir da fusão de uma liga de alumínio da série 6000 e cobre grau eletrolítico com 99,9%. Os dois materiais foram adicionados em cadinhos de carvão de silício e aquecidos em forno da marca Jung, a temperatura de 1100°C para garantir total fusão dos componentes, com taxa de aquecimento de 9,16 °C/min. Após a fusão, a amostra foi vazada em molde metálico e resfriada a temperatura ambiente. A composição da liga de alumínio e cobre, podem ser vistas nas Tabela 5 e Tabela 6, respectivamente.

**Tabela 5:** Composição química da liga de alumínio.

Porcentagem em Peso (%)	Elementos									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Tl	Outros	Alumínio
<b>Mínimo</b>	0,70	-	-	0,40	0,40	-	-	-	-	-
<b>Máximo</b>	1,30	0,50	0,10	0,80	0,80	-	0,20	0,20	0,15	Restante

**Fonte:** Adaptado de THE ALUMINUM ASSOCIATION, 2015.

**Tabela 6:** Composição química do cobre.

Ligas	Composição %									
Denominação	Cu	Pb	Fe	Sn	Ni	Al	P	Mn	Ar	Zn
<b>Cobre Eletrolítico</b>	99,90 Min.	-	-	-	-	-	0,002 Max.	-	-	-

**Fonte:** Rioinox, 2018.

Após fusão e solidificação, a amostra foi submetida a cortes transversais que foram destinadas para realização do tratamento térmico de solubilização e envelhecimento artificial.

#### 4.2. TRATAMENTO DE SOLUBILIZAÇÃO

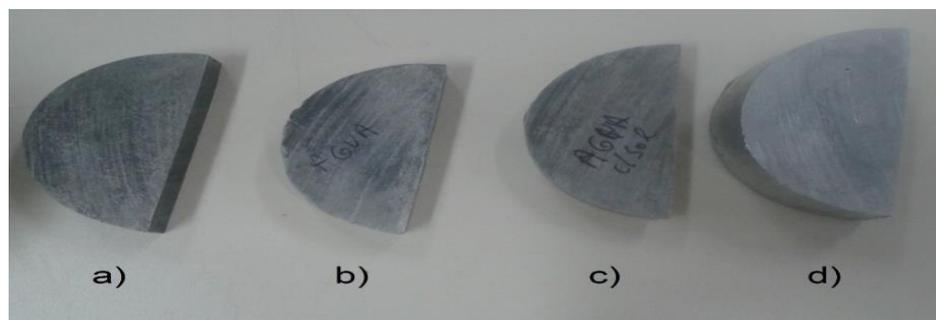
Para a solubilização, as peças foram colocadas no forno da marca Jung durante o período de 2 horas à temperatura de 525°C, com taxa de aquecimento de 7,5 °C/min.

Após este período, as amostras foram retiradas do forno e resfriadas rapidamente em dois meios de resfriamento (água e salmoura a temperatura ambiente).

#### 4.3. ENVELHECIMENTO ARTIFICIAL

Após o tratamento térmico de solubilização, as amostras foram submetidas ao processo de envelhecimento e precipitação das fases endurecedoras, a solubilizada em água e solubilizada em salmoura. Para tal, as amostras foram aquecidas a 180°C durante 2 horas, com taxa de aquecimento de 7,8 °C/min. Depois desse período, o forno foi desligado e as peças resfriaram lentamente por um período de até 12 horas. A Figura 8 mostra as peças após os tratamentos térmicos e a amostra sem tratamento.

**Figura 8:** Amostras após tratamentos térmicos, a) amostra solubilizada em água; b) e c) amostras solubilizadas (resfriada em água e salmoura, respectivamente), e envelhecidas; d) amostra sem tratamento térmico.



Fonte: Autor

#### 4.4. ENSAIO DE DUREZA

De forma a avaliar os efeitos dos tratamentos térmicos nas propriedades das peças, foram realizados ensaios mecânicos de dureza Rockwell F, indicado para

metais moles e ligas de cobre, nas amostras após os tratamentos térmicos. Realizou-se a medição pelo método de mapeamento de dureza para cada peça, onde várias indentações foram feitas pela face das peças, o que forneceu cerca de 30 valores de dureza para cada peça, assim tirando-se a média tem uma noção melhor do valor da dureza das amostras. Foi feito cerca de 7 arcos, com cerca de 3 milímetros de distância de um arco para o outro, para medir a dureza em cada peça, com 3 a 5 indentações em cada arco. A Figura 9 mostra as amostras após ensaio e um esquema de como foi realizado o mapeamento de dureza.

**Figura 9:** Amostras após mapeamento de dureza.



**Fonte:** Autor.

Para a realização do ensaio de dureza foi utilizado um durômetro da marca Pantec (Figura 10) o tempo de indentação foi de 10 segundos com uma pré-carga de 10 kgf, carga de 60 kgf e esfera de carbeto de tungstênio.

**Figura 10:** Durômetro Pantec.

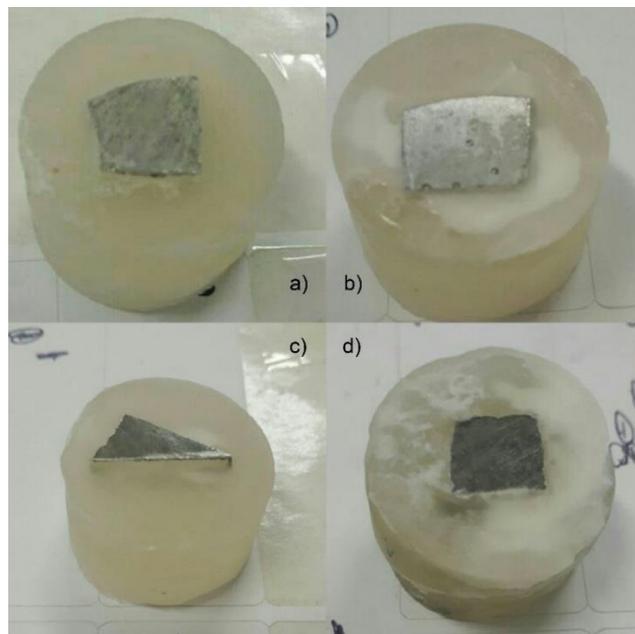


**Fonte:** Autor.

#### 4.5. ANALISE METALOGRAFICA

Após os ensaios de dureza os corpos-de-prova foram seccionados e as amostras retiradas foram embutidas a frio em resina acrílica própria para embutimento. A Figura 11 mostra as peças embutidas, prontas para as etapas seguintes.

**Figura 11:** Peças embutidas, a) e c) amostras solubilizadas (resfriadas em água e salmoura respectivamente) e envelhecidas; b) amostra sem tratamento térmico; d) amostra apenas solubilizada.



**Fonte:** Autor.

Após o processo de embutimento, as peças foram lixadas em lixadeira manual com lixas d'água de granulometria #80, 120, 150, 180, 280, 360, 400, 600, 1200 e 2000, respectivamente, com o objetivo de eliminar imperfeições e camadas de óxidos na superfície do material. A Figura 12 mostra uma peça durante o processo de lixamento.

**Figura 12:** Etapa de lixamento.



**Fonte:** Autor.

Depois das peças serem devidamente lixadas, passou-se para o processo de polimento, que foi realizada em politriz modelo PLF FORTEL. As peças foram polidas com alumina. A Figura 13 mostra uma peça durante a etapa de polimento.

**Figura 13:** Peça durante processo de polimento.



**Fonte:** Autor.

Depois de polidas, as peças foram atacadas quimicamente com reagente Keller, por cerca de 5 segundos para revelar a microestrutura. Após isso, a caracterização microestrutural das amostras foi feita utilizando microscópio ótico marca Zeiss Axioscop 40.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

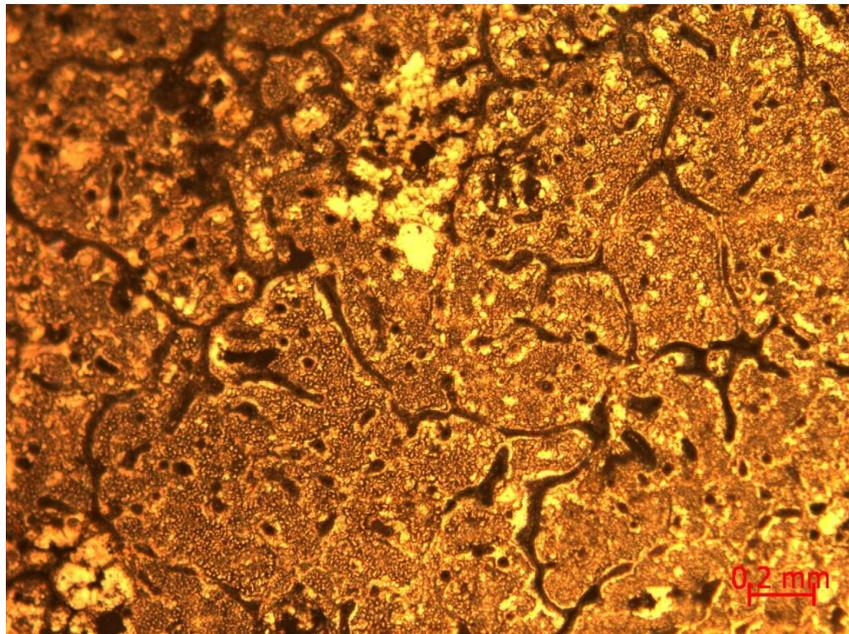
Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos na produção da liga Al-2%Cu tratadas termicamente por solubilização e envelhecimento artificial.

### 5.1. ANÁLISE MICROESTRUTURAL

As propriedades mecânicas dos materiais estão diretamente ligadas à sua microestrutura (GARCIA, 2016), ressaltando, assim, o motivo pelo qual o estudo e o controle da microestrutura dos materiais são tão importantes.

As Figuras 14 a 17 apresentam as microestruturas obtidas em condições anterior e posterior a aplicação dos tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento. A análise da microestrutura bruta de solidificação é apresentada na Figura 14.

**Figura 14:** Amostra bruta de solidificação. Aumento 100x. Ataque Keller.

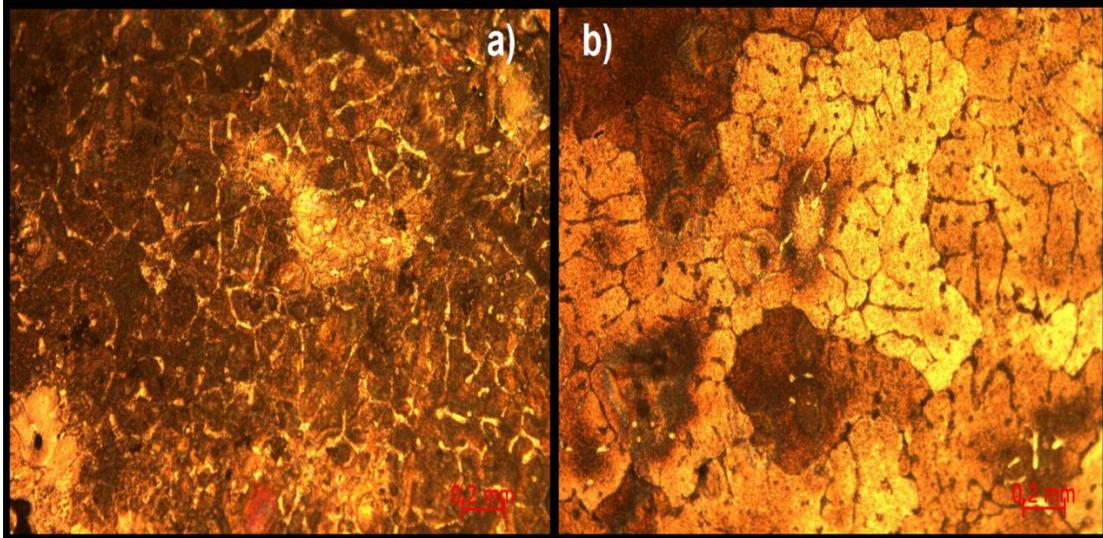


**Fonte:** Autor.

A análise da microestrutura bruta de solidificação, que pode ser vista na Figura 14, mostrou uma típica estrutura para uma amostra nessas condições, com formação dendrítica de grãos muito grosseiros e uma quantidade de soluto nos contornos de grãos. Também foram observados poros, provavelmente resultantes da presença de

gases retidos no metal líquido durante o processo de solidificação.

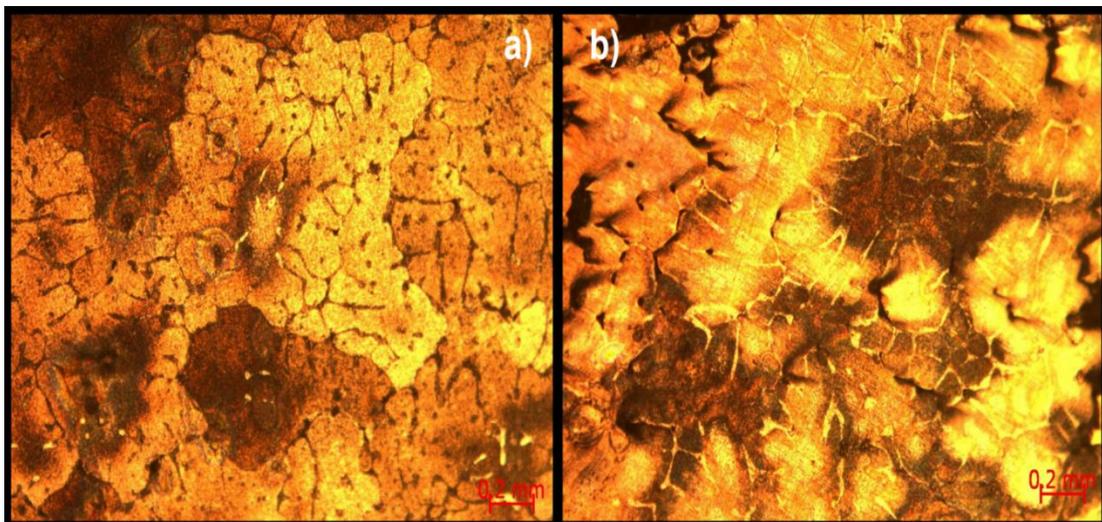
**Figura 15:** a) amostra solubilizada resfriada em água e b) amostra solubilizada resfriada em água e envelhecida. Aumento 100x. Ataque Keller.



Fonte: Autor.

Observando as microestruturas das amostras que passaram pelo processo de solubilização (resfriamento em água) e posterior envelhecimento, Figura 15(a) e 15 (b), nota-se a influência do tratamento térmico na microestrutura, obtendo-se ao final uma microestrutura com contornos dendríticos mais finos de  $Al_2Cu$  distribuídos ao longo da matriz de alumínio.

**Figura 16:** a) amostra solubilizada resfriada em água e envelhecida e b) amostra solubilizada resfriada em salmoura e envelhecida. Aumento 100x. Ataque Keller.



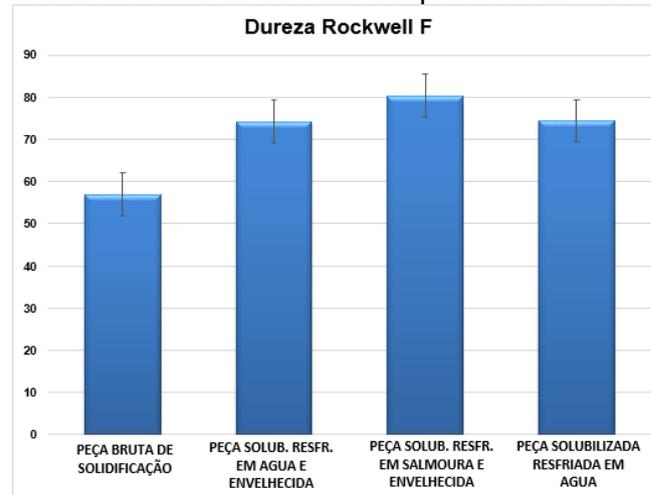
Fonte: Autor.

Avaliando as micrografias das amostras solubilizadas com resfriamento em água e resfriamento em salmoura, seguidas de posterior envelhecimento, nota-se que as amostras resfriadas em água obtiveram uma microestrutura mais refinada que as amostras resfriadas em salmoura, o que está de acordo com estudos que mostram que a taxa de resfriamento é fator determinante no espaçamento entre os ramos dendríticos e, segundo Zhang et al. (2008) esses espaçamentos diminuem com o aumento da taxa de resfriamento e, conseqüentemente, observa-se um acréscimo na resistência mecânica da liga; o resfriamento em água apresenta uma taxa de resfriamento mais rápido, o que impede um crescimento dendrítico grosseiro. As amostras resfriadas em salmoura, por sua vez, apresentaram uma microestrutura dendrítica relativamente grosseira. Esse fator pode ser explicado, principalmente, por um resfriamento mais lento quando comparado ao resfriamento em água.

Comparando as micrografias das amostras obtidas, é possível perceber a influência dos tratamentos térmicos na microestrutura da liga, onde o resfriamento após a solubilização provocou um certo refino das dendritas quando comparado com a amostra bruta de solidificação. O tratamento de envelhecimento, por conseguinte, possibilitou a precipitação da fase intermetálica de  $Al_2Cu$  em forma de pequenos precipitados distribuídos na matriz. A amostra que foi solubilizada resfriada em água e posteriormente envelhecida foi a que apresentou a microestrutura mais refinada e com melhor distribuição de precipitados intermetálicos, em decorrência do resfriamento mais acelerado, conforme indicado por Paray (1992) que estudou que um aumento na taxa de resfriamento promove o refinamento da microestrutura.

## **5.2. DUREZA ROCKWELL**

A comparação entre os valores de dureza obtidos de cada amostra pode ser vista na Figura 18.

**Figura 17:** Gráfico de dureza Rockwell F para as amostras estudadas.

**Fonte:** Autor.

Comparando as peças, é possível observar que, de maneira geral, há um aumento na dureza da liga estudada em função dos tratamentos térmicos, onde as peças envelhecidas apresentaram valores de dureza maiores que as peças sem tratamento térmico.

Os tratamentos térmicos aplicados levaram a um aumento de dureza em torno de 35% para as amostras tratadas, em comparação as durezas das amostras com estrutura bruta de solidificação. Um fator que pode ter influenciado nesse aumento pode estar diretamente relacionado ao refino dendrítico e a dispersão de soluto (em forma de precipitados) na matriz de alumínio.

Outro fator que pode ter influenciado no aumento da dureza nas peças com tratamento térmico pode estar associado a formação das zonas Guiner-Preston (fase intermetálica  $Al_2Cu$ ) onde com o início do tratamento de precipitação ocorre um aumento na dureza da liga, devido a formação dessas zonas, o que está em conformidade com os efeitos do cobre no alumínio. Tendo como referência DIETER (1961) as zonas Guiner-Preston, coerentes com a matriz, produzem uma deformação na rede cristalina, resultando em um ganho na dureza ou tensão de escoamento da liga, devido ao maior impedimento causado ao movimento das discordâncias. Pode se então dizer que a possível formação dessa fase intermetálica é a razão do aumento de dureza notados nas amostras com tratamento térmico, enquanto a amostra sem tratamento e conseqüentemente sem a formação da fase  $Al_2Cu$ , apresentou os menores valores de dureza.

## 6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos decorrentes dos experimentos de fundição e dos tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento artificial permitem que sejam extraídas as seguintes conclusões:

- Em relação as análises microestruturais, pode-se dizer que houve uma influência dos tratamentos térmicos em comparação com as amostras sem tratamento, ocorrendo maior refino dendrítico nas amostras solubilizadas resfriadas em água e envelhecidas;
- Em relação a dureza dos materiais, notou se o aumento dos valores de dureza de acordo com os tratamentos térmicos, devido a precipitação de fase intermetálica  $Al_2Cu$ , onde as amostras envelhecidas obtiveram maiores valores.

## 7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas pesquisas podem ser sugeridas como forma de continuação dos temas abordados neste trabalho relacionadas à avaliação de certos parâmetros não estudados aqui, como:

- Análise da composição química da liga obtida e realização de análise quantitativa para identificar com mais precisão os elementos e fases presentes;
- Investigar mais a influência do meio de resfriamento salmoura, no processo de envelhecimento artificial;
- Estudar outras composições químicas, variando o teor de Cu e/ou Si;
- Aplicar o processo de squeeze-casting, para verificar o quanto pode influenciar na microestrutura e dureza.

## 8. REFERÊNCIAS

- ABAL. **Fundamentos e Aplicações do Alumínio.** Disponível em: <<http://www.abal.org.br>>. Acessado em: 04 De Fevereiro 2018.
- ABDOU, J. A. R. **Reciclagem Do Alumínio Utilizado Em Aulas No LabMat-FEI.** Universidade Federal De Itajubá. Itajubá, Minas Gerais. 2002.
- ABNT NBR 6834. **Alumínio e suas ligas - Classificação da Composição Química.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2006.
- ALCOA. **Ligas E Têmperas De Extrusão.** Disponível em: <[http://www.aluminiosaojose.com.br/industria/10\\_ligasetemperas.pdf](http://www.aluminiosaojose.com.br/industria/10_ligasetemperas.pdf)>. Acessado em: 04 De Fevereiro 2018.
- Alumínio – Al.** Disponível em: <<http://www.quimlab.com.br/guiadoselementos/aluminio.htm>>. Acessado em: 04 De Fevereiro 2018.
- Alumínio.** Disponível em: <<http://alunosonline.uol.com.br/quimica/aluminio.html>>. Acessado em: 04 De Fevereiro 2018.
- Alumínio. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/4-1-aluminio>>. Acessado em: 08 De Março de 2018.
- BAIA, C.; PEREIRA, J. A. O; SANTOS, R. S.; OLIVEIRA, T. V.; PAZ, W. **Alumínio E Suas Ligas.** Universidade Federal Do Pará. Faculdade De Engenharia Mecânica. Tucuruí, Pará. 2013.
- BERETA, L. A. **Modificação Microestrutural Da Liga Al-Si 380 Conformada Por Spray Com A Co-Injeção De Partículas Contendo Fases Intermetálicas.** (Dissertação de Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, São Paulo. 2007.
- 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, Amazonas. 2015
- CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- CHIAVERINI, V. **Materiais De Construção Mecânica.** 2. ed. São Paulo, 1986. Editora McGraw-Hill LTDA.

- COUTO, A. A.; MELO, N. M. P.; NETO, A. C.; RAIÁ, F.; MACHADO, K. B. S. C. **Estudo Do Comportamento Em Fadiga De Ligas De Alumínio Endurecidas Por Precipitação**. 2008.
- DA SILVA, A. **Efeito Das Taxas De Resfriamento Nas Propriedades Mecânicas E Elétricas Da Liga AA2024**. (Dissertação de Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Materiais para Engenharia. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, Minas Gerais. 2017.
- DE ALMEIDA, D. T. **Estudo Dos Parâmetros no Processo De Soldagem De Mistura Por Atrito Da Liga De Alumínio**. (Trabalho De Conclusão De Curso). Universidade Regional Do Noroeste Do Estado Do Rio Grande Do Sul. Curso De Engenharia Mecânica. Campus Panambi, Panambi, Rio Grande Do Sul. 2013.
- DE ARAÚJO, D. J.; ROMERO, J. A. S.; MADANI, F. S.; BARBIERI, F. C. **Estudo Do Envelhecimento Artificial Da Liga De Alumínio 7075**. Universidade Paulista. Campus São José Dos Campos. São José Dos Campos, São Paulo. 2014.
- DIETER, G. E. – **Engineering Design: Materials and Processing Approach**, 2ª edição, McGraw Hill Books, New Jersey – 1961.
- FAZANO, C. A. T. V. A. **Prática Metalográfica**. São Paulo, Hemus Livraria Editora Limitada, 1980.
- FERRARINI, C. F. **Microestrutura E Propriedades Mecânicas De Ligas Al-Si Hipeutéticas Conformadas Por Spray**. (Tese de Doutorado). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, São Paulo. 2005.
- FILHO, F. A. M. R. **Estudo Comparativo de Resistência À Corrosão Entre Ligas Metálicas Ferrosas E Não Ferrosas**. (Trabalho De Conclusão De Curso). Universidade Federal Do Ceará. Fortaleza, Ceará. 2015.
- FREITAS, P. S. **Tratamento térmico dos metais: da teoria à prática** / Paulo Sergio de Freitas. – São Paulo: SENAI-SP Editora, 2014.
- FUOCO, R. **Fundição de ligas de alumínio**. IPT, São Paulo. Novembro, 2001.
- GARCIA, A. – **Solidificação: Fundamentos e Aplicações**, Ed. da Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Campinas, 2016.
- GONÇALVES, R. A. **Investigação Da Usinabilidade das Ligas De Alumínio Da Série 6XXX**. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, Minas Gerais. 2012.
- HAMN, M.; TALIB, LA.; DAUD, A.R. **Effect of element additions on wear property of eutectic aluminum-silicon alloys**. 1996, WEAR, Vol 194, p.54-59.

IMPACTA. Disponível em: <https://www.impacta.com.br/blog/2015/03/29/conductor-de-cobre-ou-aluminio-saiba-quando-e-por-que-utiliza-los/>. 2018.

JUNIOR, P. A. M. **O Comportamento Da Corrosão Sob Tensão Da Liga 7075 – T6 para Futuras Utilizações Em Projetos Mecânicos**. (Dissertação de Mestrado). Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais. 2010.

KAUFMAN, J.; ROOY, E. **Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, And Applications**, ASM International, 2004, pp 1 – 27, 47 – 54.

MACEDO, A. M.; ALVES, C. B.; SILVA, V. M.; DE OLIVEIRA, A. C. A. **Impacto Do Alumínio No Meio Ambiente E Na Saúde**. Faculdade Alfredo Nasser. Instituto de Ciências da Saúde. Goiânia, Goiás. 2016

MARTELLO, L. **Desenvolvimento De Processo De Forjamento Da Liga De Alumínio AA6351 Com Auxílio De Computação Numérica**. (Dissertação De Mestrado). Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul. Porto Alegre, Rio Grande Do Sul. 2007.

**Melhorando As Propriedades Do Alumínio**. Disponível em: <[https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/8/8f/Aula\\_12.pdf](https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/8/8f/Aula_12.pdf)>. Acessado em: 04 De Fevereiro 2018.

**Metais E Ligas – Alumínio**. Disponível em: < <http://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=54>>. Acessado em: 05 De Fevereiro 2018.

MONTEIRO, R. L. **Análise Do Efeito de Tratamento térmico T4 Em Ligas De Al-Cu Produzidas Pelo Processo De “Direct Squeeze Casting”**. (Trabalho De Conclusão De Curso). Universidade Federal Do Pará. Faculdade De Engenharia De Materiais. Marabá, Pará. 2011.

MOURA, A. R. S.; FERREIRA, E. H. F.; FUKUSHIMA, F. K.; NETO, T. M. A.; MOUTINHO, T. M. P; COSTA, T. V. C. **Processo De Obtenção Do Alumínio**. Universidade Federal Do Pará. Faculdade De Engenharia Mecânica. Belém, Pará. 2008.

MURRAY, J.L. The Al-Cu (Aluminum-Copper) System. **Bulletin of Alloy Phase Diagrams**, v.1, n.1, 1985. 32p.

OLIVEIRA, M. T. **Avaliação do Efeito dos Tratamentos Térmicos de Solubilização e Envelhecimento Artificial na Microestrutura e Propriedade Mecânica de Ligas do Sistema Al-Cu Obtidas por Solidificação Unidirecional**. (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Federal do Pará. Marabá, Pará. 2010.

PAZINI, H. **Propriedades Mecânicas Da Liga De Aço Damasco SAE 5160 + UHB**

**15N20.** (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Regional do Noroeste do Rio Grande do Sul. Panambi, Rio Grande do Sul. 2011.

PHILIPSON, F. R.; OLIVEIRA, G. G. **2º Seminário técnico de tratamento Térmico do Alumínio e suas Ligas** – ABAL/SENAI, Osasco, 2002.

PIMENTA, E. A. R. **Estudo Dos Processos De Soldagem TIG E IMG Em Estruturas De Alumínio 6351 T6 NBR ISSO 209-2010.** (Dissertação de Mestrado). Universidade De Taubaté. Taubaté, São Paulo. 2012.

PRADOS, E. F.; GONÇALVES, L. R. G.; FERRANTE, M.; SORDI, V. L. **Efeito Da Extrusão Em Canal Angular Na Microestrutura E Na Resistencia Mecânica De Uma Liga Al-4%Cu**, in: 17º CBECIMaT, p. 7533-7544. Foz do Iguaçu, Paraná. 2006.

REIS, B. P. **Influência da Estrutura de Solidificação nas Condições de Solubilização da Liga Al-4,0%Cu.** (Dissertação de Mestrado). Faculdade De Engenharia e Tecnologia de Mecânica. Programa de Pós Graduação em Engenharia e Tecnologia dos Materiais, PUCRS. Porto Alegre, Rio Grande Do Sul. 2009

**Tabela de Ligas.** Disponível em: <  
<http://www.rioinox.com/TABELA%20DE%20LIGAS%20Cobre%20Lat%C3%A3o%20e%20Alum%C3%ADnio.pdf> >. Acessado em: 04 De Fevereiro 2018.

RODRIGUES, G. L. **Efeitos Dos Tratamentos Térmicos Em Ligas De Alumínio.** (Trabalho De Conclusão De Curso). Universidade De Rio Verde. Faculdade De Engenharia Mecânica. Rio Verde, Goiás. 2015.

ROHDE, R. A. **Metalografia Preparação De Amostras.** 2010. Disponível em: <  
<http://www.urisan.tche.br/~lemm/metalografia.pdf>>. Acessado em: 14 De Fevereiro 2018.

ROSSI, V. L. **Influência da composição química e dos parâmetros de processo sobre a Resistência à corrosão em peças fundidas usando as ligas de alumínio 356 e A 356.** Dissertação (mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – UDESC, Joinville, 2004.

**Tabela De Ligas.** Disponível em: <  
[http://plastmetal.com.br/tabelas/825ea7975655/tabela\\_de\\_ligas.pdf](http://plastmetal.com.br/tabelas/825ea7975655/tabela_de_ligas.pdf)>. Acessado em: 05 De Fevereiro De 2018.

VENDRAMINE, C. F. **Levantamento Da Curva TTT Do Aço 15B30 Com Análise Dos Constituintes Ferrita E Perlita.** (Trabalho De Conclusão De Curso). Centro Universitário Da FEI. São Bernardo Do Campo, São Paulo. 2012