

**UniRV – UNIVERSIDADE DE RIO VERDE  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**EFEITOS DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS EM LIGAS DE ALUMÍNIO**

**GABRIEL LOPES RODRIGUES**

**Orientador: Prof. Dr. WARLEY AUGUSTO PEREIRA**

**Monografia apresentada a faculdade de Engenharia Mecânica da UniRV – Universidade de Rio Verde – Como parte das exigências para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.**

**RIO VERDE – GOIÁS**

**2015**

**UniRV – UNIVERSIDADE DE RIO VERDE  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**EFEITOS DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS EM LIGAS DE ALUMÍNIO**

**GABRIEL LOPES RODRIGUES**

**Orientador: Prof. Dr. WARLEY AUGUSTO PEREIRA**

**Monografia apresentada a faculdade de Engenharia Mecânica da UniRV – Universidade de Rio Verde – Como parte das exigências para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.**

**RIO VERDE – GOIÁS**

**2015**



# UNIVERSIDADE DE RIO VERDE

CRENCIADA PELO DECRETO Nº 5.971 DE 02 DE JULHO DE 2004

Fazenda Fontes do Saber  
Campus Universitário  
Rio Verde - Goiás

Cx. Postal 104 - CEP 75901-970  
CNPJ 01.815.216/0001-78  
I. E. 10.210.819-6 / I.M. 021.407

Fone (64) 3620-2200  
e-mail fesurv@fesurv.br  
www.fesurv.br

## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO:** EFEITOS DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS EM LIGAS DE ALUMÍNIO

**AUTOR:** GABRIEL LOPES RODRIGUES


**ORIENTADOR:** Prof. Dr. WARLEY AUGUSTO PEREIRA

Esta monografia foi julgada adequada para obtenção do título de BACHAREL EM ENGENHARIA MECÂNICA e aprovada em sua forma final.

  
Prof. Dr. WARLEY AUGUSTO PEREIRA

  
Prof. EDSON ROBERTO DA SILVA

  
Prof. ANDERSON INÁCIO JUNQUEIRA JÚNIOR

  
Prof. Dr. WARLEY AUGUSTO PEREIRA  
Diretor da Faculdade de Engenharia Mecânica

9263.2205  
Pg

RIO VERDE - GO

2015

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esta monografia aos meus pais, Luiz Carlos Rodrigues e Cléa Lopes Rodrigues e a minha irmã, Daniela Lopes Rodrigues, que são pessoas de extrema importância na minha vida, e que me ensinaram a nunca desistir, por mais dura e difícil que fosse a batalha, pois no final, todo o trabalho e sacrifício serão recompensados. Obrigado por existirem. Amo muito todos vocês!

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por me conceder a oportunidade de vir a esse mundo e poder demonstrar minha capacidade.

Aos professores da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade de Rio Verde, que transmitiram seus conhecimentos e experiências durante esses cinco anos de graduação e são responsáveis diretos pelo profissional que serei.

Aos meus pais, Luiz Carlos Rodrigues e Cléa Lopes Rodrigues, a minha irmã, Daniela Lopes Rodrigues, que me apoiaram em todas as horas de dificuldades, nunca me permitiram baixar a cabeça, sempre compreenderam a minha falta de tempo e, às vezes, minha falta de paciência para com eles. Muito Obrigado!

Ao professor Warley Augusto Pereira, pelo tempo dedicado à orientação deste trabalho, pela paciência e pelo apoio.

Aos meus amigos e colegas de graduação cujos nomes não citarei para não correr o risco de cometer algum esquecimento imperdoável, especialmente aqueles que terminaram a graduação junto comigo.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

RODRIGUES, G. L. **EFEITOS DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS EM LIGAS DE ALUMÍNIO**. 2015. 39 f. Monografia<sup>1</sup> (Graduação em Engenharia Mecânica) – UniRV – Universidade de Rio Verde, Rio Verde, 2015.

O constante crescimento no consumo de alumínio no mercado demonstra o quanto ele é necessário na indústria atualmente, a grande variedade de usos que se destina o alumínio é proveniente das características nele disponíveis, entre elas a leveza, a ductilidade e resistência a esforços mecânicos. Contudo, para atender às constantes necessidades de mercado, foi necessário o desenvolvimento de ligas especiais para que pudessem acrescentar características determinadas de acordo com as exigências requeridas. A maioria das ligas de alumínio podem ter suas propriedades mecânicas, estabilidade dimensional ou resistência à corrosão melhorada por meio de tratamentos térmicos. Este trabalho teve como objetivo analisar as influências e as características que cada tipo de tratamento térmico proporciona às ligas de alumínio. Esta análise foi feita através da realização dos tratamentos de solubilização, têmpera e envelhecimento em duas amostras, uma com 12,1% Si e outra com 16,41% Si, como elemento principal na sua composição. Para a análise dos resultados foram feitas medidas de dureza nas peças sem tratamento e após cada tratamento, a fim de verificar os benefícios adquiridos. Os resultados mostraram que após a solubilização as duas ligas obtiveram uma diminuição da dureza de aproximadamente 50%. Porém, após o envelhecimento houve um aumento da dureza em 60% na liga com 12,1% de silício e de 96,60% na liga com 16,41% de silício. Sendo o tratamento de solubilização recomendado para casos onde a dureza não seja característica essencial, já o tratamento de envelhecimento se mostrou muito eficiente para endurecer estas ligas. Como é praticamente impossível obter bons resultados em todas as características proporcionadas pelas ligas de alumínio, conclui-se que os tratamentos realizados neste trabalho foram bem dimensionados para cada tipo de aplicação recomendada.

## PALAVRAS-CHAVE

Ensaio de dureza, propriedades mecânicas, solubilização, têmpera, envelhecimento.

---

<sup>1</sup> **Orientador:** Prof. Dr. Warley Augusto Pereira. Examinadores: Prof. Anderson Inácio Junqueira Junior; Prof. Edson Roberto da Silva.

## ABSTRACT

RODRIGUES, G. L. **EFFECTS OF THE THERMAL TREATMENTS IN ALUMINUM ALLOYS**. 2015. 39 f. Monograph <sup>2</sup> (Graduation in Mechanical Engineering) – UniRV – University of Rio Verde, Rio Verde, 2015.

The constant growth in the consumption of the aluminum in the market demonstrate how much it is necessary in the industry at present, a large variety of the uses that if fate the aluminum is coming of the characteristics in him availables, among they lightness, flexible and resistance the mechanicals efforts. However, to attend the necessities constant of the market, went necessary the development of the specials alloys to that could to add characteristics determined in agreement with the required demands. Most alloys of aluminum can to have yours mechanicals properties, extent stability or resistance the progress corrosion by means thermics treatments. This work had as goal analyze the influences and the characteristics that each kind of thermic treatment propose the aluminum alloys. This analysis was taken through the achievement of treatments of solubilization, quenching and aging in two samples, a with 12% Si and other with 16,41% Si, as principal element in the your composition. For the analysis of results they were made measures the hardness in the peaces without treatment and after treatment, in order to check the acquired benefits. The results showed that after the solubilization the two alloys got a decrease of the hardness of approximately 50%. However, after aging there was an increase of the hardness in 60% in the alloy with 12,1% of silicon and of 96,60% in the alloy with 16,41% of silicon. That being the treatment of solubilization recommended for cases where the hardness is not an essential feature, already the treatment of aging if showed very efficient to harden these alloys. How is practically impossible to go results good in all the characteristics proposed by alloys of aluminum, concluded that the treatments performed in this project were well dimensioned for each type of application recommended.

## KEY WORDS

Hardness testing, mechanical properties, solubilization, quenching, aging.

---

<sup>2</sup> **Advisor:** Prof. Dr. Warley Augusto Pereira. Examiners: Prof. Anderson Inácio Junqueira Junior; Prof. Edson Roberto da Silva

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Diagrama de fases alumínio-cobre .....	15
FIGURA 2 – Diagrama de fases da liga Alumínio-manganês .....	16
FIGURA 3 – Diagrama de fases da liga alumínio-silício.....	17
FIGURA 4 – Diagrama de fases da liga alumínio-magnésio .....	18
FIGURA 5 - Diagrama de fases da liga alumínio-zinco .....	19
FIGURA 6 – Alumínio – Estrutura cristalina.....	20
FIGURA 7 – Efeito do trabalho a frio nas propriedades mecânicas da .....	21
FIGURA 8 (a) (b) – Comparação da estrutura da liga antes e após a .....	22
FIGURA 9 – Diagrama temperatura x tempo x transformação.....	24
FIGURA 10 – Diagrama de uma liga que pode ser solubilizada .....	25
FIGURA 11 (a) (b) (c) – Solubilização .....	26
FIGURA 12 - Influência do tempo de envelhecimento sobre a dureza.....	27
FIGURA 13 – Evolução da forma dos precipitados x tempo (curva de.....	28
FIGURA 14 – Fotografia do equipamento utilizado para medir as .....	30
FIGURA 15 – Fotografia das peças utilizadas para tratamento térmico vista .....	32
FIGURA 16 - Forno utilizado para a realização dos tratamentos .....	34



## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Sistema de designação conforme a norma da ABNT NBR 6834.....	13
TABELA 2 – Composição da amostra “1” .....	33
TABELA 3 – Composição da amostra “2” .....	33
TABELA 4 – Temperatura e tempo utilizado na solubilização .....	35
TABELA 5 - Temperatura e tempo utilizado no Envelhecimento .....	35
TABELA 6 – Durezas médias antes e após os tratamentos térmicos.....	36

## SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO .....	10
1.1 - Objetivos .....	10
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1 - Informações Gerais .....	11
2.2 - Ligas de Alumínio.....	12
2.3 - Ligas de Alumínio Tratáveis Termicamente.....	13
2.4 - Características e Utilização das Ligas de Alumínio Tratáveis Termicamente.....	14
2.4.1 Liga Alumínio-Cobre .....	14
2.4.2 - Liga Alumínio-Manganês .....	15
2.4.3 - Liga Alumínio-Silício .....	16
2.4.4 - Liga Alumínio-Magnésio .....	18
2.4.5 - Liga Alumínio-Zinco.....	18
2.5 - Estrutura do alumínio .....	19
2.6 - Tratamentos Térmicos Aplicados nas Ligas de Alumínio .....	20
2.6.1 - Têmperas .....	20
2.6.2 - Homogeneização .....	22
2.6.3- Recozimento.....	22
2.6.4 - Alívio de tensões .....	23
2.6.5 - Solubilização .....	24
2.6.6 - Envelhecimento .....	26
2.7 - Determinação da Dureza .....	29
2.7.1 - Dureza Rockwell .....	29
2.8 - Fornos para tratamento térmico.....	30
3 - MATERIAIS E MÉTODOS .....	32

3.1 - Tratamentos Térmicos Realizados .....	33
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	36
5 - CONCLUSÃO .....	37
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	38

## **1 - INTRODUÇÃO**

Tratamento térmico é a operação ou conjunto de operações realizadas com finalidade de conferir ao material determinadas características por meio do aquecimento, permanência em determinada temperatura ou o resfriamento controlado, proporcionando modificações nas propriedades das ligas pela alteração do tipo e proporção dos elementos nela presentes. (FREITAS, 2014)

Segundo Rossi (2004) o alumínio puro possui várias qualidades que o fazem a ser o segundo metal mais utilizado no mundo, atrás apenas do aço. Características como leveza, ductilidade, resistência a esforços mecânicos e a ataques do meio ambiente já o tornam extremamente funcional no mercado. Porém, para atender às constantes necessidades do mercado, foi necessário desenvolver ligas que puderam acrescentar características especiais para determinadas exigências.

A maioria das ligas de alumínio podem ter suas propriedades mecânicas, estabilidade dimensional ou resistência à corrosão, melhoradas por meio de tratamentos térmicos, que são realizados visando remover ou reduzir as segregações e controlar algumas características metalúrgicas. O tipo de tratamento térmico a ser realizado depende, muitas vezes, das propriedades desejadas na peça fundida (VERRAN, 2005).

Sendo assim, foi feito um levantamento e uma análise dos diferentes tipos de tratamentos térmicos aplicados às ligas de alumínio, a fim de descobrir e aprofundar ainda mais no conhecimento dessas importantes ligas metálicas.

### **1.1 - Objetivos**

O presente trabalho tem como objetivo analisar as influências e as características que cada tipo de tratamento térmico proporciona aos diferentes tipos de ligas de alumínio, através de uma análise comparativa entre os estudos teóricos e os resultados dos testes realizados em laboratório, buscando melhorias e aperfeiçoamentos destas ligas.

## **2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo são revisadas as principais particularidades dos tratamentos térmicos em ligas de alumínio, assim como os principais métodos disponíveis na literatura para análise e execução destes procedimentos.

### **2.1 - Informações Gerais**

O grande aumento no consumo de alumínio mostra o quanto ele é necessário na indústria atualmente, tornando-se o mais importante dos metais não ferrosos. A variedade de usos que se destina o alumínio é um detalhe interessante, e cada nova utilização é o resultado da necessidade de certas características disponíveis (ABAL, 2004).

Segundo Freitas (2014) o elemento alumínio é abundante na forma de óxido de alumínio ou alumina, a alumina constitui cerca de 15% da crosta terrestre e apenas o silício é mais abundante que ela, dessa forma, as reservas minerais são quase ilimitadas. O minério industrial mais importante é a bauxita, com um teor de óxido de alumínio entre 35 a 45%, e é encontrado principalmente nos trópicos, e no Brasil concentra-se na área amazônica. (FREITAS, 2014).

Inicialmente obtido em laboratório, a produção de alumínio em escala industrial somente foi possível a partir de 1886, quando Charles Martin Hall e Louis Toussaint Hérould, obtiveram o metal puro a partir da dissolução eletrolítica de óxido de alumínio (alumina), em banho de criolita. Anos mais tarde a necessidade de fabricar produtos mais leves e resistentes impulsionou a indústria do alumínio durante a primeira guerra mundial, e desde então, tem ocupado uma posição mundial altamente estratégica, ao suprir praticamente todos os setores da economia. O Brasil conta com uma grande riqueza natural para a produção de energia hidrelétrica e, verdadeiramente, a energia a baixo custo é o único requisito indispensável para a sua produção (ABAL, 2004).

O alumínio possui algumas características que o tornam essenciais no mercado, dentre elas pode-se destacar: baixo peso, sua densidade é de aproximadamente  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , ainda possui excelente condutividade elétrica e térmica, tornando-o propício para o emprego em aquecedores, trocadores de calor e evaporadores, é resistente à corrosão atmosférica,

também à corrosão da água (inclusive salgada), tem ductilidade elevada e caracterizada pela estrutura CFC permitindo a conformação de certos componentes com altos valores de deformação, não é ferromagnético o que permite a aplicação em meios eletrônicos, e por fim não é tóxico, sendo amplamente utilizado em embalagens de alimentos (Pieske, 1988).

## **2.2 - Ligas de Alumínio**

Um dos aspectos que tornam as ligas de alumínio tão atraentes como materiais de construção mecânica é o fato de o alumínio poder combinar-se com a maioria dos metais de engenharia, chamados de elementos de liga, formando ligas e, a partir dessa combinação, ser possível obter características tecnológicas ajustadas de acordo com a aplicação do produto final. (ABAL, 2011).

O grande alcance das ligas oferece à indústria uma ampla variedade de combinações de resistência mecânica, resistência à corrosão e ao ataque de substâncias químicas, condutibilidade elétrica, usinabilidade, ductilidade e conformabilidade (ROSSI, 2004).

Descrever a função de cada elemento de liga é difícil porque esta se altera, não só com a quantidade dos elementos presentes na liga, mas também pela sua interação com outros elementos. Em geral, pode-se dividir os elementos entre aqueles que conferem à liga a sua característica principal (resistência mecânica, resistência à corrosão, fluidez no preenchimento de moldes etc.), os que têm função acessória, como controle de microestrutura e as impurezas e traços que prejudicam a fabricação ou a aplicação do produto, os quais devem ser controlados no seu teor máximo (ABAL, 2011).

De acordo com Freitas (2014) as ligas de alumínio dividem-se em dois grupos principais: as fundidas, e as trabalhadas mecanicamente, sendo estas por processos como forjamento, trefilação, extrusão e laminação. As ligas de alumínio ainda podem ser divididas entre as tratáveis e as não tratáveis termicamente.

Ainda que a resistência original possa ser aumentada agregando-se certos elementos, as propriedades mecânicas das ligas, com exceção de algumas para fundição, não dependem apenas de sua composição química. Semelhante a outros metais, o alumínio e suas ligas endurecem e aumentam a sua resistência quando trabalhados a frio. Além disso, algumas ligas de alumínio possuem a valiosa característica de responder ao tratamento térmico, adquirindo resistências maiores do que as que podem ser obtidas apenas através do trabalho a frio (ABAL, 2004).

### 2.3 - Ligas de Alumínio Tratáveis Termicamente

Segundo FREITAS (2014) os principais elementos de liga adicionados às ligas de alumínio são as combinações dos seguintes elementos:

- Cobre (Cu);
- Manganês (Mn);
- Silício (Si);
- Magnésio (Mg) e
- Zinco (Zn).

Segundo Philipson (2002), através de formação de solução sólida ou de precipitados de segunda fase. Nas ligas fundidas, alguns elementos de liga são adicionados principalmente para melhorar a reologia do processo de fundição.

De acordo com a ABAL (2004), as ligas tratáveis termicamente podem ser trabalhadas a frio, e posteriormente, sofrer tratamento térmico para o aumento da resistência mecânica. As ligas não tratáveis termicamente podem ser submetidas a outros tratamentos térmicos como o de estabilização e recozimentos plenos ou parciais.

No sistema proposto pela Aluminum Association (1984), as ligas de alumínio são identificadas por um número de quatro dígitos: o primeiro dígito identifica os principais elementos de liga e os três últimos, o grau de pureza e/ou composição química da liga, como pode ser observado na tabela 1.

TABELA 1 - Sistema de designação conforme a norma da ABNT NBR 6834

<b>SIGLA</b>	<b>COMPOSIÇÃO</b>
1xxx	Alumínio puro não ligado com no mínimo de 99% de Alumínio
2xxx	Ligas contendo cobre como elemento de liga principal
3xxx	Ligas contendo manganês como elemento principal
4xxx	Ligas contendo silício como elemento principal.
5xxx	Ligas contendo magnésio como elemento principal.
6xxx	Ligas contendo magnésio e silício como elementos principais.
7xxx	Ligas contendo zinco como elemento de liga principal.
8xxx	Ligas cujas composições apresentam diferentes elementos com Sn ou Li.
9xxx	Reservada para uso futuro.

Fonte: PIESKE (1988, p. 135).

Segundo Rossi (2004) após os quatro dígitos que identificam a liga de alumínio, existe uma letra separada por um hífen que identifica se a liga está nos seguintes estados:

- F – como fabricada: aplica-se aos produtos obtidos através de processos de conformação em que não se emprega qualquer controle especial sobre as condições térmicas ou de encruamento. Não se especificam limites para as propriedades mecânicas.
- O – recozida: aplica-se aos produtos acabados, no estado em que apresentam o menor valor de resistência mecânica.
- H – encruada: aplica-se aos produtos em que se aumentou a resistência mecânica por deformação plástica a frio e, que podem ou não, ser submetidos a um recozimento complementar para produzir amolecimento parcial ou a um processo de estabilização. É utilizado para as ligas não-tratáveis termicamente.
- W – solubilizado: aplica-se somente a algumas ligas, as quais envelhecem naturalmente à temperatura ambiente após o tratamento de solubilização. Esta classificação é especificada somente quando o período de envelhecimento natural, após o resfriamento brusco.
- T – Tratada termicamente: aplica-se aos produtos que sofrem tratamento térmico com ou sem deformação plástica complementar, que produz propriedades físicas estáveis e diferentes das obtidas com “F”, “O” e “H”. A letra “T” deve ser seguida por um ou mais dígitos que indicam a sequência dos processos básicos realizados: tratamentos térmicos ou deformações plásticas.

## **2.4 - Características e Utilização das Ligas de Alumínio Tratáveis Termicamente**

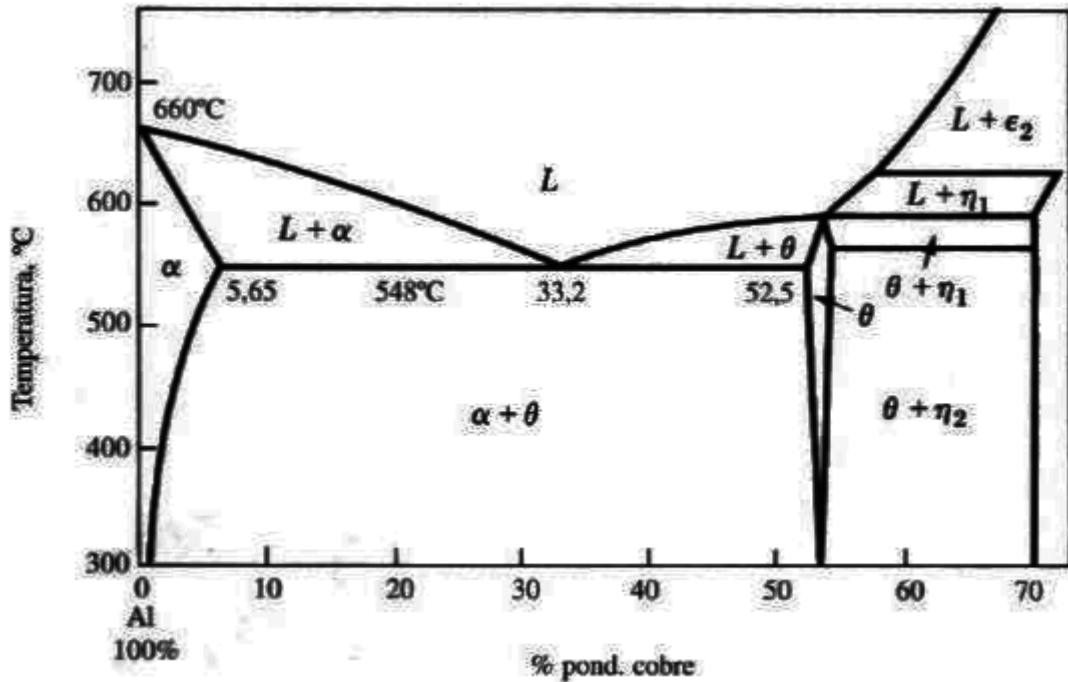
### **2.4.1 Liga Alumínio-Cobre**

O cobre é um elemento que promove o aumento da resistência mecânica da liga, formando precipitados endurecedores quando adicionado em porcentagens em torno de 5%, também confere alta resistência à corrosão às ligas Al-Mg e às ligas fundidas.

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. A Figura 1 mostra o diagrama de fases Alumínio-cobre com suas fases e composições:



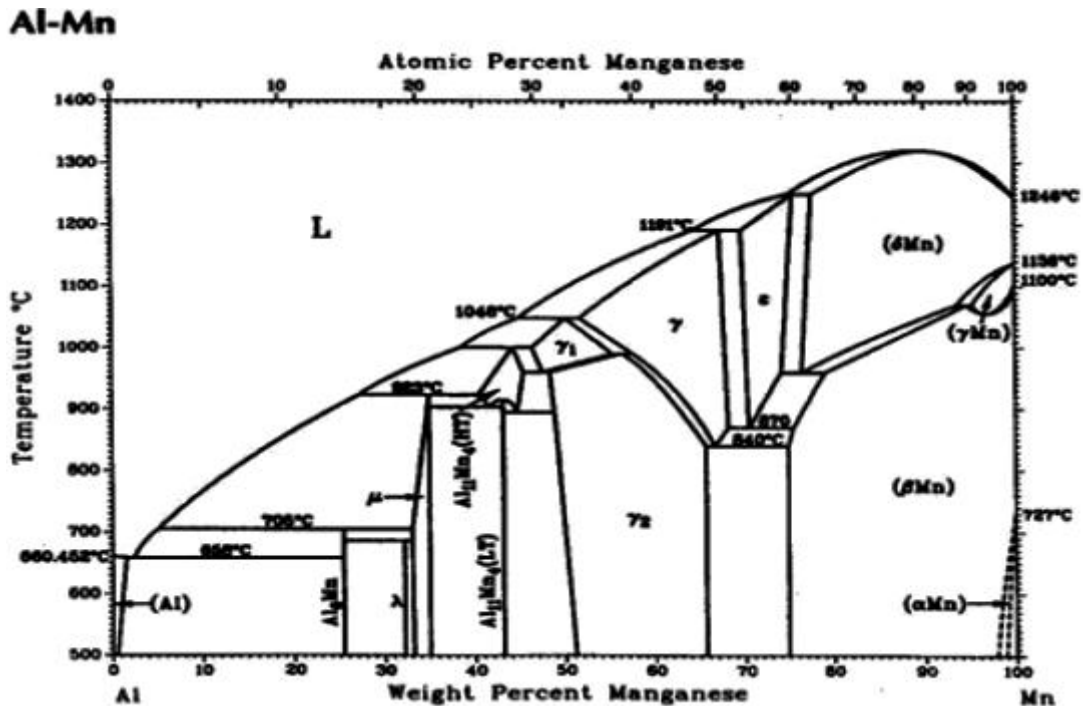
Fonte: ALUMINIUM Association (1984, p.62)

FIGURA 1 – Diagrama de fases alumínio-cobre

#### 2.4.2 - Liga Alumínio-Manganês

Quando se adiciona manganês ao alumínio, a resistência mecânica dessa liga aumenta em até 20% se comparada ao alumínio puro, adições de manganês na faixa de 1% a 2% contribuem para aumentar a resistência mecânica do alumínio comercial, garantindo boa formabilidade a frio, a família de ligas Al-Mn é bastante utilizada na laminação. Mesmo assim ela não perde a capacidade do alumínio de ser trabalhado por todos os processos de conformação e fabricação mecânicas, como a prensagem, a soldagem e a rebtagem (BRADASCHIA, 1988).

Segundo Rossi (2004), essa liga aceita acabamentos de superfície, é resistente à corrosão, tem elevada condutividade elétrica, contudo sua resistência mecânica é limitada. Por possuir estas características essa liga é usada nas mesmas aplicações que o alumínio puro, como, na fabricação de trocadores de calor, de latas de bebidas, placas de carros, telhas e equipamentos químicos etc. A Figura 2 apresenta o diagrama de fases da liga alumínio-manganês.



Fonte: Rossi (2004, p. 23)

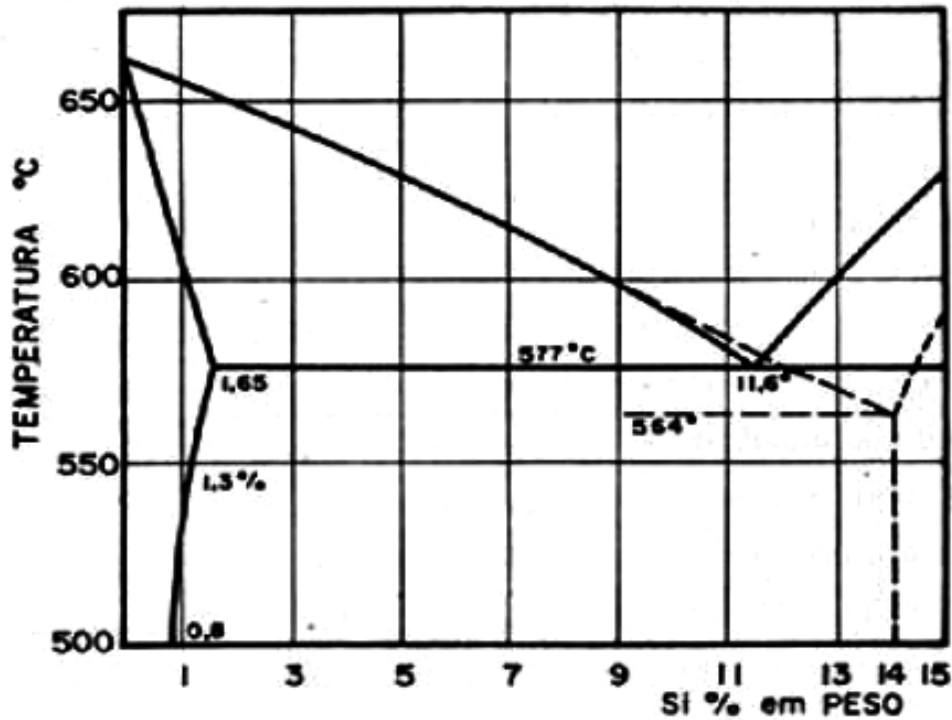
FIGURA 2 – Diagrama de fases da liga Alumínio-manganês

### 2.4.3 - Liga Alumínio-Silício

O silício é o elemento mais comum nas ligas de alumínio, presente no metal como consequência da fabricação do alumínio por bauxita, tem solubilidade baixa no alumínio, tendendo a se combinar principalmente com ferro manganês e magnésio (FREITAS, 2014).

Segundo Verran (2005), nas ligas de fundição, o silício é o principal elemento de liga utilizado, pois aumenta a capacidade do metal líquido de preencher detalhes e cavidades estreitas dos moldes, controla a contração na solidificação e o nível de porosidade nas peças vazadas e aumenta a resistência ao desgaste das peças fundidas.

As ligas constituídas por alumínio e silício possuem baixo ponto de fusão e boa resistência à corrosão. Quando a quantidade de silício aumenta (cerca de 12%), esta se torna adequada para se produzir peças fundidas, também é indicada como material para enchimento nos processos de soldagem e brasagem. A Figura 3 mostra o diagrama de fases da Liga alumínio-silício (PHILIPSON, 2002).



Fonte: Callister (2002, p. 42)

FIGURA 3 – Diagrama de fases da liga alumínio-silício

Freitas (2014) diz que ao ser combinado com o magnésio torna a liga tratável termicamente. Deve estar preferencialmente presente sob a forma de cristais arredondados e dispersos na liga de alumínio, a dureza das partículas de silício promove o aumento da resistência ao desgaste destas ligas. O sistema Al-Si, com solubilidade sólida limitada em ambas as extremidades, forma um eutético simples à temperatura de 580 °C para um teor de 12,5 % de silício. Entretanto, no caso das ligas Al-Si o teor de magnésio não poder ser muito elevado a ponto de dificultar a fundição, devido à formação da borra (oxidação excessiva do banho). Por outro lado, o magnésio melhora a resistência à corrosão e a usinabilidade.

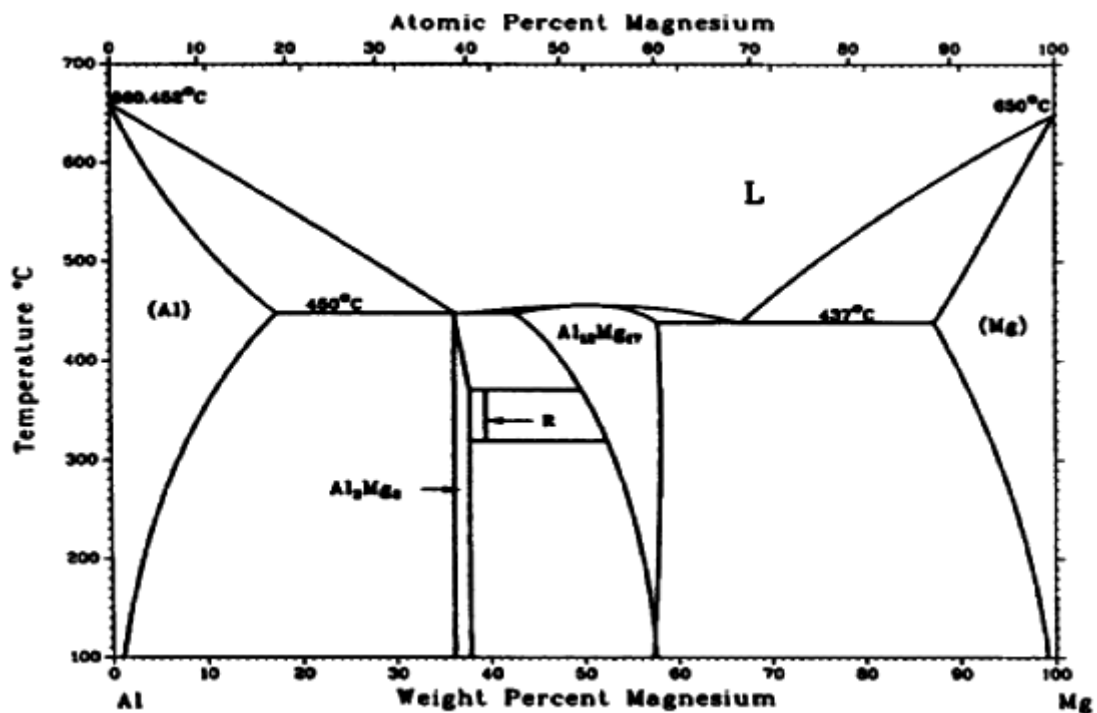
O cobre também pode ser adicionado às ligas do sistema Al-Si, sua principal vantagem, é aumentar a resistência mecânica da liga, tanto antes como após tratamento térmico, causando endurecimento mediante tratamento térmico de envelhecimento. Entretanto, ao contrário do silício, acarreta fragilidade a quente e menor fluidez, além de reduzir a resistência à corrosão. (VERRAN, 2005)

Segundo Rossi (2004) o manganês age como refinador de grão e permite reduzir a contração durante o resfriamento/solidificação, além de proporcionar melhoria na resistência à tração em alta temperatura. Entretanto, seu teor não pode ser elevado, já que nesse caso,

juntamente com o ferro, leva à formação de partículas grosseiras que causam perda de ductilidade.

#### 2.4.4 - Liga Alumínio-Magnésio

De acordo com Freitas (2014), ligas formadas por alumínio e magnésio são excelentes para a soldagem, além de também serem resistentes à corrosão, principalmente em áreas marinhas, por isso são muito utilizadas na fabricação de barcos, revestimento de tanques criogênicos e carrocerias para caminhões. A figura 4 mostra o diagrama de fases da liga alumínio-magnésio.



Fonte: Rossi (2004, p. 27)

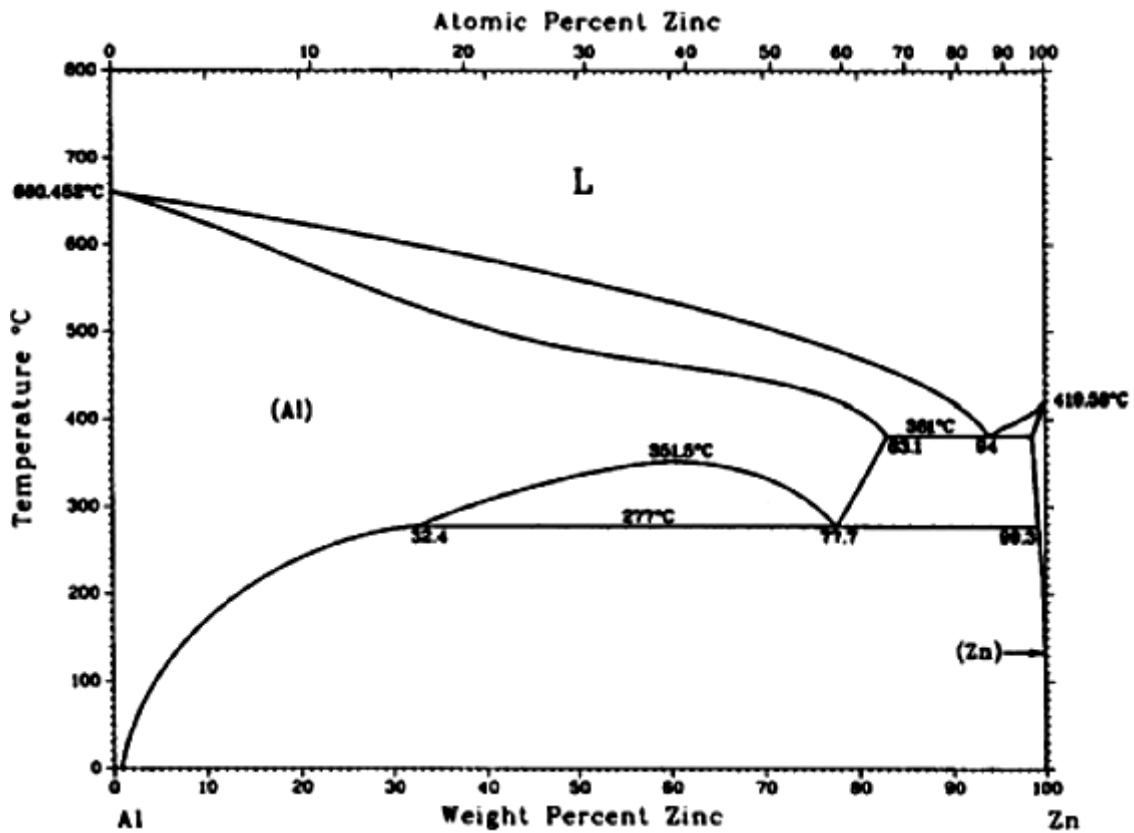
FIGURA 4 – Diagrama de fases da liga alumínio-magnésio

#### 2.4.5 - Liga Alumínio-Zinco

O zinco é um forte elemento endurecedor, o que confere às ligas desses grupos as mais altas resistências mecânicas dentre as ligas de alumínio comercial, esse grupo de liga, apresenta como principal restrição, a tendência de sofrer corrosão sob tensão, mais crítica ainda, devido à sua extensa utilização em componentes aeronáuticos, o que torna necessária a

adoção de processos de fabricação e procedimentos de controle de qualidade diferenciados para os produtos fabricados com elas (PHILIPSON, 2002).

Ainda existem as ligas de alumínio produzidas com a adição de zinco, juntamente com uma pequena quantidade de magnésio, cobre ou cromo. Após passar pelo tratamento térmico, essas ligas são utilizadas em aplicações que exijam alta relação resistência/peso, principalmente no setor aeronáutico e na construção de aviões. A Figura 5 apresenta o diagrama de fases da liga alumínio-zinco (ABAL, 2014).

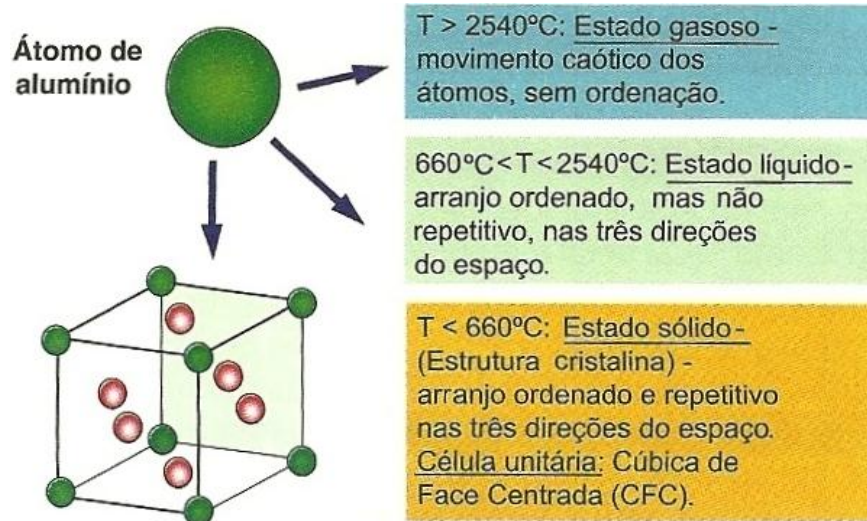


Fonte: Callister (2002, p. 47)

FIGURA 5 - Diagrama de fases da liga alumínio-zinco

## 2.5 - Estrutura do alumínio

Conforme mostra a ABAL (2011), o comportamento dos materiais nos diversos estados físicos é determinado pela maneira com que os átomos estão ligados entre si, como mostra a Figura 6.



Fonte: ABAL ed. (2011. p. 54)

FIGURA 6 – Alumínio – Estrutura cristalina

Segundo a ABAL (2011), o alumínio em temperatura acima de  $2540^{\circ}\text{C}$  está no estado gasoso, havendo um movimento caótico dos átomos, não sendo possível deduzir, a partir da posição de um átomo, qual será a posição de seus vizinhos. No estado líquido, existe o que se chama de ordenação de curta distância, ou seja, existem agrupamentos de átomos com arranjo definido, mas não se pode deduzir, a partir desse agrupamento, qual é a disposição e a orientação relativa dos agrupamentos da sua vizinhança.

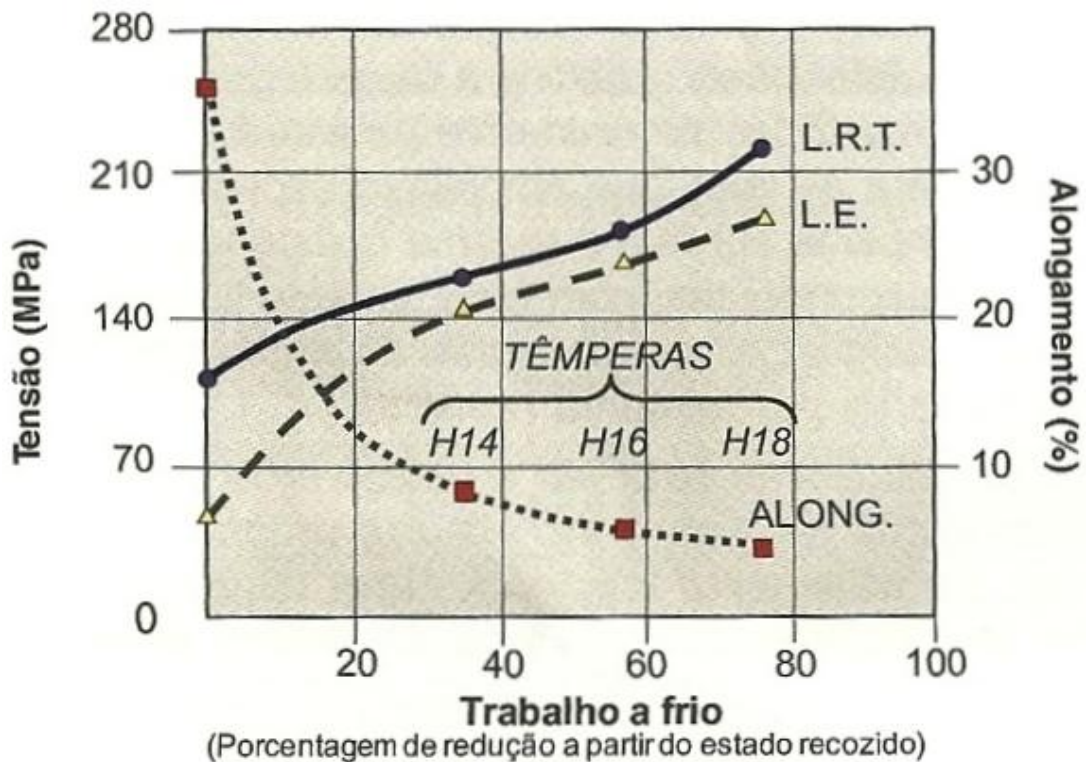
Abaixo de  $660^{\circ}\text{C}$ , o alumínio estará no estado sólido, caracterizado por um arranjo atômico compacto e organizado, em que os átomos se agrupam segundo uma disposição determinada (célula unitária) que se repete indefinidamente nas três direções do espaço, formando um cristal e num cristal perfeito, tornando-se qualquer átomo como referência, os átomos na sua vizinhança sempre estarão nas mesmas posições em relações a ele (ABAL, 2011).

## 2.6 - Tratamentos Térmicos Aplicados nas Ligas de Alumínio

### 2.6.1 - Têmperas

De acordo com Freitas (2014), a têmpera é uma condição aplicada ao metal ou liga, através de deformação plástica a frio ou de tratamento térmico, propiciando-lhe estrutura e propriedades mecânicas características.

Ainda que a resistência original possa ser aumentada agregando-se certos elementos, as propriedades mecânicas das ligas, com exceção de algumas ligas para fundição, não dependem apenas da sua composição química. Semelhante a outros metais, o alumínio e suas ligas endurecem e aumentam sua resistência quando trabalhadas a frio, como por exemplo, uma chapa laminada a frio. Além disso, algumas ligas de alumínio possuem a valiosa característica de responder ao tratamento térmico, adquirindo resistências maiores do que as que podem ser obtidas apenas através do trabalho a frio. A Figura 7 ilustra o efeito do trabalho a frio nas propriedades mecânicas da liga (Rossi, 2004).



Fonte: ABAL ed. (2011. P. 77).

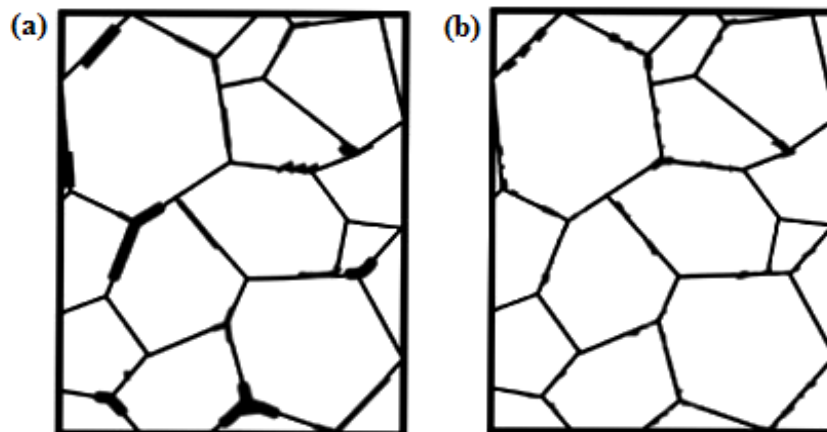
FIGURA 7 – Efeito do trabalho a frio nas propriedades mecânicas da

Segundo Verran (2005), as ligas de alumínio podem dividir-se convenientemente em dois grupos: as ligas tratáveis termicamente, proporcionando-lhes maior resistência, e as ligas não tratáveis termicamente, cuja resistência só pode ser aumentada através do trabalho a frio e posteriormente, sofrer o tratamento térmico para o aumento da resistência mecânica, as ligas não tratáveis termicamente podem ser submetidas a tratamentos térmicos como de estabilização e recozimento plenos ou parciais.

### 2.6.2 - Homogeneização

Philipson (2002) diz que esse tratamento térmico é realizado em temperaturas em torno de 500 °C dependendo da liga, e seu objetivo é diminuir as segregações e criar estruturas mais estáveis e controlar algumas características da indústria metalúrgica, como, as suas propriedades mecânicas, estampabilidade, tamanho de grão, e ainda proporcionando o aumento da ductilidade e melhoria da estabilidade dimensional.

O tempo e a temperatura aplicados dependem da taxa de difusão e da estrutura original da peça, ao utilizar temperaturas mais elevadas no processo, consegue-se uma homogeneização mais rápida, porém, o material ficará mais exposto a efeitos nocivos como a corrosão (ROSSI, 2004). A Figura 8 (a) (b) mostra a diferença da estrutura da liga antes e depois da homogeneização.



Fonte: ABAL, ed. (2011 pg. 62)

FIGURA 8 (a) (b) – Comparação da estrutura da liga antes e após a homogeneização

A figura (a) representa a estrutura antes da homogeneização e a figura (b) após a solubilização.

### 2.6.3- Recozimento

Este processo é aplicado geralmente em ligas trabalhadas a frio e tem como objetivo recuperar estrutura encruada provenientes dos trabalhos de conformação realizados a temperaturas menores que as de recristalização da liga.



Segundo Verran (2005), o tratamento pode ser compreendido entre recozimento pleno e recozimento parcial, sendo que é no recozimento pleno, onde se obtém as condições máximas de plasticidade (tempera 0), que é o equivalente a recristalização total do material. O processo consiste em aquecer o metal que foi deformado a frio, geralmente na casa dos 350 °C, que é o suficiente para possibilitar o seu arranjo em uma nova configuração cristalina que não foi deformada. Esse processo de recristalização serve para remover os efeitos do trabalho a frio e deixar o metal em uma condição dúctil. Deve atentar para não deixar ocorrer superaquecimentos, que geram coalescência e o crescimento exagerado dos grãos.

O recozimento parcial é realizado com temperaturas mais baixas, entre 200 °C a 280 °C, variando de acordo com a porcentagem de redução conferida na laminação a frio. Sua principal função é proporcionar uma recristalização parcial do material, promovendo assim, a obtenção de têmperas com alongamentos maiores. Este procedimento favorece a estampagem, oferecendo ao produto final uma maior resistência mecânica (ROSSI, 2004).

De acordo com Freitas (2014), o recozimento leva a uma diminuição das propriedades mecânicas, resultado este que depende do estado inicial da microestrutura e da composição da liga. Assim a mesma liga, com diferentes graus de deformação, poderá apresentar propriedades radicalmente diferentes para um mesmo tratamento.

#### **2.6.4 - Alívio de tensões**

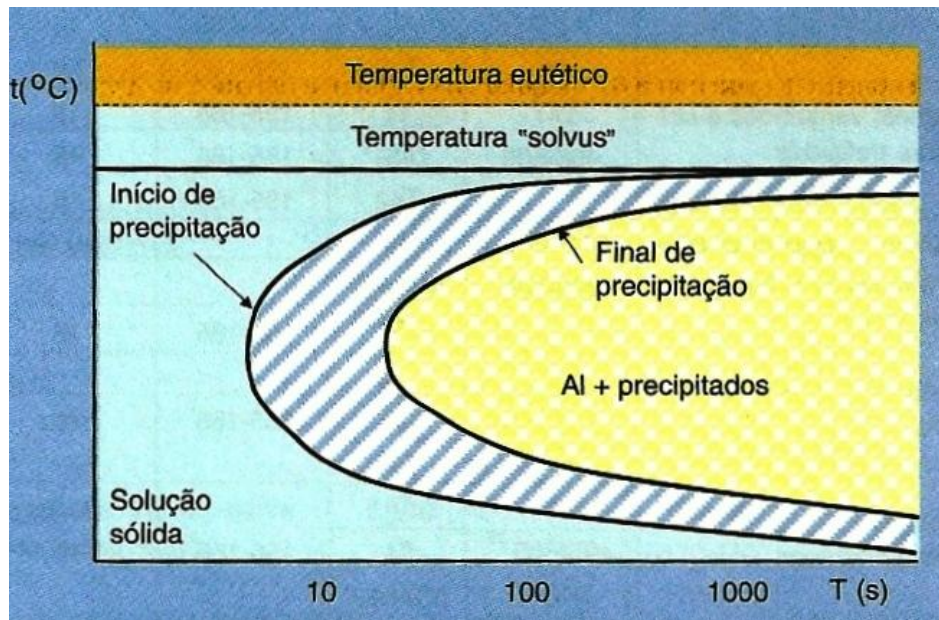
Segundo Freitas (2014), o alívio de tensões é realizado para remover as tensões internas tanto do alumínio puro, do fundido ou de peças que foram realizadas soldas, todavia, sem recristalizar totalmente a liga. A temperatura deve ser de no máximo 340 °C e o tempo é determinado a partir da espessura ou diâmetro da peça, sendo 1 min/mm no mínimo.

Devido às características de transferência de calor do processo de solidificação, ocorrem fortes gradientes térmicos dentro do tarugo ou da placa vazada. Desses gradientes resultam tensões residuais intensas, que em ligas com composição química mais carregada, como as da série 7xxx, podem até fazer com que o produto vazado se rompa durante o seu resfriamento (ROSSI, 2004).

Freitas (2014) recomenda que, neste caso, a homogeneização seja feita, o mais rápido possível, após o vazamento da peça, para que o aquecimento promova uma redistribuição das tensões residuais e a dissolução de constituintes frágeis precipitados nos contornos de grão.

### 2.6.5 - Solubilização

De acordo com Philipson (2002), o tratamento de solubilização baseia-se no aquecimento da liga a uma temperatura suficiente alta para que ocorra a dissolução dos precipitados endurecedores. 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, observados na Figura 9.



Fonte: ABAL ed. (2011, p. 97)

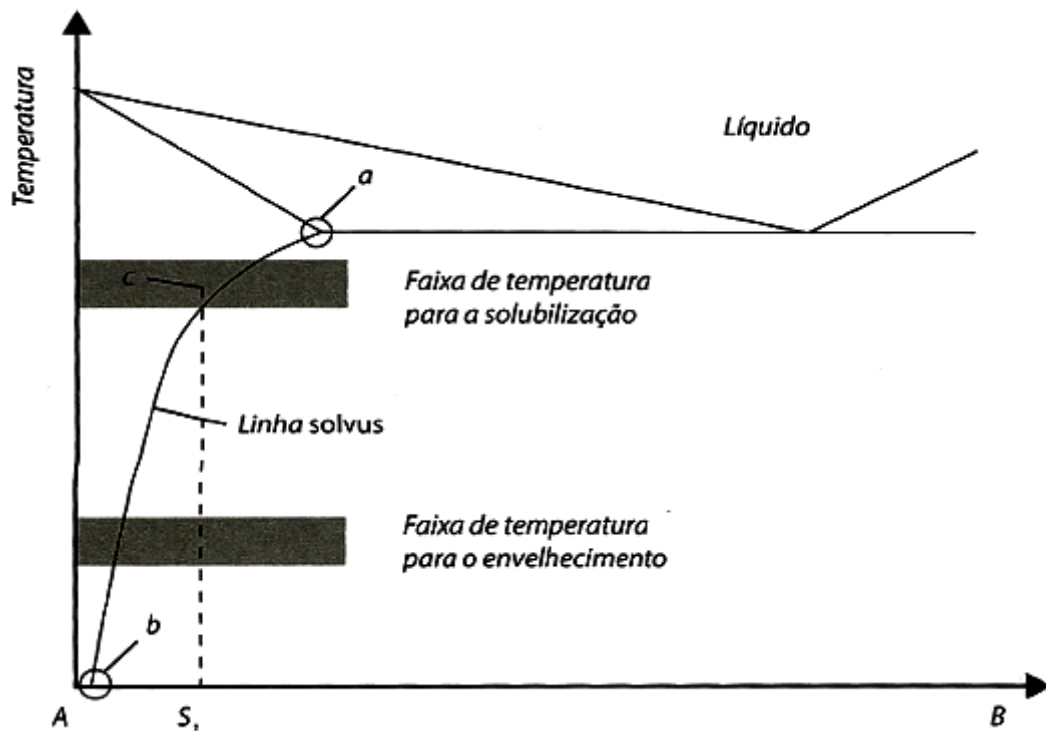
FIGURA 9 – Diagrama temperatura x tempo x transformação

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. As práticas de solubilização são estabelecidas com base nessas duas temperaturas limites, considerando-se, também, a cinética das reações de dissolução de precipitados, leis de transferência de calor e as características dos fornos para a determinação dos tempos de tratamento (ABAL, 2011).

Neste tratamento o alumínio é solubilizado em temperaturas em torno de 500 °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 *liquidus* da liga. A Figura 10 mostra esquematicamente o diagrama de uma liga que pode ser solubilizada.



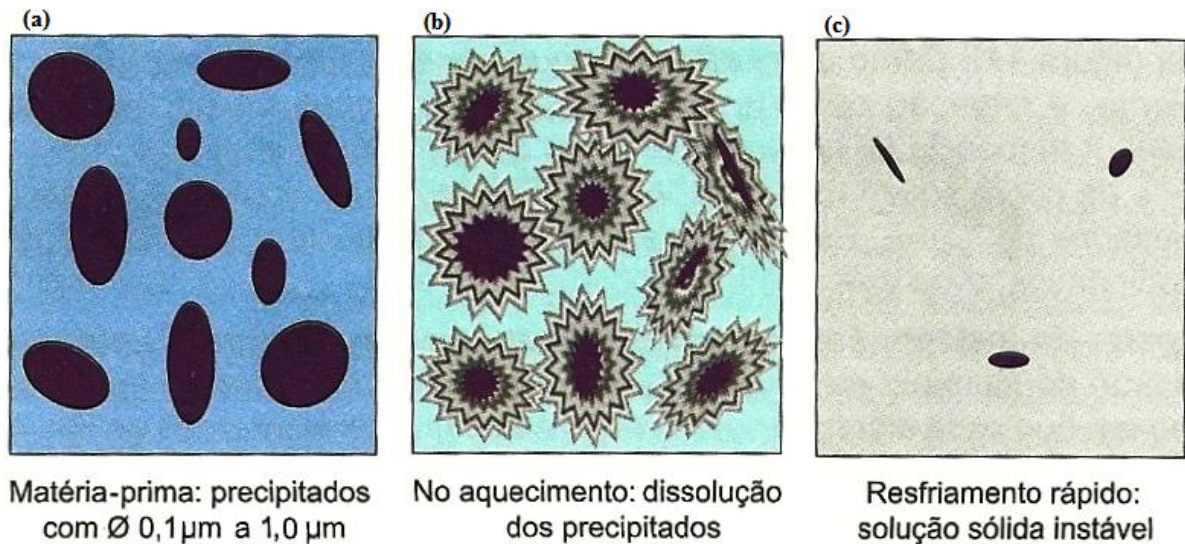
Fonte: Freitas (2014, p.122)

FIGURA 10 – Diagrama de uma liga que pode ser solubilizada

Segundo Philipson (2002), a partir do instante em que os elementos de liga ocupam as posições do reticulado do alumínio na solução sólida supersaturada, haverá um período de tempo em que essa situação se manterá, antes que os elementos de liga comecem a ser rejeitados, com base na cinética de movimentação dos átomos, em temperaturas baixas. Em geral, esse período de incubação dura de algumas horas a alguns dias, dependendo da quantidade e do tipo do elemento de liga dissolvido.

Rossi (2004) diz que o período de incubação pode ser prolongado mantendo-se as peças em baixa temperatura, após a solubilização (-20°C a -15°C), esse expediente é bastante utilizado na indústria aeronáutica, na conformação de peças fabricadas em ligas de alta resistência após solubilização, pois isso permite que um lote grande de material seja tratado de

uma só vez e depois conformado à medida que for necessário, sem interferir na produtividade da operação, a Figura 11 (a) (b) (c) mostra o processo de resfriamento da solubilização.



Fonte: ABAL ed. (2011. p. 64)

FIGURA 11 (a) (b) (c) – Solubilização

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).

Segundo Freitas (2014), 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.

### 2.6.6 - Envelhecimento

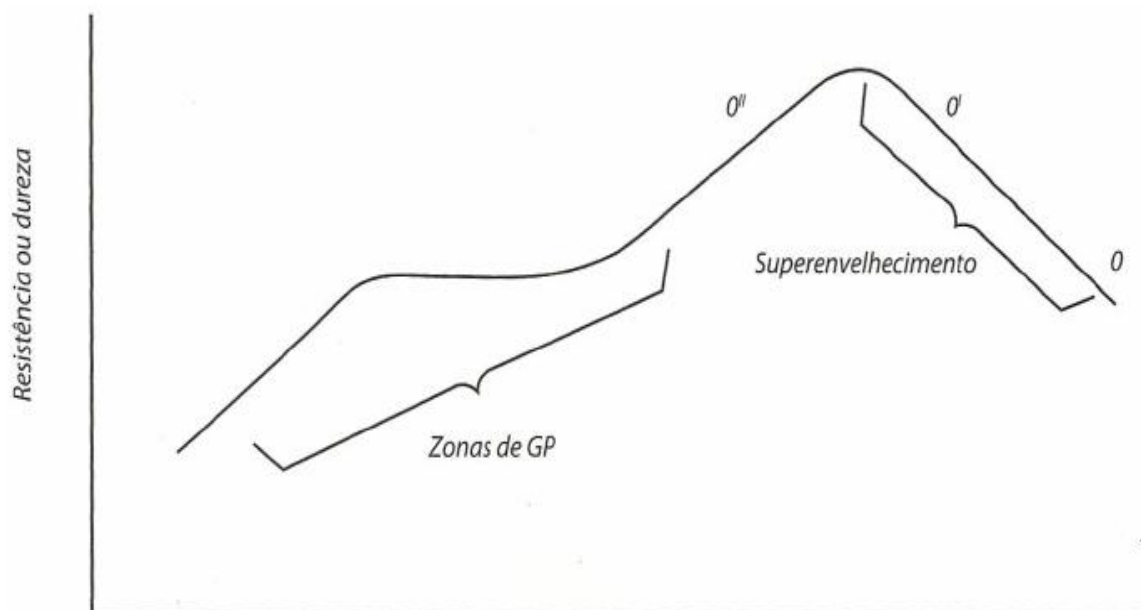
Verran (2005) diz que este tratamento tem como objetivo proporcionar a precipitação de constituintes dissolvidos na matriz de solução sólida durante o tratamento de solubilização na forma de partículas muito pequenas, que proporciona o aumento da dureza do material. Os requisitos principais para que ocorra o endurecimento são:

- o precipitado formado deve ser coerente com a matriz;

- a liga não deve trincar durante a operação de resfriamento na solubilização;
- solubilidade sólida decrescente de uma fase com a queda de temperatura;
- ter uma matriz dúctil.

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 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 contornem mais facilmente e a dureza diminua. A Figura 12 mostra esse mecanismo.



Fonte: Freitas (2014, p. 124)

FIGURA 12 - Influência do tempo de envelhecimento sobre a dureza

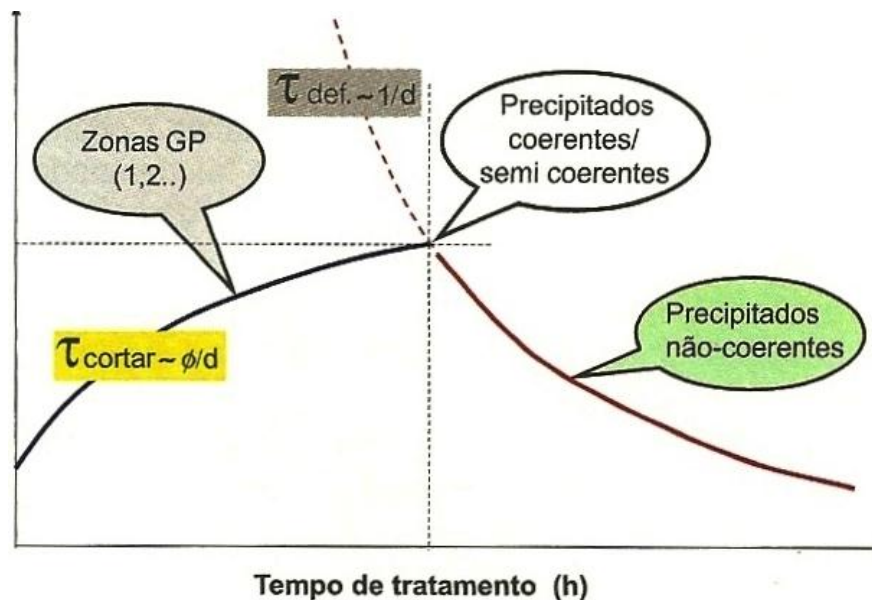


Segundo Rossi (2004), o endurecimento por envelhecimento ocorre porque existe interação entre os campos de tensão associados às discordâncias e aos precipitados (assim como existe uma atração magnética entre um ímã e uma peça de aço). De uma forma ou de outra existe uma “neutralização” dos efeitos dos 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.

De acordo com Freitas (2014), a partir da associação desses dois processos durante o tratamento do material, chega-se à configuração simplificada da curva de envelhecimento que se conhece na figura 13 a seguir.



Fonte: ABAL ed. (2011. p. 64)

FIGURA 13 – Evolução da forma dos precipitados x tempo (curva de envelhecimento)

De acordo com Bradaschia (1988), do início do tratamento até o pico de dureza, o mecanismo predominante é o de “corte de precipitados”. Como o número de precipitados por unidade de volume aumenta e eles estão muito próximos, a tensão para “curvar” as

discordâncias é mais alta do que para “cortá-las”; com o aumento da fração de precipitados ocorrerá um endurecimento progressivo, até que a maior parte dos elementos de liga esteja combinada na forma de precipitados.

Freitas (2014) diz que no pico de dureza em diante ocorre a formação de precipitados não coerentes em função da dissolução dos coerentes. Nesse ponto passa a predominar o mecanismo em que as discordâncias passam a se “curvar” entre dois precipitados e passar por eles, com a formação de um anel de discordância ao redor dos precipitados. Esse mecanismo passa a ser predominante e, como nesse estágio do tratamento a distância entre precipitados aumenta progressivamente, ocorre o amolecimento do material, causado pelo sobre-envelhecimento.

## **2.7 - Determinação da Dureza**

De acordo com a ABAL (2011), a dureza de um metal é definida como medida da sua resistência à penetração de um equipamento específico, existem várias maneiras de se determinar a dureza, sendo as mais comuns a Brinell, a Vickers e a Rockwell.

Todos os ensaios de dureza são empíricos, ainda que existam tabelas indicativas da relação entre as várias escalas de dureza, a equivalência de valores deve ser usada com reserva. Mais importante ainda é o fato de que não existe relação direta entre o valor de dureza e as propriedades mecânicas das várias ligas de alumínio (ABAL, 2011).

Os elementos de liga aumentam em muito a resistência do alumínio, assim como o tratamento térmico e o endurecimento pelo trabalho a frio, porém a dureza é significamente mais baixa do que a maioria dos aços (FREITAS, 2014).

### **2.7.1 - Dureza Rockwell**

Para a realização do ensaio de dureza Rockwell, são usados vários tipos de penetradores e cargas diferentes, e são utilizadas determinadas escalas para fazer a medição, sendo cada uma delas associadas a uma combinação de carga e penetrador específico, estas escalas são necessárias para atender a todos os tipos de metais, tornando possível dar o alcance de dureza de todos eles, entre os penetradores utilizados nesta medição, pode-se incluir as esferas de aço com diâmetros de 1,58 mm a 12,7 mm, também um diamante esfero-cônico, e cargas variando entre 15 kg a 150 kg (ABAL, 2011).

O número ou índice de dureza Rockwell é obtido diretamente da leitura da escala da máquina, que mede a profundidade da impressão no corpo de prova testado. A figura 14 mostra o equipamento utilizado para medir as durezas:



Fonte: Próprio autor

FIGURA 14 – Fotografia do equipamento utilizado para medir as durezas vista diagonal

## 2.8 - Fornos para tratamento térmico

A ABAL (2011) diz que as temperaturas utilizadas no tratamento térmico das ligas de alumínio são mais baixas que as utilizadas na siderurgia. Isso facilita a fabricação dos fornos e seu isolamento térmico, porém impõem condições mais restritas de controle de tratamento e segurança contra sobre-temperatura, porque nos tratamentos em temperaturas mais altas como solubilização ou homogeneização, estas podem colocar em risco as propriedades obtidas no produto final ou mesmo a integridade estrutural do material.



De acordo com Freitas (2014), como as temperaturas de tratamento estão próximas do ponto de fusão das ligas, existe o risco de dano ao material mesmo com pequena sobre-temperatura, e por isso, o controle de aquecimento deve ser bastante preciso.

Se o controle do tratamento for feito com base na correlação com os instrumentos do forno, deve-se certificar que o tempo de aquecimento é suficiente para que o núcleo da placa ou tarugo tenha atingido as condições recomendadas de tempo e temperatura sem excessos, o que implicaria em gasto desnecessário de energia e no risco de crescimento descontrolado dos grãos do material.

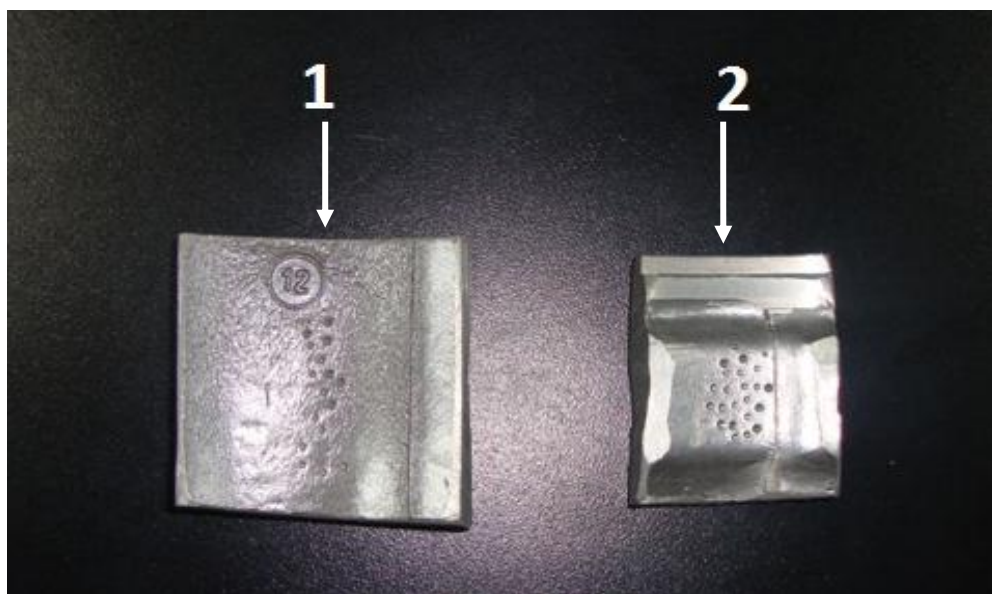
### 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Para a análise do comportamento das ligas de alumínio em função dos tratamentos térmicos, foram utilizadas duas amostras diferentes de liga de alumínio contendo como elemento principal o silício, designada pela *aluminum association* como uma liga da série 400.

As peças utilizadas como corpo de prova foram obtidas através de cortes em pistões de motor de combustão interna. Após o corte, foram feitas medidas de durezas em seu estado original, antes dos tratamentos térmicos. Foram feitas três medidas de dureza na escala Rockwell, e retirada à média aritmética destas medidas.

A seguir, os tratamentos térmicos foram realizados em um forno elétrico. Depois dos tratamentos térmicos, aferiu-se novamente a dureza em três pontos diferentes da peça e, em seguida, foi feita uma média dos resultados. O aparelho utilizado foi um durômetro do tipo Rockwell, modelo 200HR-150. As peças usadas para os tratamentos podem ser observadas na Figura 15.

Os números representam cada amostra, 1 indica a liga com 12,1% de silício e 2 a liga com 16,4138% de silício.



Fonte: Próprio Autor

FIGURA 15 – Fotografia das peças utilizadas para tratamento térmico vista superior

A composição da amostra “1” é apresentada na tabela 2.

TABELA 2 – Composição da amostra “1”

<b>Elementos</b>	<b>Concentração (%)</b>
Silício (Si)	12,10
Ferro (Fe)	0,459
Cobre (Cu)	1,25
Manganês (Mn)	0,0116
Magnésio (Mg)	1,18
Alumínio	83,80
Outras	1,211

Fonte: LAMAT (laboratório de Ensaios e Análises em materiais).

A composição da amostra “2” é apresentada na tabela 3.

TABELA 3 – Composição da amostra “2”

<b>Elementos</b>	<b>Concentração (%)</b>
Silício (Si)	16,4138
Ferro (Fe)	0,456
Cobre (Cu)	1,2406
Manganês (Mn)	0,0176
Magnésio (Mg)	1,0240
Alumínio	79,7133
Outras	1,1347

Fonte: LAMAT (laboratório de Ensaios e Análises em materiais).

### 3.1 - Tratamentos Térmicos Realizados

Foram realizados três tipos de tratamentos térmicos nessas amostras. O primeiro tratamento realizado foi a solubilização, que tem por finalidade solubilizar os elementos presentes na liga, permitindo a formação de uma solução sólida com elementos que são responsáveis pelo endurecimento. O segundo tratamento foi a têmpera (resfriamento rápido em água), que visa aprisionar a estrutura obtida na solubilização. O terceiro tratamento realizado foi o de envelhecimento, que consiste na precipitação controlada do soluto, formando precipitados finos na liga e impedindo o movimento das discordâncias durante a deformação.

Após preparar as amostras, deu-se início aos tratamentos térmicos, onde o forno foi estabilizado na temperatura desejada, e só depois foram introduzidas as amostras, tendo a contagem do tempo de tratamento a partir do momento em que se fechou a porta do forno. A Figura 16 mostra o forno utilizado.



Fonte: Próprio Autor

FIGURA 16 - Forno utilizado para a realização dos tratamentos térmicos vista frontal

As temperaturas utilizadas para a solubilização e os tempos do tratamento são apresentados na Tabela 4.

TABELA 4 – Temperatura e tempo utilizado na solubilização

<b>Amostra</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tempo (h)</b>
1	490	3
2	490	3

Fonte: Próprio Autor.

Após o período de solubilização das amostras, indicados na tabela 4, estas foram temperadas imediatamente em água.

Em seguida, iniciou-se o tratamento de envelhecimento, com a temperatura e tempo expressos na Tabela 5.

TABELA 5 - Temperatura e tempo utilizado no Envelhecimento

<b>Amostra</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tempo (h)</b>
1	180	3
2	180	3

Fonte: Próprio Autor.

#### 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando os resultados dos tratamentos térmicos, pode-se notar que a dureza nas peças tratadas termicamente da liga alumínio-silício sofreram resultados diferentes, enquanto a solubilização causou a diminuição da dureza das ligas, como esperado, o envelhecimento proporcionou o aumento da dureza das mesmas, conforme a tabela 6 abaixo.

TABELA 6 – Durezas médias antes e após os tratamentos térmicos

<b>Tratamento térmico</b>	<b>Amostra “1”</b>	<b>Amostra “2”</b>
Sem tratamento	52,0 HR	53 HR
Solubilizado e temperado	25,7 HR	27,2 HR
Envelhecido	83,2 HR	104,2 HR

Fonte: Próprio Autor.

Conforme esperado, houve uma queda da dureza obtida no processo de solubilização. Esse resultado foi devido à dissolução dos elementos que normalmente elevam a dureza da liga. Observou-se também que no caso do tratamento de solubilização, não houve diferença significativa nos resultados obtidos de dureza entre a liga de 12,1% e a liga de 16,41 % de silício, contudo essa liga apresenta boa ductilidade, o que pode ser observado pelos baixos valores de dureza obtidos.

O ótimo aumento da dureza proporcionado pelo envelhecimento se deve, provavelmente, ao fato de que nesse processo, não é necessária a presença de grandes quantidades de elementos de liga em sua composição, necessitando de pequenas quantidades de magnésio para ocorrer o aumento da dureza, formado por átomos de magnésio e silício precipitados finamente dispersos na matriz que impedem a movimentação durante a deformação, forçando as discordâncias a cortar as partículas ou rodeá-las, restringindo o movimento das discordâncias e, conseqüentemente, aumentando a resistência mecânica, tendo resultados ainda melhores na liga que continha maior quantidade de silício.

## 5 - CONCLUSÃO

Ao analisar os resultados obtidos, pode-se concluir que os tratamentos térmicos aplicados nas ligas de alumínio testados tiveram dois resultados diferentes, o tratamento de solubilização fez com que a dureza da liga diminuísse praticamente pela metade, causado principalmente pela dissolução dos precipitados que normalmente são os agentes causadores da dureza da liga. Essa liga depois de solubilizada apresenta boa ductilidade e pode ser utilizada para outros fins comerciais como em processos de conformação e usinagem, onde a dureza não seja a característica essencial.

Já no tratamento de envelhecimento, obteve-se um incremento na dureza na ordem de 60% para a amostra 1, liga que continha como elemento principal 12,1% de silício, e foram obtidos resultados ainda melhores na amostra 2, que continha em sua composição 16,41% de silício, aumentando em 96,60% a dureza dessa liga, sendo esta recomendada para casos em que a dureza e a resistência mecânica do material sejam as características almeçadas.

Como é praticamente impossível obter bons resultados em todas as características proporcionadas pelas ligas de alumínio, pode-se afirmar que os tratamentos realizados neste trabalho foram bem dimensionados para cada tipo de aplicação recomendada.

Como trabalho futuro, uma vez que não foram possíveis de realizar no decorrer deste trabalho, deverão ser efetuados ensaios de tração para os diferentes tratamentos, para que se possa obter o restante das informações acerca dos efeitos dos tratamentos térmicos aplicados nas propriedades desta liga. Também seria importante a realização de micrografias para ver as estruturas formadas após cada tratamento térmico.

Outro ponto que é de interesse está no estudo dos envelhecimentos utilizando diferentes níveis de temperatura, onde possa ser possível um melhor compromisso de resistência à tração/ductilidade, sem a necessidade de tempos longos no tratamento e grandes gastos energéticos.

Tratamentos térmicos em ligas de alumínio é um processo fundamental para a indústria em geral, tornando possível o desenvolvimento de materiais específicos para cada tipo de aplicação desejada, são muito eficientes desde que seus elementos sejam bem combinados e os tratamentos sejam realizados de maneira adequada.

## 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL – Associação Brasileira do Alumínio. **Guias Técnicos de Extrusão, Laminação, Tratamento Térmico**. 1ª edição, cursos, seminários e palestras técnicas. São Paulo, 2004.

ABAL – Associação Brasileira do Alumínio. **Guia técnico do alumínio: tratamento térmico do alumínio e suas ligas**. vol. 6. 2ª Ed. São Paulo, 2011.

ABAL, Associação Brasileira do Alumínio, disponível em > <http://www.abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/temperas/> > acesso em 18 de novembro de 2014

ALUMINIUM Association. Aluminium: Properties and Physical Metallurgy. Ohio: American Society for metals, 1984.

BRADASCHIA, Clóvis. **Fundições de Ligas Não-Ferrosas**. In: CURSO ABM, 1988, São Paulo. Técnicas de fundição do Alumínio e suas ligas, São Paulo: ABM, 1988.

CALLISTER Jr., William D. **Ciência e engenharia de Materiais: uma introdução**: Rio de Janeiro LTC, 2002.

FREITAS, Paulo Sergio de; Tratamento térmico dos metais: da teoria à prática / Paulo Sergio de Freitas. – São Paulo: SENAI-SP Editora, 2014.

PHILIPSON, Fernando R., Oliveira, Glauro G., 2º Seminário técnico de tratamento Térmico do Alumínio e suas Ligas – ABAL/SENAI, Osasco, 2002.

PIESKE, Adolar, et al. Fundições de Ligas não-ferrosas. In: curso ABM, 1988, São Paulo. **Tratamentos Térmicos de peças Fundidas**, São Paulo: ABM, 1988.

ROSSI, Vilmar Luiz. **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.



VERRAN, G. O.; MORAES, A. C.; VERRI, A. A. **Influência da composição química na resistência à corrosão em ligas de alumínio de fundição.** In: XV Seminário de Iniciação Científica da UDESC, 2005, Joinville. Anais do XV Seminário de Iniciação Científica da UDESC. Joinville: UDESC, 2005. v.1.

OLIVEIRA, G. R. G. de. **Tratamento térmico de uma liga Al-Si-Mg-Mn.** Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – FEUP, Porto, 2012.