



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-  
ÁRIDO  
DEPARTAMENTO CENTRO DAS ENGENHARIAS  
ENGENHARIA MECANICA**

**NICHOLAS HENRIQUE TORRES GAMA ALVES E SILVA**

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E ANÁLISE DE DUREZA DA LIGA  
DE ALUMÍNIO AA 7XXX**

**MOSSORÓ-RN**

**2017**

**NICHOLAS HENRIQUE TORRES GAMA ALVES E SILVA**

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E ANÁLISE DE DUREZA DA LIGA  
DE ALUMÍNIO AA 7XXX**

Projeto apresentado ao Conselho do Curso de engenharia mecânica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, como requisito parcial para elaboração do projeto de Conclusão de Curso.

MOSSORÓ-RN

2017

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S586c Silva, Nicholas Henrique Torres Gama Alves e.  
CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E ANÁLISE DE  
DUREZA DA LIGA DE ALUMÍNIO AA 7XXX / Nicholas  
Henrique Torres Gama Alves e Silva. - 2017.  
29 f. : il.

Orientador: Manoel Quirino da Silva Junior.  
Monografia (graduação) - Universidade Federal  
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia  
Mecânica, 2017.

1. Alumínio. 2. Tratamento térmico. 3.  
Envelhecimento. 4. Dureza. I. Junior, Manoel  
Quirino da Silva , orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

NICHOLAS HENRIQUE TORRES GAMA ALVES E SILVA

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E ANÁLISE DE DUREZA DA LIGA  
DE ALUMÍNIO AA 7XXX

Monografia apresentada ao Centro de  
engenharias para obtenção do título de  
engenheiro mecânico.

Data da Defesa: 22 / 05 / 2017

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Manoel Quirino da Silva Junior

Orientador / Presidente da Banca Examinadora



Prof. Dr. Francisco Evaristo Uchôa Reis  
Membro da Banca Examinadora



Prof. Dr. Ramsés Otto Cunha Lima

Membro da Banca Examinadora

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a meu bom Deus, por ser minha base de sustentação em todos os momentos. Por ter me dado forças para passar por todas as barreiras, pois sem Ele não iria conseguir chegar onde estou, sou grato por tudo que Ele fez em minha vida.

A minha família, principalmente meus pais, Francisco Torres e Francisca Liduina, que me deram todo o apoio necessário, por toda a paciência e incentivo, aos meus irmãos Lucas e Livia que apesar de tudo gosto bastante dos dois, a minha querida avó “Bibia” que eu amo demais, a minha tia “Teita” que me deu abrigo e por vontade de Deus não está mais aqui presente, mas sou grato demais por tudo que fez por mim.

A todos os amigos que ganhei ao longo da vida, desde os do tempo de escola, aos da rua e os da faculdade, a Paulinha, Daniel Sid, Gustavo Hayala, Danilo e todos os outros que não coloquei o nome, amigos esses que ao longo dos anos se tornaram verdadeiros irmãos para mim, que pude compartilhar momentos de alegria e tristeza, também a Ruthleia que esteve comigo nos últimos tempos me dando apoio e incentivo que é uma pessoa muito especial para mim.

A cada pessoa que no passar desses 5 anos contribuiu de alguma forma para que eu tenha vindo a conseguir realizar este sonho.

A toda UFERSA e seus professores que ajudaram na minha formação e crescimento, em especial a meu orientador Manoel Quirino da Silva Junior por me ajudar em mais essa etapa da minha vida.

“Tudo posso naquele que me fortalece”.

Filipenses 4:13

## RESUMO

Este trabalho foi realizado com o intuito de promover uma análise química e microestrutural de uma liga alumínio utilizada na caixa de redução do protótipo do projeto de extensão da UFERSA Cactus BAJA. Esse tipo de aplicação requer ligas voltadas para indústria automobilísticas, que normalmente são especificadas pela família AA7XXX. Ligas que apresentam após o tratamento térmico por precipitação um apreciável aumento de dureza, assim como de resistência mecânica, aliado a isso o material ainda apresenta uma grande leveza por ainda ser uma liga de baixo peso. Nesse intuito o projeto Cactus BAJA recebe esse material certificado, porém com poucas informações, de composição química e propriedades mecânicas, para a fabricação desse produto, e o trabalho tem como principal objetivo a especificação desse material. Caracterização será feita por Microscopia Óptica, Espectroscopia De Fluorescência de Raios X, Ensaio de Dureza. Após realizado todos os ensaios, será especificada as propriedades do material, de modo a garantir uma maior segurança quanto a sua utilização. Foi realizado a especificação do material estudado como sendo a liga de alumínio 7178. O tratamento de envelhecimento que apresentou um maior aumento de dureza foi o realizado com um tempo de 6 horas, onde foi obtido uma dureza de  $89 \pm 0,83$  HRB.

**Palavras – chave:** Alumínio, tratamento térmico, envelhecimento, dureza.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Antes e depois do tratamento de homogeneização, respectivamente. ....                                                                                                                                                                                                | 18 |
| Figura 2– Gráfico da temperatura em função do tempo, do tratamento térmico de solubilização e precipitação. ....                                                                                                                                                                | 19 |
| Figura 3– Granulagem em função do encruamento e da recristalização.....                                                                                                                                                                                                         | 20 |
| Figura 4– Esquema do tratamento térmico de endurecimento por precipitação .....                                                                                                                                                                                                 | 24 |
| Figura 5– Microscopia óptica da liga de alumínio com aumento de 50X em diferentes condições de tratamento. A) Como de fábrica B) Envelhecida por 1 hora e meia C) Envelhecida por 3 horas D) Envelhecida por 6 horas E) Envelhecida por 12 horas F) Envelhecida por 24 horas... | 26 |
| Figura 6– Microscopia óptica da liga de alumínio com aumento de 500X, envelhecida por 6 horas .....                                                                                                                                                                             | 27 |
| Figura 7 – Resultados de dureza em função do tempo de tratamento .....                                                                                                                                                                                                          | 27 |

## SUMÁRIO

|       |                                                                                        |    |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.    | INTRODUÇÃO .....                                                                       | 10 |
| 2.    | OBJETIVOS DO TRABALHO .....                                                            | 11 |
| 2.1   | OBJETIVO GERAL .....                                                                   | 11 |
| 2.2   | OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....                                                             | 11 |
| 3.    | REVISÃO LITERÁRIA .....                                                                | 12 |
| 3.1   | ALUMÍNIO.....                                                                          | 12 |
| 3.2   | LIGAS DE ALUMÍNIO .....                                                                | 13 |
| 3.2.1 | Ligas de alumínio forjadas.....                                                        | 13 |
| 3.2.2 | Ligas de alumínio fundição.....                                                        | 15 |
| 3.3   | TRATAMENTOS TÉRMICOS DE LIGAS DE ALUMÍNIO .....                                        | 18 |
| 3.3.1 | Homogeneização.....                                                                    | 18 |
| 3.3.2 | Solubilização e endurecimento por precipitação.....                                    | 18 |
| 3.3.3 | Recozimento pleno.....                                                                 | 20 |
| 3.3.4 | Recozimento parcial.....                                                               | 20 |
| 3.3.5 | Estabilização .....                                                                    | 20 |
| 3.4   | CLASSIFICAÇÃO DA CONDIÇÃO METALÚRGICA DAS LIGAS DE ALUMÍNIO .....                      | 21 |
| 3.4.1 | Classificação da condição metalúrgica “H” .....                                        | 21 |
| 3.4.2 | Classificação da condição metalúrgica “T” .....                                        | 22 |
| 4.    | MATERIAIS E MÉTODOS .....                                                              | 23 |
| 4.1   | ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (EFRX).....                                 | 23 |
| 4.2   | ESPECIFICAÇÃO DO MATERIAL.....                                                         | 23 |
| 4.3   | TRATAMENTO TÉRMICO DE SOLUBILIZAÇÃO E ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO ..                | 23 |
| 4.4   | MICROSCOPIA ÓPTICA .....                                                               | 24 |
| 4.5   | MEDIÇÃO DA VARIAÇÃO DE DUREZA.....                                                     | 24 |
| 5.    | RESULTADOS E DISCUSSÕES.....                                                           | 25 |
| 5.1   | ANÁLISE DE ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X E ESPECIFICAÇÃO DO MATERIAL..... | 25 |
| 5.2   | ANÁLISE MICROESTRUTURAL POR MICROSCOPIA ÓPTICA.....                                    | 26 |
| 5.3   | ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE DUREZA.....                                                     | 27 |
| 6.    | CONCLUSÃO .....                                                                        | 29 |
|       | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                                       | 30 |

## 1. INTRODUÇÃO

O alumínio é um dos metais mais consumidos no mundo, sendo o mais importante dos não ferrosos. Isso se dá a sua grande variedade de aplicações, que vão desde utensílios domésticos a peças automobilísticas. Uma outra grande vantagem do alumínio é a possibilidade de combinação de propriedades mecânicas diversas, por meio de suas ligas. O alumínio é capaz de adquirir as mais diversas propriedades, abrangendo ainda mais seu uso. (ABAL, 2007)

Por apresentar um baixo peso específico, combinado com resistência mecânica adquirida em algumas ligas, seu uso tem sido de grande importância na indústria automobilística. No protótipo do projeto de extensão Cactus BAJA é feito o uso de uma liga de alumínio em sua caixa de redução, de maneira que reduz o peso do componente, em comparação se fosse fabricado por outro metal, sem perder suas propriedades mecânicas.

A descoberta de novas ligas de alumínio difundiu bastante suas aplicações, elevando a importância desse metal para indústria moderna, e abrindo um leque cada vez maior de aplicações.

## **2. OBJETIVOS DO TRABALHO**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Caracterização química e microestrutural da liga de alumínio AA 7XXX

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Realizar análise química por Espectroscopia de Fluorescência de Raios X (EFRX);
2. Especificar o material, através de sua composição química;
3. Analisar a microestrutura da liga por Microscopia Óptica como entregue e após tratamento térmico de endurecimento por precipitação;
4. Realizar medição e analisar a variação da dureza da liga com e sem tratamento térmico de envelhecimento por precipitação.

### 3. REVISÃO LITERÁRIA

#### 3.1 ALUMÍNIO

O alumínio é o segundo elemento metálico mais farto na terra, tornou-se um competidor econômico em engenharia no final do século XIX. Quando a redução da eletrolíticas de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dissolvida em criolite fundida foi desenvolvida independentemente por Charles Hall, em Ohio e Paul Heroult, na França, apareceram os primeiros veículos movidos a motores de combustão interna, e o alumínio exerceria um importante papel como um material automotriz de grande valor. (ROOY, 1990)

O crescimento da indústria do alumínio não se ateve apenas a esta aplicação, as aplicações comerciais de alumínio eram de diversos artigos novos, tais como, frames do espelho, número de casa, bandejas de serviços, utensílios de cozinha. Com o tempo o alumínio cresceu em várias aplicações, à medida em que direta ou indiretamente todos os aspectos da vida moderna eram afetados pela sua utilização. (ROOY, 1990)

O alumínio segue o ferro entre os metais mais consumidos no mundo, sendo o de maior importância dos não ferrosos. A grande variedade de uso do alumínio está relacionada com as suas propriedades físico-químicas, com destaque no seu baixo peso específico ( $2,70\text{g/cm}^3$ , em comparação com outros metais), resistência à corrosão e alta condutibilidade térmica/elétrica. (ABAL, 2007)

Outras características importantes do alumínio é que não são ferromagnéticos, propriedade importante para indústria eletrônica e elétrica. É não inflamável, não tóxico possibilitando seu uso em recipientes de bebidas e alimentos, apresenta uma boa aparência visual. (ROOY, 1990)

Um outro grande diferencial do alumínio é sua grande variedade de composições e propriedades mecânicas, obtidas a partir da modificação de sua composição química inserindo impurezas. O principal objetivo das ligas de alumínio é aumentar a resistência mecânica, sem diminuição de outras propriedades, de modo que novas ligas tem sido desenvolvidas, cada uma com uma combinação de propriedades para cada aplicação específica. (ABAL, 2007)

Em geral, as ligas de alumínio podem ser classificadas em dois grupos, como fundidas e forjadas. As composições para ambos os tipos são designadas por um

número de quatro dígitos, o qual indica quais as principais impurezas presentes e, em alguns casos, o nível de pureza. (Callister, 2000)

### 3.2 LIGAS DE ALUMÍNIO

É conveniente dividir as ligas de alumínio em duas categorias principais: as composições forjadas e as composições fundidas, a diferenciação posterior de cada categoria é baseada em mecanismos primários de desenvolvimento de propriedades. Muitas ligas respondem a tratamentos térmicos baseados na solubilidade da fase. Entre esses tratamentos estão tratamentos térmicos por solubilização, tempera, precipitação, envelhecimento e endurecimento. (ROOY, 1990)

Foram desenvolvidas nomenclaturas para as ligas fundidas e as forjadas, o sistema desenvolvido pela “*Aluminum Association*” e pela ASTM (*American Society for Testing Materials*), é um dos sistemas mais aceitos. É aplicado um sistema de nomenclatura diferente para as ligas forjadas e as fundidas.

#### 3.2.1 Ligas de alumínio forjadas

Segundo ROOY, 1990, para as ligas forjadas um sistema de quatro dígitos é usado para produzir uma lista de famílias de composição como segue:

- 1xxx Composição puras controladas (mínimo 99,00% de alumínio em peso).
- 2xxx Ligas em que o cobre é o principal elemento de liga, embora possa conter outros elementos tais como magnésio.
- 3xxx Ligas onde o manganês é o principal elemento de liga.
- 4xxx Ligas onde o silício é o principal elemento de liga.
- 5xxx Ligas onde o magnésio é o principal elemento de liga.
- 6xxx Ligas onde o magnésio e o silício são o principal elemento de liga.
- 7xxx Ligas onde o zinco é o principal elemento de liga, embora outros elementos de liga podem ser adicionados como cobre, magnésio, cromo e zircônio.
- 8xxx Ligas incluindo estanho e algumas composições de lítio caracterizando composições diversas.
- 9xxx Reservada para o futuro.

Segundo o ASM HANDBOOK, o primeiro dígito indica o grupo de ligas, o segundo dígito indica modificações nas ligas originais ou limites de impurezas, e os dois últimos dígitos identificam a liga de alumínio ou indicam a pureza do alumínio. No grupo 1xxx os dois últimos dígitos da designação indicam os centésimos da porcentagem mínima de alumínio. Já nos grupos 2xxx e 8xxx, os dois últimos dígitos da designação são arbitrários, servindo somente para indicar as diferentes ligas do grupo.

#### 3.2.1.1 Propriedades e aplicações

1xxx Série: Alumínio com 99,00% ou mais de pureza tem várias aplicações, principalmente em campo. Esta série de alumínio é caracterizada por apresentar excelente resistência à corrosão, alta condutividade, propriedades mecânicas baixas e excelente trabalhabilidade. Os usos mais comuns incluem equipamentos químicos, refletores, permutadores, condutores elétricos e capacitares, folha de embalagem, aplicações arquitetônicas e acabamentos decorativos. (ROOY, 1990)

2xxx Série: Estas ligas necessitam de tratamento térmico em solução para obter boas propriedades, na condição de solução tratada termicamente, as propriedades mecânicas são semelhantes, as do aço de baixo carbono. Algumas vezes o tratamento térmico por precipitação (envelhecimento) é empregado para aumentar ainda mais as propriedades mecânicas. Esta liga não apresenta boa resistência a corrosão que a maioria das outras ligas. Esta série de ligas são mais recomendadas para peças e estruturas que requerem elevada resistência ao peso. São frequentemente usadas para fazer rodas de caminhão e aeronaves, partes de suspensão de caminhão, fuselagem de aeronaves, e peças estruturais. (ROOY, 1990)

3xxx Série: Estas ligas na maioria das vezes não são tratáveis termicamente mas tem cerca de 20% mais resistência que as ligas da série 1xxx. Uma vez que uma porcentagem limitada de manganês (até cerca de 1,5%) pode ser adicionado eficientemente ao alumínio. Três ligas dessa série são amplamente utilizadas – 3003, 3x04 e 3105 – para aplicações de resistência moderada que requerem boa trabalhabilidade. Estas aplicações incluem latas de bebidas, trocadores de calor, móveis, tanques de armazenamento, sinais rodoviários, coberturas, utensílios de cozinha. (ROOY, 1990)

4xxx Série: O principal elemento de liga é o silício, que pode ser adicionado em quantidades suficientes (até 12%) para causar redução substancial da faixa de fusão sem produzir fragilidade. (ROOY, 1990)

5xxx Série: Esta série tem como seu principal elemento de liga o magnésio. O magnésio é considerado mais eficiente do que o manganês como endurecedor, e pode ser adicionado em quantidades bem maiores. Ligas da série 5xxx, possuem boas propriedades de soldagem e considerável resistência à corrosão em atmosferas marinhas. Suas aplicações são diversas, que incluem, barcos, navios, peças de guindastes, latas, tanques criogênicos. (ROOY, 1990)

6xxx Série: Esta série de ligas apresentam o silício e o magnésio como elementos principais de liga, o que torna a liga termicamente tratável. Apresenta boa formabilidade, soldabilidade, usinabilidade e resistência à corrosão. Suas aplicações incluem quadros de bicicleta, equipamentos de transporte, grades de ponte, e estruturas soldadas. (ROOY, 1990)

7xxx Série: O zinco é o principal elemento de liga dessa série, com quantidades que variam de 1 a 8%, quando juntado a uma menor porcentagem de magnésio, resulta em ligas tratáveis termicamente, com resistência de moderada a muito alta. Esta série de liga é comumente utilizada em estruturas, equipamentos móveis e outras peças altamente estressadas. (ROOY, 1990)

8xxx Série: São ligas que apresentam composições diversas. São tratáveis termicamente e apresentam alta resistência mecânica específica. Pode ser aplicada na indústria aeroespacial e criogenia. (ROOY, 1990)

9xxx Série: Outras ligas que não foram especificadas anteriormente. (ROOY, 1990)

### **3.2.2 Ligas de alumínio fundição**

A nomenclatura das ligas de alumínio para fundição, assim como as ligas forjadas, é composta por um conjunto específico de quatro dígitos. O diferencial das ligas fundidas é a presença de um ponto decimal entre o terceiro e quarto dígito. [Newell, 2010]

Segundo o ASM HANDBOOK, o primeiro dígito indica o grupo de ligas de alumínio, o segundo e terceiro dígito indicam a liga ou a pureza do alumínio, e o último dígito que está separado por um ponto, indica a forma do produto, da seguinte forma:

- xxx.0 – Peças fundidas;

- xxx.1 – Lingotes;
- xxx.2 – Lingotes.

As famílias das ligas de alumínio para fundição, são as seguintes:

- 1xx.x – Composições puras de alumínio, no mínimo 99,00% de pureza.
- 2xx.x – Ligas onde o cobre é apresentado como elemento principal de liga.
- 3xx.x – Ligas em que o silício é o principal elemento de liga, podendo conter outros elementos como cobre e magnésio.
- 4xx.x – Ligas onde o silício é o principal elemento de liga.
- 5xx.x – Ligas que apresentam o magnésio como elemento de liga principal.
- 6xx.x – Série não utilizada.
- 7xx.x – Ligas onde o zinco é o principal elemento de liga.
- 8xx.x – Ligas onde o estanho é o principal elemento de liga.

Diferentemente dos materiais tratáveis, as ligas de alumínio de fundição adquirem suas propriedades na condição fundida (em alguns casos realizam tratamentos térmicos). As ligas empregadas geralmente na engenharia normalmente contêm silício em sua composição para melhorar suas propriedades, tais como, fluidez, quando for vazada, e resistência a trincas de contração, quando o material se resfria e se contrai. Na Tabela 1 a seguir é apresentado as principais ligas de alumínio de fundição, suas propriedades mecânicas e aplicações. (ABAL, 2007)

Tabela 1 - Principais ligas de alumínio utilizadas em fundição, características e aplicações.  
(ABAL, 2007)

| Ligas | Características                                                                                                                                                              | Aplicações                                                                                                         |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 150.0 | Alumínio comercialmente puro com grande resistência à corrosão e boa condutividade térmica, não tratável termicamente.<br>Fundição em molde permanente, areia e sob pressão. | Acessórios usados nas indústrias química e de alimentos, condutores elétricos, rotores e equipamentos industriais. |
| 242.0 | Ótimas propriedades mecânicas em temperaturas altas e ótima usinabilidade. Baixa resistência à corrosão.<br>Fundição em molde permanente e areia.                            | Pistões e cabeçotes para aviões, motores a diesel e de motocicletas.                                               |
| 295.0 | Resistência mediana, usinabilidade boa e baixa resistência à corrosão.<br>Fundição em molde de areia.                                                                        | Elementos estruturais de máquinas, equipamentos e aviações, cárter, rodas de ônibus e de aviões.                   |
| 319.0 | Moderada resistência mecânica e boas propriedades de fundição e usinagem.<br>Fundição em molde permanente e de areia.                                                        | Uso geral, além de revestimentos e caixas de equipamentos elétricos.                                               |
| 355.0 | Resistência mecânica média, ótima fluidez, usinabilidade boa após                                                                                                            | Peças complexas ou sob tensão, cabeçote de cilindros, corpo de válvulas,                                           |

|        |                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                           |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|        | tratamento térmico, boa estanqueidade sob pressão.<br>Fundição em molde permanente e areia.                                                                                                                                                                            | camisa de água, união para mangueiras e acessórios para indústria de máquinas e na construção civil.                                                      |
| C355.0 | Parecida com a liga 355.0, mas apresenta uma maior resistência mecânica, ótima características de alimentação (bom na fundição de peças espessas).<br>Fundição em molde permanente e areia.                                                                            | Peças estruturais sob tensão, componentes de aviação e de mísseis, acessórios de máquinas e equipamentos.                                                 |
| 356.0  | Resistência mecânica moderada, ótima fluidez e estanqueidade sob pressão, boa resistência à corrosão e usinabilidade.<br>Fundição em molde permanente e areia.                                                                                                         | Peças fundidas com seções finas, cilindros, válvulas, blocos de motores, cabeçotes, ferramentas pneumáticas.                                              |
| 357.0  | Alta resistência mecânica, ótima fluidez e resistência à corrosão.<br>Fundição em molde permanente e areia.                                                                                                                                                            | Peças sob tensão que demandam relação de peso com elevadas propriedades mecânicas e de resistência à corrosão, como, componentes de aviação e de mísseis. |
| 360.0  | Ótima estanqueidade sob pressão e resistência à corrosão e boa usinabilidade.<br>Fundição sob pressão.                                                                                                                                                                 | Recipientes e componentes de iluminação, utensílios domésticos e peças externas de motores.                                                               |
| 380.0  | Bom acabamento superficial, ótima usinabilidade, pode ser anodizada.<br>Fundição sob pressão.                                                                                                                                                                          | Peças em geral de utensílios domésticos.                                                                                                                  |
| A380.0 | Alta resistência mecânica tanto em locais de altas temperaturas como em de temperaturas ambiente, ótima fluidez, boa estanqueidade sob pressão, usinabilidade e resistência à corrosão.<br>Fundição sob pressão.                                                       | Peças em geral de utensílios domésticos, indústria elétrica e automotiva.                                                                                 |
| 413.0  | Ótima estanqueidade sob pressão e resistência à corrosão, baixa usinabilidade.<br>Fundição sob pressão.                                                                                                                                                                | Caixas de medidores de energia elétrica, peças externas de motores, peças fundidas de seção fina que necessitam de boa resistência à corrosão.            |
| 443.0  | Resistência mecânica baixa, ótima fluidez, excelente estanqueidade sob pressão e resistência à corrosão.<br>Fundição em molde permanente, areia e sob pressão.                                                                                                         | Peças fundidas de seção fina, utensílios domésticos, moldes para artefatos de borracha.                                                                   |
| 518.0  | Excelente usinabilidade e resistência à corrosão, alta ductilidade, baixa fluidez, ótimas propriedades de acabamento superficial.<br>Fundição sob pressão.                                                                                                             | Aplicações marítimas, acessórios ornamentais de máquinas e equipamentos.                                                                                  |
| 520.0  | Excelente resistência mecânica, inclusive sob carga de impacto, boas condições de anodização e de polimento baixa fluidez, ótima usinabilidade e resistência à corrosão, mas é susceptível à corrosão sob tensão em temperaturas acima de 120°C.<br>Fundição em areia. | Peças submetidas a elevadas tensões na engenharia aeronáutica, marítima e de transpote.                                                                   |
| 712.0  | Boas propriedades mecânicas, envelhece naturalmente e se retempera após soldagem, excelente usinabilidade e boa resistência à corrosão.<br>Fundição em areia.                                                                                                          | Peças fundidas para conjuntos de brasagem.                                                                                                                |

### 3.3 TRATAMENTOS TÉRMICOS DE LIGAS DE ALUMÍNIO

Os tratamentos têm como objetivo remover ou reduzir as segregações, desenvolver estruturas estáveis e controlar características metalúrgicas, como, tamanho do grão, propriedades mecânicas, etc. As ligas de são classificadas como “tratáveis termicamente”, que responde a tratamento térmicos, e “não-tratáveis termicamente”, em que suas propriedades são melhoradas em decorrência de trabalho a frio. Os principais tratamentos térmicos são: (ABAL, 2007)

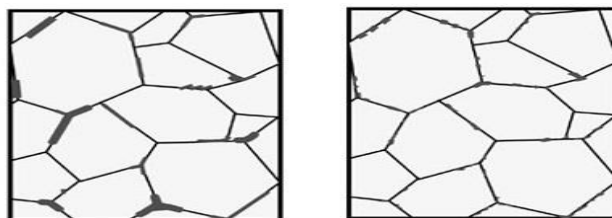
- Homogeneização
- Solubilização / envelhecimento
- Recozimento pleno
- Recozimento parcial
- Estabilização

#### 3.3.1 Homogeneização

É realizado a temperaturas em torno de 500°C, dependendo da liga de alumínio tratada, tem por função remover ou reduzir segregações, para produzir estruturas mais estáveis e controlar suas propriedades. Em caso de laminação a quente esse tratamento é realizado respectivamente ao aquecimento das placas. (ABAL, 2007)

A Figura 1 seguinte mostra o efeito da homogeneização na microestrutura de uma liga de alumínio com precipitação de fase nos contornos de grão.

Figura 1 - Antes e depois do tratamento de homogeneização, respectivamente.



Fonte: ABAL, 2007

#### 3.3.2 Solubilização e endurecimento por precipitação

As ligas de alumínio tratadas apresentam maior resistência mecânica, mas com uma redução da sua ductilidade. Inicialmente o tratamento de solubilização consiste

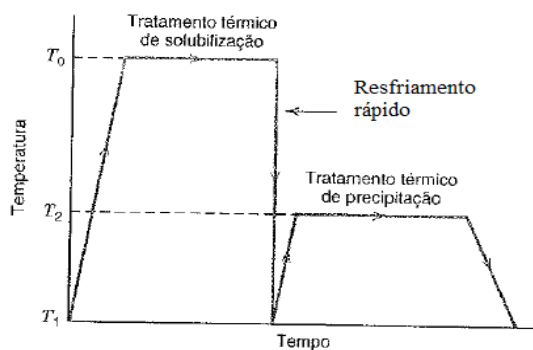
em aquecer o material à temperatura adequada, que varia de acordo com a liga, durante tempo suficiente para a dissolução de um ou mais constituintes, em seguida realiza-se um resfriamento rápido, normalmente em água, para mantê-los em solução. (SILVA, 2010)

Posteriormente a solução sólida supersaturada é normalmente aquecida até uma temperatura intermediária, cujo as taxas de difusão tornam-se consideráveis. A fase precipitada começa a ser formada em partículas finamente dispersas, no processo conhecido como “envelhecimento”. Após o tempo de envelhecimento, a liga é resfriada até a temperatura ambiente. (Callister, 2000)

Este processo de envelhecimento pode se dar de duas maneiras, envelhecimento natural e artificial. No envelhecimento artificial à formação espontânea de uma estrutura na zona G-P durante um certo tempo à temperatura ambiente, não necessitando o reaquecimento do material. Já o envelhecimento artificial consiste em reaquecer o material a uma temperatura acima da temperatura ambiente, mantendo a está temperatura por um determinado tempo, de modo a produzir a formação de precipitados. Com o aumento do tempo, a dureza do material se eleva até o seu valor máximo, e posteriormente começa a decrescer. Esta redução da dureza após um longo tratamento de envelhecimento é denominada de superenvelhecimento. (ROOY, 1990)

A Figura 2 mostra como se dá a sequência do tratamento térmico de envelhecimento.

Figura 2– Gráfico da temperatura em função do tempo, do tratamento térmico de solubilização e precipitação.



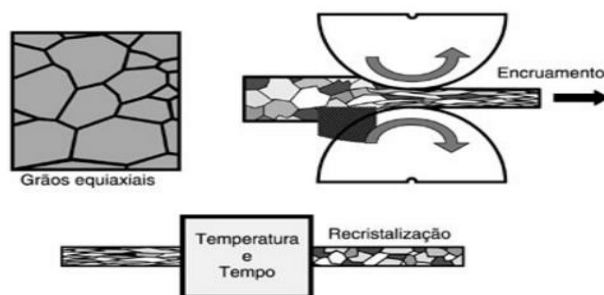
Fonte: Callister, 2000

### 3.3.3 Recozimento pleno

Neste tratamento consegue-se as condições de plasticidade máxima do metal, correspondendo a uma recristalização total. O tratamento consiste em aquecer o metal a uma temperatura, normalmente na faixa de 350°C, suficiente para permitir o rearranjo numa nova configuração cristalina deformada. Este processo remove efeitos do trabalho a frio deixando o metal mais dúctil. O recozimento bem-sucedido é caracterizado pela recristalização primária. É aconselhável evitar o superaquecimento, já que causa o crescimento de grão exagerado e coalescências, chamado de recristalização secundária. (ABAL, 2007)

Na Figura 3 é possível ver a granulagem do material em função do encruamento e da recristalização.

Figura 3– Granulagem em função do encruamento e da recristalização



Fonte: ABAL, 2007

### 3.3.4 Recozimento parcial

Neste tratamento é realizada uma recristalização parcial do material, o que permite obter têmperas com alongamentos maiores. Em alguns casos, o processo de estampagem é favorecido por este processo, conferindo ao produto final uma maior resistência mecânica. Pode ser realizado a temperaturas de 200°C a 280°C, dependendo do quanto de redução foi aplicada na laminação a frio. (ABAL, 2007)

### 3.3.5 Estabilização

Em algumas ligas de alumínio ocorre uma perca de propriedades mecânicas do material que foi deformado a frio, após alguns dias em temperatura ambiente. Para evitar isso, é aplicado um percentual de deformação maior do que o necessário para atingir as propriedades mecânicas, e depois aquece o material em temperaturas em

torno de 150°C para acelerar a recuperação. Este tratamento é utilizado para aliviar tensões residuais dos materiais encruados e aumenta a resistência a corrosão de algumas ligas. (ABAL, 2007)

### 3.4 CLASSIFICAÇÃO DA CONDIÇÃO METALÚRGICA DAS LIGAS DE ALUMÍNIO

Segundo o ASM HANDBOOK as ligas de alumínio podem apresentar cinco condições metalúrgicas comuns, a classificação se dá de acordo com os processos a que se submetem os materiais, sendo classificado da seguinte forma:

- F – Como fabricado: É aplicado a produtos obtido por processos de conformação onde não é empregado qualquer controle especial sobre as condições térmicas ou de encruamento. Não é especificado limites para as propriedades mecânicas.
- O – Recozida: Aplica do aos produtos finalizados, no estado onde apresentam o menor valor de resistência mecânica.
- H – Encruada: Aplicado aos produtos submetidos a deformação plástica a frio para aumentar a resistência mecânica e que podem ou não ser submetidos a um recozimento para produzir um amolecimento parcial ou um processo de estabilização. É utilizado para ligas não tratáveis termicamente, a letra “H” é seguida de dois ou mais dígitos.
- W – Solubilizado: É aplicado em algumas ligas que envelhecem naturalmente a temperatura ambiente, após tratamento de solubilização. Esta classificação é especificada somente quando o período de envelhecimento natural é especificado.
- T – Trada termicamente: Aplicado a produtos submetidos a tratamentos térmicos com ou sem deformação plástica. A letra “T” é seguida por um ou mais dígitos que indica a sequência de processos realizados.

#### 3.4.1 Classificação da condição metalúrgica “H”

Segundo o ASM HANDBOOK, o primeiro dígito indica o(s) processo(s) ao qual o material é submetido:

- H1 – Somente encruado.

- H2 – Deformado plasticamente a frio e parcialmente recozido.
- H3 – Deformado plasticamente a frio e estabilizado
- H4 – Deformado plasticamente a frio e pintado ou envernizado.

O segundo dígito indica o grau de encruamento em ordem crescente, indo do dígito 1 ao 8.

O terceiro dígito, quando usado, indica variações das têmperas de dois dígitos. É utilizado quando o grau de controle de têmpera ou propriedades mecânicas diferem, porém é próximo daquele para têmperas de dois dígitos ou quando alguma propriedade característica é modificada de maneira relevante.

### **3.4.2 Classificação da condição metalúrgica “T”**

Segundo o ASM HANDBOOK, os números de 1 a 10 que seguem a letra “T” indicam a sequência específica de tratamentos básicos, como mostrado a seguir:

- T1 – Resfriado bruscamente depois de um processo de conformação a uma temperatura alta e envelhecido naturalmente até uma condição substancialmente estável.
- T2 – Resfriado bruscamente depois de um processo de conformação a uma temperatura elevada, encruado e envelhecido naturalmente até uma condição substancialmente estável.
- T3 – Solubilizado, encruado e envelhecido naturalmente até uma condição substancialmente estável.
- T4 – Solubilizado e envelhecido naturalmente até uma condição substancialmente estável.
- T5 – Resfriado bruscamente depois de um processo de conformação a uma temperatura elevada e depois envelhecido artificialmente.
- T6 – Solubilizado e depois envelhecido artificialmente.
- T7 – Solubilizado e sobreenvelhido.
- T8 – Solubilizado, encruado e depois envelhecido artificialmente.
- T9 – Solubilizado, envelhecido artificialmente e depois encruado.
- T10- Resfriado bruscamente depois de um processo de conformação a temperatura elevada, encruado e depois envelhecido artificialmente.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizadas análises químicas, de dureza e microestruturais em amostras da liga de alumínio utilizada na caixa de redução do protótipo do projeto de extensão Cactus BAJA. Com a finalidade de caracterizar a liga. O material é entregue em forma de chapas laminadas, onde dessas chapas foram utilizadas sete amostras da liga de alumínio, em formato de cubos com 16 milímetros de lado.

### 4.1 ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (EFRX)

Foi realizado na Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN), no Laboratório de Caracterização Estrutural (LACE), com o equipamento Espectrômetro de Fluorescência da Shimadzu, a análise da composição química da liga de alumínio.

### 4.2 ESPECIFICAÇÃO DO MATERIAL

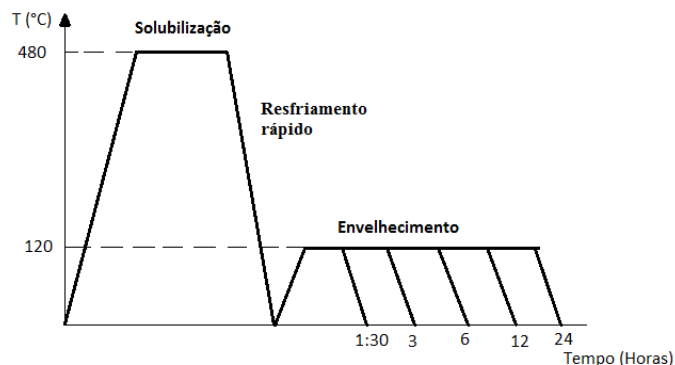
Após feita a análise EFRX da composição química do material, sabendo que se tratava de uma liga de alumínio, com o auxílio do livro ASM HANDBOOK vol. 2 foi possível especificar a família na qual a liga se encontrava, e posteriormente foi especificado qual seria a liga.

### 4.3 TRATAMENTO TÉRMICO DE SOLUBILIZAÇÃO E ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO

O tratamento térmico de solubilização foi realizado a uma temperatura de 480°C por um tempo de 10 minutos, tempo suficiente para dissolução dos constituintes, com auxílio do Forno GP Cientifica Modelo 2000-F. Após o tratamento de solubilização foi realizado o tratamento térmico de endurecimento por precipitação, que consiste em reaquecer o material a temperatura de 120°C na Estufa Digital Timer 280L para que seja iniciada a formação dos precipitados. O tempo de tratamento de endurecimento foi variado nos tempos de 1:30, 3, 6, 12 e 24 horas, para que fosse possível ver o comportamento que a liga iria apresentar quando submetida a diferentes tempos de tratamento. Os parâmetros utilizados que foram utilizados seguiram o artigo do ARAÚJO, 2014.

A Figura 4 a seguir mostra como se dá o ciclo de endurecimento por precipitação desde a solubilização ao tempo em que as ligas são envelhecidas.

Figura 4– Esquema do tratamento térmico de endurecimento por precipitação



Fonte: Autoria própria

#### 4.4 MICROSCOPIA ÓPTICA

Foram realizadas as análises microestruturais no laboratório de Ensaaios Mecânica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA). Primeiramente as amostras da liga foram lixadas, com as lixas 220, 320, 400, 500, 600 800, 1000 e 1200 nessa ordem, com o auxílio do equipamento AROPOL-2V Politriz Universal da Arotec. Após o lixamento se sucedeu o polimento com pasta de diamante e por fim realizou o ataque químico com o reagente Keller reagente utilizado para alumínio e suas ligas segundo MANNHEIMER, 2002.

Após feito o ataque químico nas amostras da liga foi realizado a Microscopia Óptica com o auxílio do microscópio Olympus GX51, onde foram capturadas imagens da microestrutura da liga como entregue de fábrica e após passar por tratamento térmico de endurecimento por precipitação.

#### 4.5 MEDIÇÃO DA VARIAÇÃO DE DUREZA

As medições de dureza do material foram realizadas no laboratório de Ensaaios Mecânica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), com o equipamento de medição de dureza Mitutoyo HR-320MS.

Foram realizados testes de dureza no material em diferentes condições, inicialmente foi feita a medição no material como entregue pelo fabricante, posteriormente após o tratamento de solubilização e por fim após tratamento de envelhecimento realizado em diferentes tempos, onde foram feitas medidas de dureza

para cada tempo de tratamento. Foram realizados um total de 35 medições de dureza em cada amostra estudada, onde realizou-se o cálculo da média das durezas encontradas.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 ANÁLISE DE ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X E ESPECIFICAÇÃO DO MATERIAL

Após feita a análise EFRX foi possível obter a composição química da liga de alumínio, apresentada no Quadro 1, dessa forma sendo possível especificar o material.

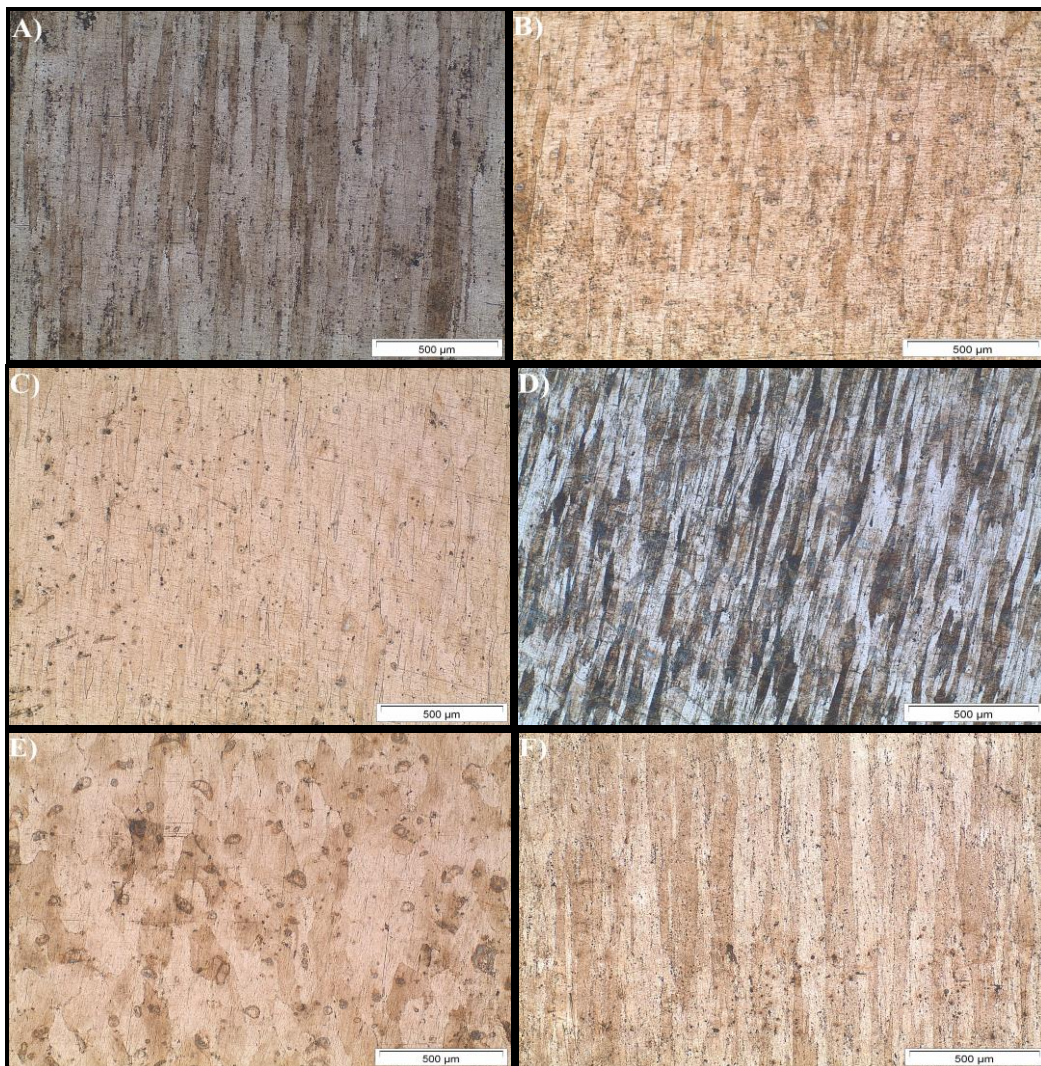
| Elemento | Composição (%) |
|----------|----------------|
| Al       | 90,52          |
| Zn       | 6,62           |
| Cu       | 1,88           |
| Cr       | 0,246          |
| Ba       | 0,29           |
| Fe       | 0,07           |
| K        | 0,05           |
| Ta       | 0,18           |
| Ca       | 0,04           |
| Ga       | 0,02           |
| Au       | 0,05           |
| V        | 0,01           |
| Ag       | 0,019          |
| Ni       | 0,005          |

Sabendo a composição química da liga utilizou-se o ASM HANDBOOK para definir a família e posteriormente especificar qual material se trata. A liga selecionada é da família 7xxx, onde o Zinco é o principal elemento de liga, e pela composição química foi especificado o material como sendo a liga de alumínio 7178.

## 5.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL POR MICROSCOPIA ÓPTICA

Ao analisar as microscopias ópticas realizadas, foi possível o formato com que os grãos do material estavam dispersos. A liga de alumínio analisada neste trabalho passou pelo processo de laminação, o que pode ser comprovado pela disposição dos grãos visto na microscopia, onde foram constatados grãos alongados, no sentido mostrado na figura 5, por toda microestrutura do material. A Figura 5 a seguir mostra a disposição dos grãos na liga de alumínio estudada, onde foi possível notar que mesmo após os tratamentos térmicos o formato dos grãos permaneceu o mesmo, na forma alongada.

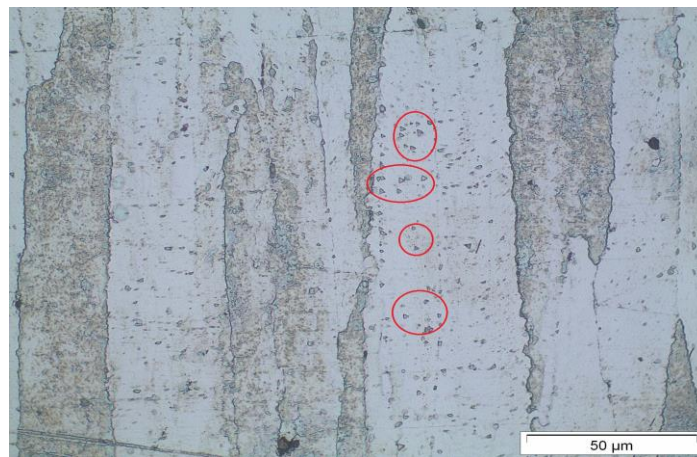
Figura 5— Microscopia óptica da liga de alumínio com aumento de 50X em diferentes condições de tratamento. A) Como de fábrica B) Envelhecida por 1 hora e meia C) Envelhecida por 3 horas D) Envelhecida por 6 horas E) Envelhecida por 12 horas F) Envelhecida por 24 horas



Fonte: Autoria própria

Na amostra da liga de alumínio que passou pelo tratamento de endurecimento por um tempo de 6 horas, foi possível visualizar a formação de precipitados em sua microestrutura, que pode ter vindo a acarretar no aumento da dureza desta amostra. A Figura 6 mostra a formação desses precipitados.

Figura 6— Microscopia óptica da liga de alumínio com aumento de 500X, envelhecida por 6 horas

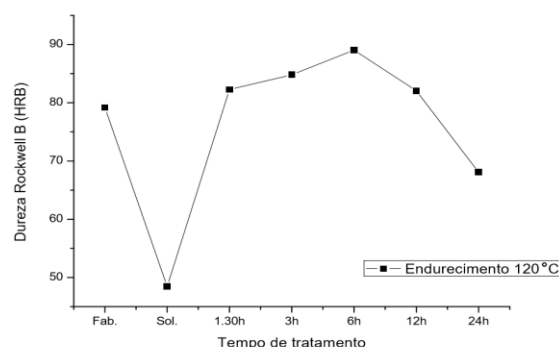


Fonte: Autoria própria

### 5.3 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE DUREZA

A Figura 7 mostra os resultados dos ensaios de dureza, realizados nas amostras da liga, em função do tempo de envelhecimento da liga de alumínio. É possível perceber que com o aumento do tempo de envelhecimento a dureza do material cresce até chegar seu ponto máximo, e após isso devido ao efeito de superenvelhecimento a dureza começa a decrescer.

Figura 7 – Resultados de dureza em função do tempo de tratamento



Fonte: Autoria própria

Analisando as amostras ensaiadas, constatou-se que o tempo de tratamento de envelhecimento que apresentou melhor resultado de dureza foi o de 6 horas, onde foi obtido um valor de dureza de  $89 \pm 0,83$  HRB, obtendo um considerável aumento de dureza em comparação ao material vindo de fábrica.

## 6. CONCLUSÃO

De acordo com a metodologia utilizada neste trabalho, foi possível a especificação da liga estudada, que foi a liga de alumínio 7178, bem como realizar uma análise em sua composição química e microestrutura.

Nos ensaios de dureza obteve-se resultados satisfatórios, conseguindo obter uma maior elevação de dureza com o tratamento de envelhecimento realizado por 6 horas, conseguindo um ganho de dureza de cerca de  $10 \pm 0,83$  HRB em comparação com as amostras sem tratamento algum. Com o auxílio da análise de EFRX o material estudado foi especificado. Ao final do trabalho os objetivos propostos foram cumpridos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CALLISTER, William D. Jr. Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução. 5ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

ABAL. Fundamentos e Aplicações do Alumínio. 2007.

NEWELL, James. Fundamentos da moderna engenharia e ciência dos materiais. 1st ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010

ROOY, E.L., Aluminum and Aluminum Alloys, IN.: American Society for Metals: ASM Handbook, vol 2 – Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, 10ª edition.

MOREIRA, M. F. Aplicações das Ligas de Alumínio Conformadas.

<http://www.dalmolim.com.br/educacao/materiais/bibliomat/aluminioconf.pdf> -

Acessado em 07 de agosto de 2016

SILVA, André Luiz V. da Costa e.; MEI, Paulo Roberto. Aços e ligas especiais. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

MANNHEIMER, Walter A., Microscopia dos Materiais: Uma introdução. E-papers Serviços Editoriais, 2002.

ARAÚJO, D.J. de.; ROMERO, J.A. de S.; MADANI, F.S.; BARBIERI, F.C. Estudo do envelhecimento artificial da liga de alumínio 7075. 21º CBECIMAT, 2014, Cuiabá MT Brasil.