

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

EDICARLOS ARRUDA DE LARA
HOSTILIO JOSE TEIXEIRA JUNIOR

**ESTUDO DAS VARIAÇÕES DE DUREZA E MICROESTRUTURA DA
LIGA DE ALUMÍNIO AA6351-T6 QUANDO SUBMETIDA A CICLOS
TÉRMICOS DE RECOZIMENTO, SOLUBILIZAÇÃO E PRECIPITAÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2018

EDICARLOS ARRUDA DE LARA

HOSTÍLIO JOSÉ TEIXEIRA JUNIOR

**ESTUDO DAS VARIAÇÕES DE DUREZA E MICROESTRUTURA DA
LIGA DE ALUMÍNIO AA6351-T6 QUANDO SUBMETIDA A CICLOS
TÉRMICOS DE RECOZIMENTO, SOLUBILIZAÇÃO E PRECIPITAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Engenheiro Mecânico” – Área de concentração: Engenharia Mecânica.

Orientadora: Profa. Ma. Sandra Mara Kaminski Tramontin

PONTA GROSSA

2018



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Ponta Grossa
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Mecânica
Bacharelado em Engenharia Mecânica



TERMO DE APROVAÇÃO

ESTUDO DAS VARIAÇÕES DE DUREZA E MICROESTRUTURA DA LIGA DE
ALUMÍNIO AA6351-T6 QUANDO SUBMETIDA A CICLOS TÉRMICOS DE
RECOZIMENTO, SOLUBILIZAÇÃO E PRECIPITAÇÃO

por

EDICARLOS ARRUDA DE LARA E HOSTÍLIO JOSÉ TEIXEIRA JUNIOR

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 21 de junho de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Profa. Ma. Sandra Mara Kaminski Tramontin
Orientadora

Profa. Ma. Heliety Rodrigues Borges Barreto
Membro Titular

Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho
Coordenador do Curso

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

**Dedico este trabalho à minha filha
Letícia, fonte de motivação para todos os
momentos de dificuldade.**

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradecemos a UTFPR de Ponta Grossa pelo ensino de qualidade e a todos os professores que nos acompanharam durante todas as etapas da graduação em Engenharia Mecânica.

Em especial, expressamos nossa gratidão a Professora Sandra Mara Kaminski Tramontin, responsável pela realização deste trabalho, orientando da melhor forma possível, sempre atenciosa com nossas dificuldades.

Gostaríamos de agradecer também ao Professor Dr. Luciano Augusto Lourençato pelo auxílio em diversas atividades práticas de laboratório relacionadas aos processos de polimento, ataques químicos e obtenção de micrografias.

Por fim, agradecemos a todos os amigos da universidade e a todas as pessoas que de alguma forma participaram desta etapa de nossas vidas.

LARA, Edicarlos Arruda de; TEIXEIRA JUNIOR, Hostílio José. **ESTUDO DAS VARIÇÕES DE DUREZA E MICROESTRUTURA DA LIGA DE ALUMÍNIO AA6351-T6 QUANDO SUBMETIDA A CICLOS TÉRMICOS DE RECOZIMENTO, SOLUBILIZAÇÃO E PRECIPITAÇÃO.** 2018. 73 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2018.

RESUMO

Neste trabalho foram analisadas as variações microestruturais e as variações de dureza da liga de alumínio AA6351 após a mesma ser submetida a diferentes tratamentos térmicos. Foram utilizadas combinações diversas de temperatura e tempo para os tratamentos de recozimento, solubilização e precipitação artificial de amostras distintas da referida liga metálica. Primeiramente foi determinada a composição química da liga de alumínio através do ensaio de espectroscopia óptica. As amostras passaram por ensaios de dureza Rockwell e microdureza Vickers como recebido e depois de serem submetidas aos tratamentos térmico. Após a realização de técnicas de preparação metalográfica as microestruturas das amostras puderam ser observadas em microscópio óptico. Como resultado foi determinado dureza Rockwell e microdureza Vickers em função da temperatura e do tempo dos tratamentos térmicos. Assim verificou-se que a amostra 5 apresentou a melhor combinação de parâmetros de tratamento térmico para potencializar a dureza e microdureza da liga de alumínio AA6351. Os resultados levaram a conclusão de que algumas amostras podem ter sofrido o fenômeno conhecido como superenvelhecimento, por consequência das altas oscilações de temperatura do forno de tratamento durante a etapa de precipitação artificial. Os fenômenos microestruturais associados ao endurecimento por precipitação não puderam ser observado por microscopia óptica, muito provavelmente por se tratar de uma liga trabalhada mecanicamente.

Palavras chave: Ligas de Alumínio AA6351. Solubilização. Precipitação. Superenvelhecimento.

LARA, Edicarlos Arruda de; TEIXEIRA JUNIOR, Hostílio José. **STUDY OF THE VARIATIONS OF HARDNESS AND MICROSTRUCTURE OF THE AA6351-T6 ALUMINUM ALLOY WHEN SUBMITTED TO THERMAL CYCLE OF ANNEALING, SOLUBILIZATION AND PRECIPITATION.** 2018. 73 f. TCC (Undergraduate) - Bachelor's Degree in Mechanical Engineering, Federal Technological University of Paraná, Ponta Grossa, 2018.

ABSTRACT

In this work the microstructural variations and the hardness variations of the AA6351 aluminum alloy were analyzed after being subjected to different heat treatments. Several combinations of temperature and time were used for the recrystallization, solubilization and artificial precipitation of samples other than said metal alloy. First, the chemical composition of the aluminum alloy was determined by the spectroscopy test. The samples were subjected to tests of Rockwell hardness and Vickers microhardness as received and after being subjected to the heat treatments. After the preparation of metallographic techniques the microstructures of the samples could be observed under an optical microscope. As a result it was determined the Rockwell hardness and Vickers microhardness as a function of the temperature and the time of the heat treatments. Thus, it was verified that sample 5 presented the best combination of heat treatment parameters to potentiate the hardness and microhardness of the AA6351 aluminum alloy. The results lead to the conclusion that some samples may have undergone the phenomenon known as super-aging, as a consequence of the high temperature oscillations of the treatment furnace during the artificial precipitation stage. The microstructural phenomena associated with precipitation hardening could not be observed by optical microscopy, most probably because it is a mechanically worked alloy.

Keywords: Aluminum alloys AA6351. Solubilization. Precipitation. Super-aging.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Consumo aparente de alumínio no Brasil	13
Figura 2: a) Diagrama de fases hipotético para uma liga de composição C0 que pode ser endurecida por precipitação, b) Gráfico esquemático mostrando os tratamentos térmicos de solubilização e de precipitação para o processo de endurecimento por precipitação.	18
Figura 3: Diagrama esquemático mostrando a resistência e dureza como uma função do logaritmo do tempo de envelhecimento a uma temperatura constante, durante o tratamento térmico de precipitação.	20
Figura 4: Vários estágios de recristalização da liga Al4Cu até chegar ao crescimento de grão.	21
Figura 5: Secagem da amostra.	24
Figura 6: Características de textura devido a diferença na orientação cristalográfica na seção de grãos atacados quimicamente.	25
Figura 7: Microscópio óptico e seus componentes.....	27
Figura 8: Representação esquemática do funcionamento do espectrômetro de emissão óptica.....	31
Figura 9: Modelo de penetrador Vickers.	33
Figura 10: Fluxograma das etapas do procedimento experimental.....	36
Figura 11: Serra de fita Diplomat 3001.....	38
Figura 12: Cortadora de precisão Buehler Isomet 4000.....	38
Figura 13: Algumas regiões de corte da amostra de 6" de diâmetro.....	39
Figura 14: Espectrômetro de emissão óptica.	40
Figura 15: Interior do espectrômetro com a amostra inserida.	40
Figura 16: Locais de marcação das amostras de 2" e 6" de diâmetro.....	41
Figura 17: Forno Jung tipo Mufla de temperatura máxima 1200°C.	42
Figura 18: Fluxograma dos processos de preparação metalográfica.....	44
Figura 19: Embutidora Buehler XPS 1.	45
Figura 20: Amostras embutidas em baquelite	45

Figura 21: Lixadeira semiautomática Arotec APL-4D.....	46
Figura 22: Politriz metalográfica Arotec APL-4.....	47
Figura 23: Polidora Vibratória VibroMet 2	47
Figura 24: Microscópio ZEISS, modelo MRc5.....	49
Figura 25: Microdurômetro Shimadzu	50
Figura 26: Durômetro de bancada PANTEC RBS.....	52
Figura 27: Porcentagem dos elementos químicos coletados para cada tiro na amostra de 2" de diâmetro (amostra 1).....	54
Figura 28: Porcentagem dos elementos químicos coletados para cada tiro na amostra de 6" de diâmetro (amostra 2).....	56
Figura 29: Micrografia da amostra 1, aumento de 200x.....	65
Figura 30: Micrografia da amostra 1, aumento de 1000x.....	65
Figura 31: Micrografia da amostra 2, aumento de 200x.....	66
Figura 32: Micrografia da amostra 2, aumento de 1000x.....	66
Figura 33: Micrografia da amostra 3 com aumento de 200x.....	67
Figura 34: Micrografia da amostra 3 com aumento de 1000x.....	67
Figura 35: Micrografia da amostra 4, sem ataque químico e aumento de 200x.....	68
Figura 36: Micrografia da amostra 4, sem ataque químico e aumento de 1000x.....	68
Figura 37: Micrografia da amostra 4, submetida a ataque químico com aumento de 200x.....	69
Figura 38: Micrografia da amostra 4, submetida a ataque químico com aumento de 1000x.....	69
Gráfico 1: Média da microdureza Vickers das amostras.....	5959
Gráfico 2: Média da dureza Rockwell das amostras.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Maiores mercados do alumínio e suas ligas.....	13
Tabela 2: Comparativo entre propriedades físicas do alumínio, aço e cobre.	15
Tabela 3: Sistema de Classificação do Alumínio e suas Ligas Trabalháveis.	17
Tabela 4: Composição química nominal da liga AA6351.	18
Tabela 5: Propriedades físicas da liga AA6351.....	18
Tabela 6: Propriedades mecânicas da liga AA6351.....	19
Tabela 7: Propriedades elétricas da liga AA6351.....	19
Tabela 8: Propriedades térmicas da liga AA6351.	19
Tabela 9: Elementos componentes da liga AA6351.....	20
Tabela 10: Propriedades de processo da liga AA6351.	26
Tabela 11: Reagentes para ligas de alumínio.	28
Tabela 12: Métodos de ataque químico.	29
Tabela 13: Características das escalas de dureza Rockwell.	35
Tabela 14: Valores de Microdureza Vickers para amostra 2” e 6” (amostras 1 e 2)..	56
Tabela 15: Valores de Microdureza Vickers para a amostra 3.....	57
Tabela 16: Valores de Microdureza Vickers para a amostra 4.....	57
Tabela 17: Valores de Microdureza Vickers para a amostra 5.....	58
Tabela 18: Valores de Microdureza Vickers para a amostra 6.....	58
Tabela 19: Valores de dureza Rockwell das amostras de 2” e 6” (amostras 1 e 2). .	60
Tabela 20: Resultados de dureza Rockwell para a amostra 3.	61
Tabela 21: Resultados de dureza Rockwell para a amostra 4.	61
Tabela 22: Resultados de dureza Rockwell para a amostra 5.	62
Tabela 23: Resultado de dureza Rockwell para a amostra 6.	63

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
2.	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVOS GERAIS	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	CARACTERÍSTICAS DO ALUMÍNIO	15
3.2	LIGAS DE ALUMÍNIO	15
3.2.1	Ligas da série 6000	17
3.2.2	Liga AA6351	17
3.3	TRATAMENTOS TÉRMICOS APLICADOS AS LIGAS DE ALUMÍNIO	20
3.3.1	Tratamento térmico de Solubilização	20
3.3.2	Endurecimento por Precipitação	22
3.3.3	Recozimento, Recuperação, recristalização e crescimento de grão	23
3.3.4	Tratamentos Térmicos da liga AA6351	25
3.4	CARACTERIZAÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO	26
3.4.1	Ataque Químico	27
3.4.2	Microscopia Óptica	29
3.4.3	Ensaio de Composição Química	31
3.4.4	Ensaio de Microdureza Vickers (HV)	32
3.4.5	Ensaio de Dureza Rockwell (HR)	34
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1	CORTE DAS AMOSTRAS	37
4.1.1	Corte primário	37
4.1.2	Corte secundário	38
4.2	ENSAIO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA	39
4.3	TRATAMENTOS TÉRMICOS	41
4.3.1	Tratamento Térmico da amostra 3	42
4.3.2	Tratamento Térmico da amostra 4	43
4.3.3	Tratamento térmico da amostra 5	43
4.3.4	Tratamento Térmico da amostra 6	44
4.4	PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA	44
4.4.1	Embutimento das amostras	45
4.4.2	Lixamento	46
4.4.3	Polimento com Suspensão de Diamante	46

4.4.4	Polimento Vibratório	47
4.4.5	Ataque Químico.....	48
4.5	MICROGRAFIAS	48
4.5.1	Micrografias das amostras como recebido e depois dos T. Térmicos	49
4.6	ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS.....	50
4.6.1	Ensaio de Microdureza Vickers das amostras do material como recebido...	51
4.6.2	Ensaio de Microdureza Vickers das amostras após T. Térmicos	51
4.7	ENSAIO DE DUREZA ROCKWELL	51
4.7.1	Ensaio de Dureza Rockwell das amostras do material como recebido	52
4.7.2	Ensaio de Dureza Rockwell das amostras após os T. Térmicos	53
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
5.1	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS AMOSTRAS 1 E 2.....	54
5.2	MICRODUREZA VICKERS	56
5.2.1	Microdureza Vickers das amostras como recebido (amostras 1 e 2)	56
5.2.2	Microdureza Vickers após Tratamentos Térmicos.....	57
5.3	DUREZA ROCKWELL.....	60
5.3.1	Dureza Rockwell das amostras como recebido (amostras 1 e 2).....	60
5.3.2	Dureza Rockwell após os Tratamentos Térmicos	60
5.4	MICROGRAFIAS DAS AMOSTRAS.....	65
	CONCLUSÃO	70
	REFERÊNCIAS.....	71

1. INTRODUÇÃO

Atualmente o homem vem buscando materiais de construção que melhor atendam às suas necessidades na hora de produzir bens materiais de uso cotidiano. Muitas pesquisas têm contribuído na busca de uma melhor adequação dos materiais aos projetos.

Um material que vem ganhando amplo destaque nos processos de fabricação, devido a uma excelente combinação de propriedades é o alumínio. Ele possui uma grande abundância de jazidas e sua versatilidade faz com que seja o metal mais usado depois do aço e o principal entre os metais não ferrosos.

A crescente utilização do alumínio também é fundamentada na necessidade de se desenvolver produtos mais sustentáveis e que conseqüentemente causem um menor impacto ambiental. As aplicações do alumínio e suas ligas vêm diretamente ao encontro do conceito de sustentabilidade, pois se utilizam de um menor dispêndio de energia no seu beneficiamento quando comparados a outros tipos de ligas metálicas.

O alumínio destaca-se por sua baixa densidade, resistência à corrosão e ductilidade dentre outras propriedades, as quais fazem dele um material requerido para muitas aplicações, porém, o alumínio puro tem uma resistência mecânica muito baixa. Para melhorar essa e outras propriedades, uma grande quantidade de técnicas tem sido utilizadas. Dentre elas está a adição de elementos de liga ao alumínio formando assim as ligas de alumínio.

Em princípio o alumínio e suas ligas foram utilizados para a confecção de objetos de decoração como molduras de espelhos, travessas e utensílios domésticos, mas com o passar do tempo sua aplicação se expandiu na fabricação dos mais diversos produtos (VIANA, 2009).

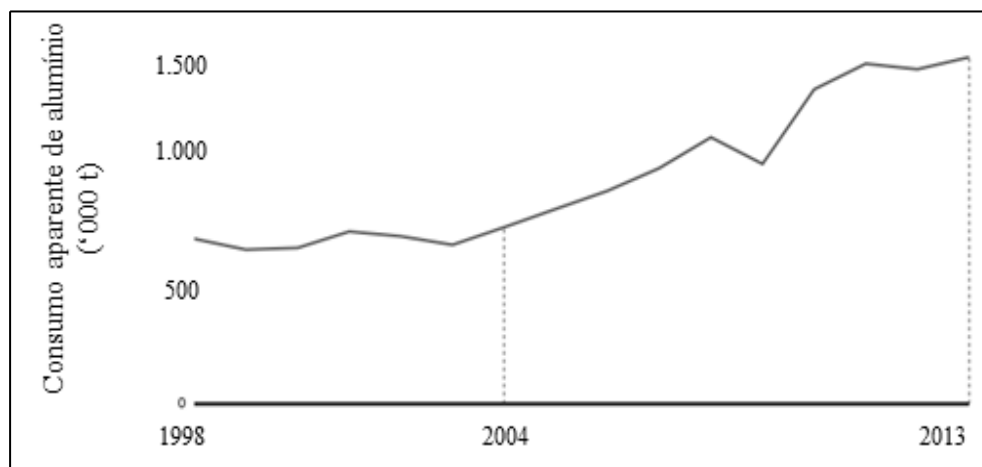
A tabela 1 mostra os maiores mercados consumidores para o alumínio e suas ligas.

Tabela 1: Maiores mercados do alumínio e suas ligas.

Produto	%
Embalagens para alimentos e medicamentos	34
Indústria automobilística e de transportes	21
Construção civil	17
Cabos e componentes elétricos	9
Bens duráveis	8
Indústria de equipamentos e maquinaria	7
Outros	4

Fonte: VIANA (2009)

No Brasil o aumento da demanda de produtos em alumínio nos últimos anos se deve principalmente devido a maior disponibilidade financeira e a maior conscientização sobre temas de sustentabilidade. O aumento do consumo aparente do alumínio no Brasil pode ser observado na figura 1.

Figura 1: Consumo aparente de alumínio no Brasil.

Fonte: PARREIRAS (2014)

O alumínio tem um papel fundamental no que se refere a elaboração de peças mais leves, resistentes à corrosão e com alta durabilidade, principalmente quando se trata da indústria automobilística e aeroespacial. Visando a produção de veículos mais eficientes, modernos e com menor emissão de carbono (PARREIRAS, 2014, P 21).

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Avaliar as variações microestrutural e de dureza da liga de alumínio AA6351 disponível comercialmente já com tratamento térmico de T6, endurecida por solubilização e precipitação, quando esta é submetida a ciclos térmicos de recozimento, solubilização e precipitação.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar a liga comercial como recebida;
- Tratar termicamente as amostras para recozimento e avaliar a redução de dureza e recuperação da plasticidade;
- Estabelecer protocolo de tratamento térmico para endurecimento da liga de alumínio AA6351 de uso naval/automotivo quando depois de solubilizada/recozida.
- Realizar ensaios de dureza, microdureza e análise metalográfica por microscopia ótica para avaliação das modificações de propriedades mecânicas (dureza e microdureza) e morfológicas após a liga ser submetida aos ciclos de tratamentos térmicos propostos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CARACTERÍSTICAS DO ALUMÍNIO

O alumínio acompanha o ferro e o aço entre os metais mais consumidos anualmente, sendo o mais importante dos metais não ferrosos. Esse consumo se justifica pela grande versatilidade do metal devido a algumas propriedades características, como: baixa densidade e excelente condutividade térmica e elétrica, sendo muito utilizado em trocadores de calor, evaporadores, aquecedores, cilindros e radiadores automotivos (SILVA JUNIOR, 2008, p. 5-6).

A tabela 2 faz um comparativo entre as propriedades físicas do alumínio, aço e cobre.

Tabela 2: Comparativo entre propriedades físicas do alumínio, aço e cobre.

Propriedades Físicas	Alumínio	Aço	Cobre
Densidade (g/cm ³)	2,71	7,86	8,90
Temperatura de Fusão (°C)	657	1500	1082
Módulo de Elasticidade (Kg/mm ²)	7000	20000	12000
Coefficiente de Expansão Térmica (20 – 100 °C)	24.10-6	11,7. 10-6	17.10-6
Condutibilidade Térmica a 25 °C	0,53	0,12	0,94
Condutibilidade Elétrica a 20 °C	59	14,5	100

Fonte: ALFA (2016)

3.2 LIGAS DE ALUMÍNIO

O alumínio puro tem seu campo de aplicação reduzido e muitas vezes o produto final requer características tecnológicas que o estado puro não é capaz de satisfazer, porém, esse metal possui mais uma característica especial, devido ao fato de poder combinar-se com a maioria dos metais de engenharia, chamados elementos de liga, e a partir dessas combinações atender aos requisitos de acordo com a aplicação do produto final e seus processos de fabricação. Como exemplo de

propriedades das ligas de alumínio temos: resistência mecânica, usinabilidade, ductilidade, formabilidade e fluidez no preenchimento de moldes (ABAL, 2003).

A maior parte dos materiais quando em situação de serviço, estão sob ação de forças ou cargas. Exemplos dessa situação incluem a liga de alumínio usada na fabricação de asas de aviões e o aço do eixo de uma roda de automóvel. Nessas situações é preciso conhecer as características dos materiais e projetar o elemento estrutural do qual ele é feito de maneira que qualquer possível deformação não seja excessiva e conseqüentemente não ocorra a fratura do material (BRITO; QUEIROGA; MACEDO, 2014).

As ligas de alumínio têm suas propriedades em função dos elementos de liga adicionados, onde as combinações de elementos adicionados e quantidades de cada elemento alteram as propriedades da liga. Não existe uma liga de alumínio que possua todas as propriedades ótimas requeridas para cada aplicação, são necessárias várias ligas onde cada uma tem suas características principais onde é necessário conhecer suas vantagens e limitações para fazer a melhor seleção (ABAL, 2003).

A elaboração das ligas de alumínio tem como objetivo principal aumentar a resistência mecânica, sem comprometer as outras propriedades, com isso novas ligas têm sido desenvolvidas, com as mais diversas combinações, adequadas a aplicações específicas (ABAL, 2007).

As ligas de alumínio tratáveis termicamente podem atingir uma resistência a tração de 700MPa, o que torna esse composto extremamente eficiente em aplicações que requerem elevada resistência associada ao baixo peso. Perdem resistência a altas temperaturas, em geral acima de 260°C, porém, quando expostas a temperaturas abaixo de 0°C, normalmente mantém os valores de tenacidade e ductilidade.

O ponto de fusão das ligas de alumínio é discretamente mais baixo do que o alumínio puro que é de 660°C, que por sua vez é relativamente baixo quando comparado ao aço que é da ordem de 1570°C (ABAL,2007).

3.2.1 Ligas da série 6000

As ligas são nomeadas conforme os elementos nelas contidos. Atualmente existem várias ligas disponíveis comercialmente as quais são chamadas de ligas comerciais, caracterizadas pelo seu nome numérico proveniente das quantidades de seus elementos adicionados. Muitas vezes os próprios fornecedores dessas ligas fornecem as informações de suas propriedades na forma de como é vendida e as possíveis propriedades obtidas por tratamentos térmicos e as faixas de temperatura para sua aplicação.

As ligas de alumínio da série 6000, também chamadas de ligas Alumínio-Magnésio-Silício, nas quais o Magnésio e o Silício são os principais elementos de liga. Tem como característica boas propriedades mecânicas, fácil usinabilidade e soldabilidade (ELFER, 2017).

A tabela 3 mostra a classificação do alumínio e suas ligas e seus principais elementos de liga de cada grupo.

Tabela 3: Sistema de Classificação do Alumínio e suas Ligas Trabalháveis.

Grupo	Principal elemento de liga
1XXX	Alumínio não ligado com, no mínimo, 99,00% de pureza
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Zinco
8XXX	Outros elementos
9XXX	Série não utilizada

Fonte: ABAL (2003)

3.2.2 Liga AA6351

A liga AA6351 faz parte de uma alta fração de ligas extrudadas, produzidas para fins comerciais. Estas ligas oferecem vantagens adicionais como boa soldabilidade, resistência à corrosão, alta resistência mecânica e boa conformabilidade, além das outras propriedades comuns das ligas de alumínio.

A liga AA6351-T6 é uma liga solubilizada e envelhecida artificialmente. Comumente indicada para aplicações industriais onde a alta resistência mecânica é exigida. Apresenta boa resistência à atmosfera, água e diversos solos, além de ter resistência à água marinha (ALCOA,2017).

As aplicações mais comuns da liga AA6351-T6 estão direcionadas a Engenharia Estrutural, construção de navios, veículos e equipamentos, peças usinadas em tornos automáticos e forjamento a frio (ALUMICOPPER, 2018).

A tabela 4 apresenta a composição química nominal da liga AA6351-T6 segundo a ASM HANDBOOK (1998). Os valores indicados representam as porcentagens máximas em massa, salvo quando expresso o intervalo.

Tabela 4: Composição química nominal da liga AA6351.

Liga	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Cu	Ti
AA6351	0,4-0,8	0,4-0,8	0,7-1,3	0,5	0,2	0,1	0,2

Fonte: Adaptado de ASM HANDBOOK (1998)

Como se sabe, umas das grandes vantagens das ligas de alumínio em relação a outras ligas metálicas, é apresentar uma baixa densidade. A tabela 5 a seguir apresenta os valores de densidade para a liga AA6351, propriedade física essa considerada a sua mais importante.

Tabela 5: Propriedades físicas da liga AA6351.

Propriedades Físicas	Métrico	Inglês
Densidade	2,71g/cm ³	0,0979lb/in ³

Fonte: MATWEB (2017)

A tabela 6 a seguir, apresenta valores de diversas propriedades mecânicas da liga AA6351.

Tabela 6: Propriedades mecânicas da liga AA6351.

Propriedades Mecânicas	Métrico	Inglês
Dureza Brinell	95	95
Dureza Knoop	130	130
Dureza Rockwell A	40	40
Dureza Rockwell B	60	60
Dureza Vickers	107	107
Limite de Resist. a tração	310 Mpa	45000 psi
Tração de Ruptura	283 Mpa	41000 psi
Alongamento	14%	14%
Módulo de elasticidade	68,9 Gpa	10000 Ksi
Coeficiente de Poisson	0,33	0,33
Resist. a Fadiga	89,6 Mpa	13000 psi
Módulo de Cisalhamento	26,0 Gpa	3770 Ksi
Tensão de cisalhamento	200 Mpa	29000 psi

Fonte: MATWEB (2017)

A tabela 7 a seguir, apresenta os valores das propriedades elétricas da liga AA6351.

Tabela 7: Propriedades elétricas da liga AA6351.

Propriedades Elétricas	Métrico	Inglês
Resistividade Elétrica	0.00000382 ohm-cm	0.00000382 ohm-cm
	Temperatura 20°C	Temperatura 68.0 °F

Fonte: MATWEB (2017)

A tabela 8 a seguir, apresenta diversas propriedades térmicas para a liga AA6351.

Tabela 8: Propriedades térmicas da liga AA6351.

Propriedades Térmicas	Métrico	Inglês
CTE, linear	23,4 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$	13,0 $\mu\text{in}/\text{in}^\circ\text{F}$
	Temp. 20 - 100°C	Temp. 68,0 – 212 °F
Calor específico	25,0 J/g°C	0,213 BTU/lb-°F
Condutividade Térmica	176 W/Mk	1220 BTU in/hr-ft ² -°F
Ponto de Fusão	554 - 649°C	1030 – 1200 °F
Solidus	554 °C	1030 °F
Liquidus	649 °C	1200 °F

Fonte: MATWEB (2017)

A tabela 9 a seguir, mostra os elementos componentes da liga AA6351, assim como suas respectivas porcentagens.

Tabela 9: Elementos componentes da liga AA6351.

Elementos Componentes	Métrico	Inglês
Alumínio, Al	95,9 – 98,5 %	95,9 – 98,5 %
Cobre, Cu	<= 0,10 %	<= 0,10 %
Ferro, Fe	<= 0,50 %	<= 0,50 %
Magnésio, Mg	0,40 – 0,80 %	0,40 – 0,80 %
Manganês, Mn	0,40 – 0,80 %	0,40 – 0,80 %
Outros, cada	<=0,05 %	<=0,05 %
Outros, total	<=0,15 %	<=0,15 %
Silício, Si	0,70 – 1,3 %	0,70 – 1,3 %
Titânio, Ti	<=0,20 %	<=0,20 %
Zinco, Zn	<=0,20 %	<=0,20 %

Fonte: MATWEB (2017)

3.3 TRATAMENTOS TÉRMICOS APLICADOS AS LIGAS DE ALUMÍNIO

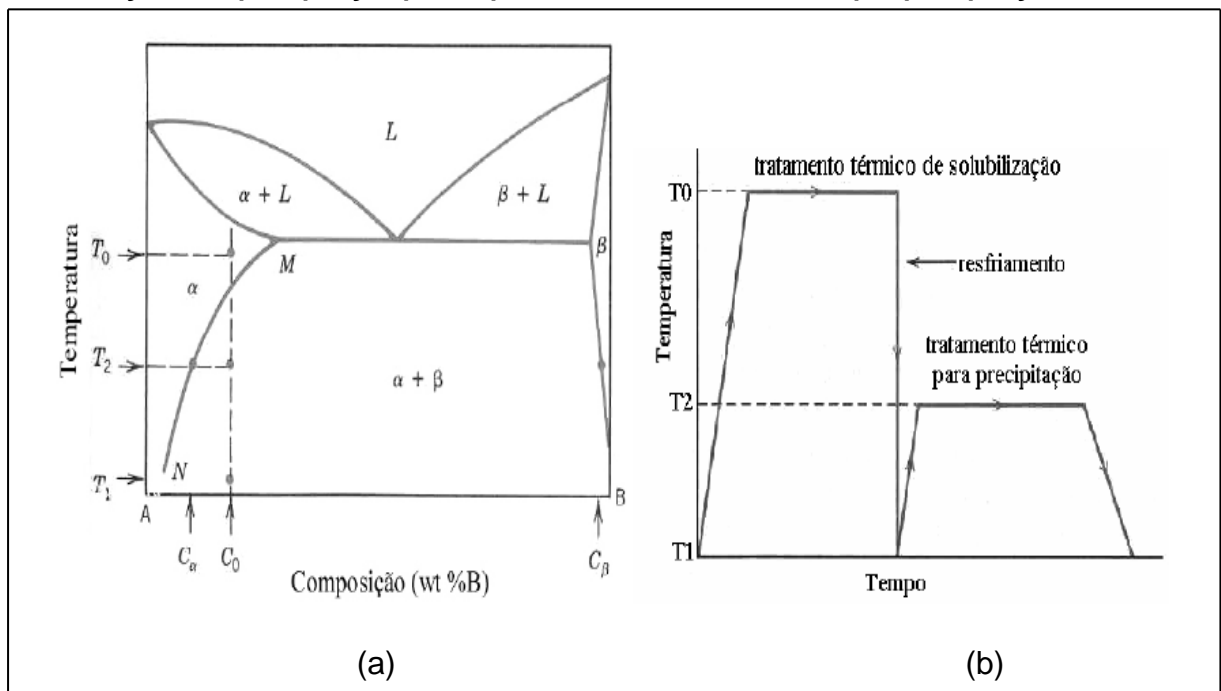
O tratamento térmico das ligas basicamente consiste nos processos de aquecimento ou resfriamento, que tem como principais objetivos: modificar as propriedades mecânicas, alterar estrutura metalúrgica ou ainda balancear o estado de tensões internas. Nas ligas de Alumínio as operações de tratamento térmico estão restritas a operações específicas, objetivando o aumento da resistência e dureza por precipitação (ASM, 1998).

3.3.1 Tratamento térmico de Solubilização

A solubilização é um tratamento térmico onde todos os átomos de soluto são dissolvidos para formar uma solução sólida monofásica, este tratamento é pré-requisito para o endurecimento por precipitação. Na prática muitas ligas que podem ser endurecidas por precipitação têm mais de dois elementos, porém a discussão é simplificada quando o sistema é binário.

A figura 2a mostra um diagrama de fases de um sistema hipotético A-B, com composição C_0 , a temperatura é aumentada até T_0 deixando a liga em apenas uma fase chamada de fase α , depois disso é feito um resfriamento rápido, ou têmpera, até uma temperatura T_1 que para muitas ligas é a temperatura ambiente, dessa forma se previne qualquer processo de difusão e formação a ele associada de qualquer fração de fase β . Na temperatura T_1 encontra-se apenas a solução sólida de fase α supersaturada com átomos de B, nesse estado a liga é relativamente dúctil e pouco resistente. A situação descrita encontra-se fora de equilíbrio e a tendência é que os átomos de soluto sejam expulsos para fora do reticulado cristalino em forma de precipitado, porém na temperatura T_1 as taxas de difusão são extremamente baixas e a fase α é mantida por períodos relativamente longos de tempo (CALLISTER, 2011).

Figura 2: a) Diagrama de fases hipotético para uma liga de composição C_0 que pode ser endurecida por precipitação, b) Gráfico esquemático mostrando os tratamentos térmicos de solubilização e de precipitação para o processo de endurecimento por precipitação.



Fonte: CALLISTER (2011)

3.3.2 Endurecimento por Precipitação

O processo de precipitação é responsável pelo endurecimento e aumento da resistência mecânica das ligas tratáveis termicamente. O aumento da resistência e da dureza é proveniente da formação de partículas extremamente pequenas e dispersas de uma segunda fase dentro da matriz da fase original.

O endurecimento por precipitação é obtido através de transformação de fases que são induzidas por tratamento térmicos apropriados: tratamento térmico de solubilização seguido por tratamento térmico de precipitação (CALLISTER, 2011).

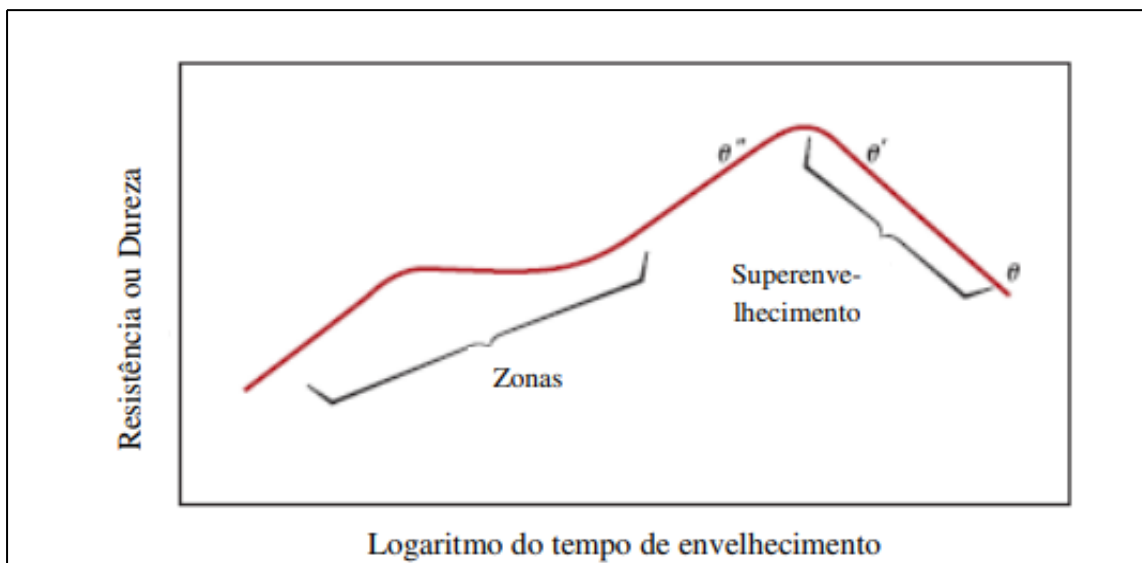
As partículas formadas dentro da nova fase são denominadas de precipitados, portanto esse processo é chamado de precipitação. O termo envelhecimento também é usado para designar esse processo devido à resistência desenvolver ao longo do tempo (CALLISTER, 2011).

O processo de precipitação consiste em aquecer a solução sólida supersaturada até uma temperatura T_2 como pode ser visto na figura 2b, com a temperatura nessa região as taxas de difusão aumentam e partículas finas e dispersas de precipitados β começam a se formar com composições C_β .

Após o tempo de envelhecimento apropriado à temperatura T_2 , a liga é resfriada a temperatura ambiente. A figura 2b mostra um gráfico da temperatura em função do tempo tanto para o tratamento térmico de solubilização quanto para o de precipitação. A natureza das partículas de precipitados depende da temperatura de precipitação T_2 e do tempo de envelhecimento nessa temperatura. Para algumas ligas o envelhecimento ocorre à temperatura ambiente ao longo de períodos prolongados (CALLISTER, 2011). A taxa de resfriamento no processo de envelhecimento não é considerada importante (HASKEL, 2009).

O comportamento para uma típica liga endurecível por precipitação está representado na figura 3.

Figura 3: Diagrama esquemático mostrando a resistência e dureza como uma função do logaritmo do tempo de envelhecimento a uma temperatura constante, durante o tratamento térmico de precipitação.



Fonte: CALLISTER (2011)

Com o aumento do tempo, a resistência ou a dureza aumentam até atingir um limite máximo e depois diminuem. Essa redução que ocorre após longos períodos de tempo é conhecida por superenvelhecimento. Com base na figura 3, quanto maior a temperatura, menor o tempo de tratamento (envelhecimento) necessário para se atingir o pico máximo de resistência (CALLISTER, 2011).

3.3.3 Recozimento, Recuperação, recristalização e crescimento de grão

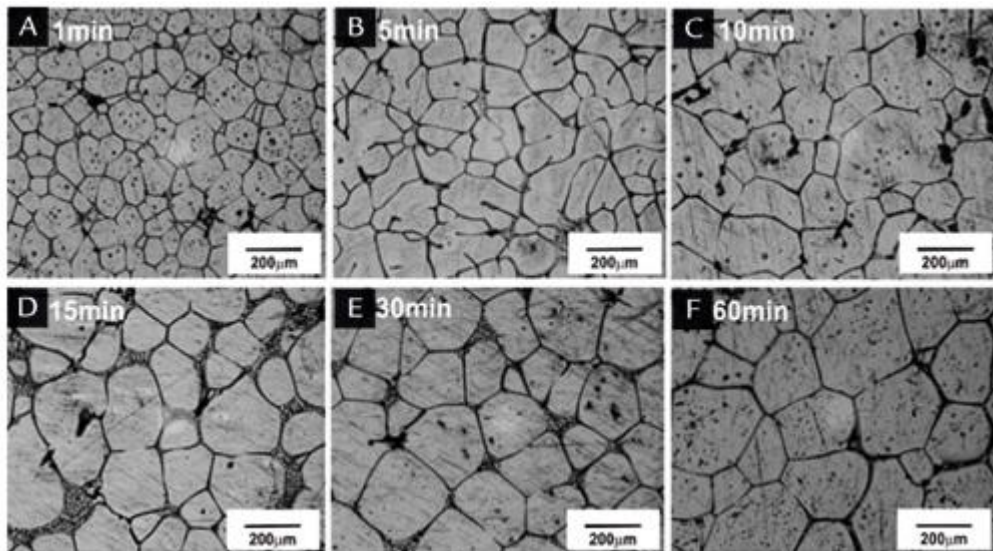
Recozimento é um tratamento térmico que restaura as propriedades do material que foi submetido ao trabalho a frio e anula efeitos de tratamentos térmicos anteriores (OLIVEIRA,2001). O recozimento leva o material a dois processos: recuperação e recristalização que podem ser seguidos por crescimento de grão (CALLISTER, 2011).

Durante a recuperação uma parte da energia interna que se encontra armazenada é liberada devido ao movimento das discordâncias. O número de discordâncias é reduzido e surgem novas discordâncias com baixas energias de deformação (CALLISTER, 2011).

Recristalização é a formação de um novo conjunto de grãos equiaxiais. Os novos grãos se formam pequenos e crescem até tomarem por completo o material de origem. Esses novos grãos são livres de deformação e possuem baixa densidade de discordâncias (CALLISTER, 2011).

A figura 4 a seguir, mostra os vários estágios da recristalização de uma liga de alumínio Al4Cu até chegar ao crescimento de grão. As estruturas tendem a mudar em função da temperatura e do tempo em que as ligas são expostas.

Figura 4: Vários estágios de recristalização da liga Al4Cu até chegar ao crescimento de grão



Fonte: ALVES; VIEIRA; OLIVEIRA (2012)

A recristalização depende tanto do tempo quanto da temperatura, ela é comumente aplicada após processo de trabalho a frio onde controlada pode ser usado para refinar a estrutura do grão (CALLISTER, 2011). Para a maioria dos casos pode ser aplicada as Leis da Recristalização (ESPÓSITO 2006 apud PADILHA 1995).

A seguir serão apresentadas algumas considerações referentes aos tratamentos térmicos citados anteriormente:

-Para que a recristalização ocorra é necessária uma deformação mínima;

-Quanto menor o grau de deformação, mais alta é a temperatura para o início da recristalização;

-Quanto mais longo o tempo de recozimento, menor a temperatura para o início da recristalização;

-O tamanho de grão final depende fortemente do grau de deformação e pouco da temperatura de recozimento. Quanto maior o grau de deformação e/ou menor a temperatura de recozimento, menor será o tamanho do grão final;

-Quanto maior o tamanho de grão inicial, maior será a deformação necessária para que a recristalização se complete no mesmo intervalo de tempo e temperatura de recozimento;

-O grau de redução necessário para se obter um mesmo endurecimento por deformação (encruamento) aumenta com o aumento da temperatura de deformação. Para um dado grau de redução, quanto maior for a temperatura de deformação, maior será a temperatura de recristalização e maior será o tamanho de grão final;

-O aquecimento continuado após o término da recristalização causa crescimento de grão.

3.3.4 Tratamentos Térmicos da liga AA6351

A liga AA6351 é uma liga classificada como termicamente tratável. A tabela 10 a seguir, mostra valores de temperatura e tempo de permanência em forno, para alguns tratamentos térmicos que a liga AA6351 pode ser submetida.

Tabela 10: Propriedades de processo da liga AA6351.

Propriedades de Processo	Métrico	Inglês	Comentários
Temperatura de Recozimento	349 °C	660 °F	Manter a temperatura durante 4 horas
Temperatura da Solução	504 °C	940 °F	
Temperatura de Envelhecimento	170 °C	338 °F	Manter a temperatura durante 6 horas

Fonte: MATWEB (2017)

A temperatura de recristalização é a temperatura na qual a recristalização atinge o seu término em 1 hora e para as ligas metálicas essa temperatura se encontra entre um terço e metade da temperatura de fusão (CALLISTER, 2011).

Para o recozimento do alumínio as temperaturas variam entre 300° e 450°C onde a peça fica submetida a essas temperaturas por um tempo e depois é resfriada no forno com velocidade de 30°C por hora até temperatura de 250°C. Em seguida é resfriada ao ar ambiente. Após esses processos a liga fica com alta ductibilidade (OLIVEIRA,2001).

3.4 CARACTERIZAÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO

Na elaboração de um projeto de engenharia, considerar as propriedades dos materiais torna-se de vital importância devido à grande quantidade de esforços envolvidos. Como por exemplo, em um projeto de eixo automotivo todas as propriedades do aço envolvido na construção são consideradas. Com isso, no processo de produção é fundamental que os materiais utilizados respeitem as especificações determinadas no projeto. Para isso, procedimentos de ensaios mecânicos, físicos e químicos normatizados são realizados para o controle de qualidade ou verificação dos materiais (GARCIA, 2008).

3.4.1 Ataque Químico

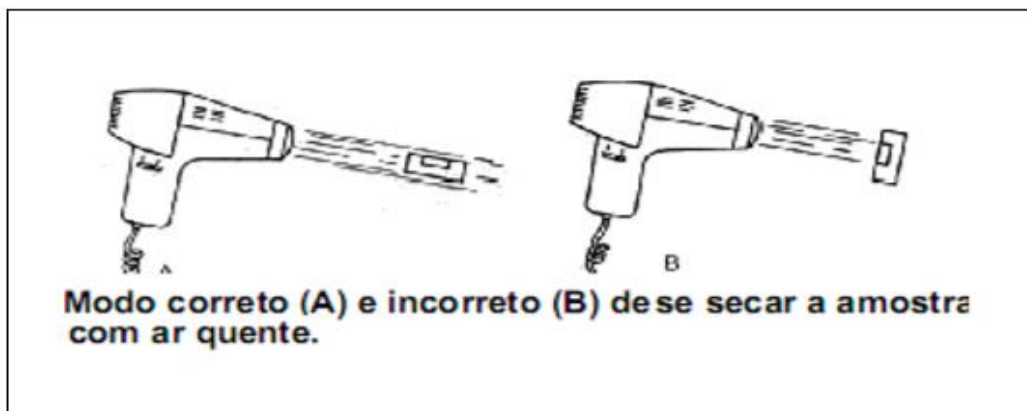
Para poder visualizar e identificar os contornos de grão e as diferentes fases da microestrutura de uma peça ou amostra no microscópio é necessário submeter a superfície da peça ao ataque químico. O ataque químico consiste em colocar a superfície da peça em contato com um reagente por um período de tempo (ROHDE, 2010).

O ataque químico é um processo de corrosão controlado, alguns grãos e fases são mais atacados pelo reagente do que outras partes da superfície. Devido a esse contraste é possível uma melhor visualização no microscópio, pois as partes mais atacadas refletem de maneira diferente a luz em relação as suas vizinhanças. Isso realça os contornos de grão e dá diferentes tonalidades às fases permitindo a identificação das mesmas no microscópio (ROHDE, 2010).

Antes de efetuar o ataque químico e para que haja sucesso na revelação da microestrutura do material é necessária uma preparação cuidadosa da superfície. Essa preparação é conseguida pelo uso de lixa e pós abrasivos sucessivamente mais finos (CALLISTER, 2011).

Depois de lixada e polida a amostra deve estar limpa e seca, para isso usa-se líquidos de baixa ebulição como o álcool. Para a secagem da amostra utiliza-se jato de ar quente (ROHDE, 2010). A figura 5 mostra a maneira correta de secar uma amostra antes de submeter ao ataque.

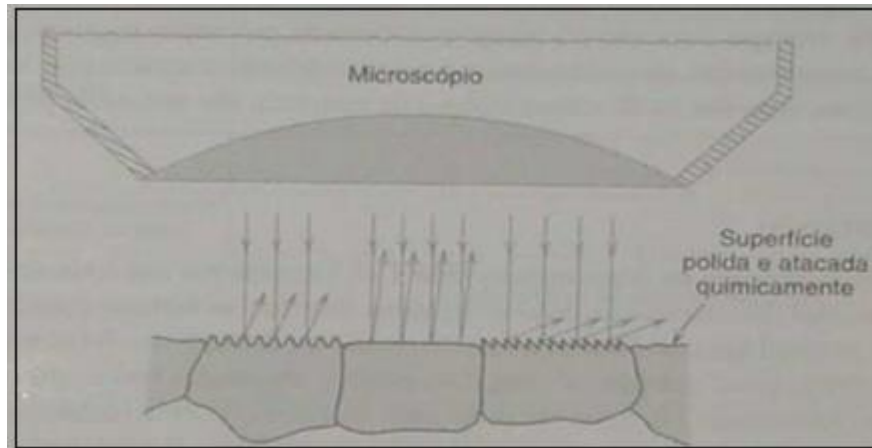
Figura 5: Secagem da amostra.



Fonte: ROHDE (2010)

Em materiais policristalinos as características do ataque químico variam de grão para grão fazendo com que cada região se comporte de forma diferente a luz incidente como pode ser visto na figura 6 (CALLISTER, 2011).

Figura 6: Características de textura devido a diferença na orientação cristalográfica na seção de grãos atacados quimicamente.



Fonte: CALLISTER (2011) p. 73

Os reagentes usados no ataque químico são compostos de soluções aquosas ou alcoólicas de ácidos, bases e sais, bem como sais fundidos e vapores. O reagente é escolhido em função do material e dos constituintes que se deseja contrastar para visualização no microscópio (ROHDE, 2010). Para as ligas de alumínio a tabela 11 mostra os reagentes mais utilizados.

Tabela 11: Reagentes para ligas de alumínio.

Designação metalográfica	Composição	Aplicação
Lixívia de solda	10 g hidróxido de sódio 90 ml água destilada	Reativo universal para micrografia de ligas de alumínio.
Ácido fluorídrico	0,5 ml ácido fluorídrico 99,5 ml água destilada	
Reativo macrográfico para alumínio e suas ligas	10 ml ácido clorídrico concentrado 10 ml ácido nítrico concentrado 10 ml ácido fluorídrico 2,5 ml água	Cordões de solda e macroestruturas. Determinação microscópica do tamanho do grão no processo rápido.

Fonte: ROHDE (2010)

O ataque químico pode ser classificado conforme o método utilizado para colocar o reagente em contato com a peça (ROHDE, 2010). A tabela 12 mostra os métodos de ataque.

Tabela 12: Métodos de ataque químico.

Método	Descrição e notas
Ataque por imersão	A superfície da amostra é imersa na solução de ataque; o método mais usado
Ataque por gotejamento	A solução de ataque é gotejada sobre a superfície da amostra. Método usado com soluções reativas dispendiosas.
Ataque por lavagem	A superfície da amostra é enxaguada com a solução de ataque. Usado em casos de amostras muito grandes ou quando existe grande desprendimento de gases durante o ataque.
Ataque alternativo por imersão	A amostra é imersa alternadamente em duas soluções. As camadas oriundas do ataque com a primeira solução são removidas pela ação do segundo reagente.
Ataque por esfregação	A solução de ataque, embebida em um chumaço de algodão ou pano, é esfregada sobre a superfície da amostra, o que serve para remover as camadas oriundas da reação.

Fonte: ROHDE (2010)

3.4.2 Microscopia Óptica

A microscopia óptica é a técnica mais antiga e uma das técnicas mais utilizadas na metalografia. Através da utilização de um microscópio é possível observar estruturas da matéria não discerníveis a olho nu.

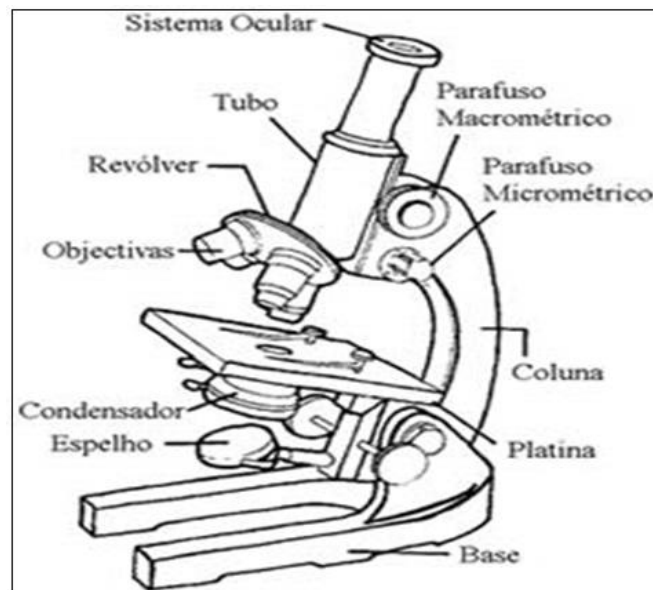
O limite máximo de resolução dos microscópios ópticos é estabelecido pelos efeitos de difração devido ao comprimento de onda da radiação incidente. Os microscópios ópticos convencionais ficam, então, limitados a um aumento de 2000 vezes, porque acima deste valor, detalhes menores são imperceptíveis.

A utilização desta técnica possibilita o aumento de imagens através da luz que, após incidir sob determinada amostra, passa por um conjunto de lentes. Além de ampliar a imagem de um objeto, o microscópio serve para aumentar o poder de

resolução do olho humano. Em geral, os microscópios ópticos tem um limite de resolução da ordem de $0,2\mu\text{m}$ (ESPÓSITO, 2006).

A figura 7 ilustra o exemplo de um microscópio óptico detalhando seus componentes.

Figura 7: Microscópio óptico e seus componentes.



Fonte: **ESPÓSITO (2006)**

Para observação utilizando-se esta técnica, torna-se necessária a preparação metalográfica da amostra e posterior ataque químico em solução ácida. Uma sequência padrão de preparação de amostras é dada a seguir:

-Lixamento da superfície da amostra até que fique totalmente plana, seguindo uma sequência de lixas de modo a tornar cada vez mais finos os riscos feitos por estas;

-Polimento, que pode ser manual ou mecanizado usando-se substâncias abrasivas muito finamente dispersas numa solução lubrificante, ou polimento eletroquímico onde a amostra sofre um ataque eletroquímico numa solução eletrolítica contendo um cátodo e a amostra como sendo o anodo. Em ambos os casos os objetivos são: nivelar a superfície, isto é, atenuar as irregularidades microscópicas, e em segundo lugar, espelhar a amostra, principalmente do ponto de vista microscópico.

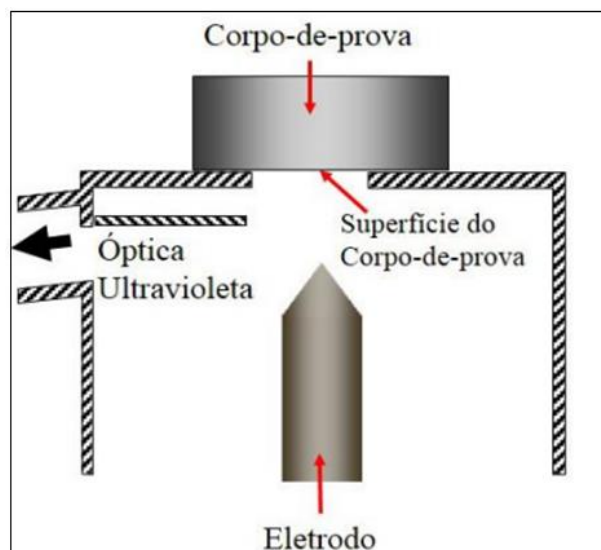
-Ataque químico da superfície polida de forma a realçar certos constituintes da microestrutura e assim torná-los observável ao microscópio.

3.4.3 Ensaio de Composição Química

Uma das maneiras de se garantir a conformidade de um produto é através do ensaio de composição química. O referido ensaio consiste em determinar quais e em que quantidades os elementos químicos estão presentes em determinada liga. Com isso, a classe de determinado material pode ser corretamente identificada (ASTM A751-11).

Um dos métodos utilizados para determinação da composição química das ligas é a espectroscopia de emissão óptica. Este método/equipamento tem como princípio de funcionamento a medição de três grandezas físicas básicas da luz ou da onda eletromagnética: frequência, intensidade (ou amplitude) e polarização (ângulo de vibração) (ASTM A751-11). Essas grandezas físicas podem ser visualizadas no espectrômetro de emissão óptica através da excitação do corpo de prova por meio de uma tensão elétrica. A figura 8 exemplifica este procedimento.

Figura 8: Representação esquemática do funcionamento do espectrômetro de emissão óptica.



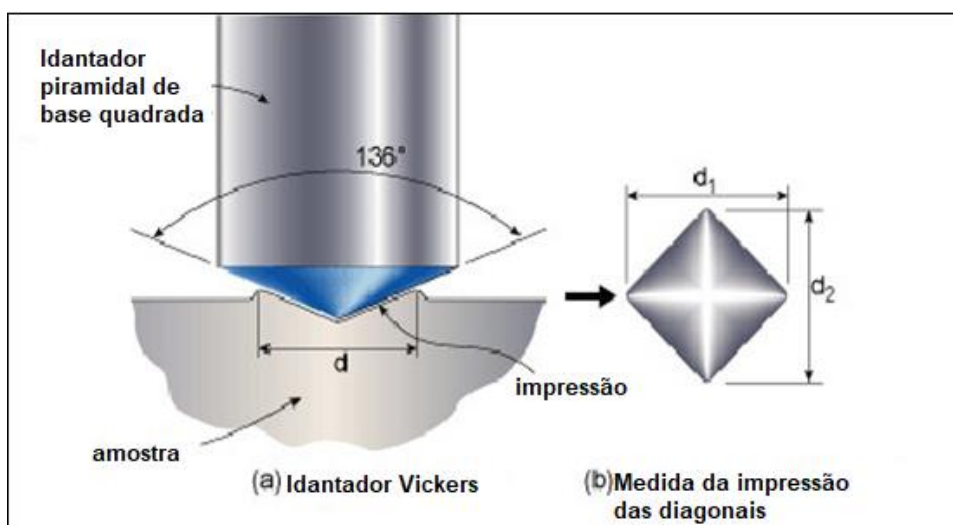
Fonte: SILVA; BOING (2013)

Como mostrado na figura 8, uma tensão elétrica é fornecida ao corpo-de-prova através do eletrodo, tornando possível assim a visualização das três grandezas físicas da luz emitida por cada elemento químico constituinte na liga, as quais são medidas pela óptica ultravioleta do equipamento. Ou seja, o espectrômetro de emissão óptica é composto basicamente em uma rede de difração e um captador. A rede faz com que a luz incidente sobre a abertura do espectrômetro se divida em feixes de onda, os quais incidem sobre os captadores que são sensores fotovoltaicos. Dessa maneira, é possível identificar a intensidade luminosa de cada comprimento de onda que existe na composição do feixe incidente, permitindo assim, a caracterização e a quantificação em massa dos elementos químicos presentes na liga (SILVA; BOING, 2013).

3.4.4 Ensaio de Microdureza Vickers (HV)

Esta técnica foi utilizada pela primeira vez em 1925 por Smith e Sandland, e recebeu seu nome em homenagem a empresa que fabricou as máquinas mais conhecidas para operar essa técnica. Estas contêm um perfurador de diamante de base quadrada com um ângulo de 136° entre as faces opostas, como mostrado na figura 9a.

Figura 9: Modelo de penetrador Vickers.



Fonte: Autoria própria

Sendo de diamante, o penetrador é considerado como indeformável e como tendo todas as penetrações semelhantes entre si. A carga usada para este tipo de dureza varia entre 1 e 120 Kgf, a qual aplicada lentamente e mantida na superfície por aproximadamente 18 segundos (SOUZA, 1982).

A forma da impressão é a de um losango regular como mostrado na figura 9b, e pela medida de suas diagonais (d), e conforme a equação (1), obtém-se a microdureza Vickers (HV):

$$HV = \frac{\text{carga}}{\text{área da superfície piramidal}} = \frac{2Q \operatorname{sen}\left(\frac{136}{2}\right)}{d^2} = \frac{1,8544Q}{d^2} \quad \text{equação (1)}$$

Onde:

Q= carga aplicada (N/mm² ou Kgf/mm²)

d= diagonal do losango (mm)

A medida da área deve ser precisa e para tanto, um microscópio com precisão de 1 µm é acoplado a máquina a fim de determinar com exatidão as medidas das diagonais (d), (SOUZA, 1982).

Principais vantagens do método Vickers são:

- Escala contínua;
- Impressões extremamente pequenas, não inutilizando as amostras;
- Grande precisão de medida;
- Deformação nula do penetrador;
- Existência de apenas uma escala de dureza;
- Aplicação para toda a gama de durezas encontradas nos diversos tipos de materiais;

- Aplicação a qualquer espessura de material, podendo, portanto, medir também durezas materiais *in loco*.

3.4.5 Ensaio de Dureza Rockwell (HR)

O ensaio de Dureza Rockwell consiste na impressão de uma pequena marca feita na superfície da peça pela aplicação de pressão com uma ponta de penetração. A medida da dureza do material ou da dureza superficial é dada como função das características da marca da impressão e da carga aplicada em cada tipo de ensaio de dureza realizado (GARCIA, 2008, p. 64-78).

Rockwell foi o desenvolvedor do método de ensaio de dureza que utiliza uma pré-carga. Através desse método, podemos determinar a dureza de metais, desde os metais mais moles até mais duros. É uma metodologia satisfatória, se comparado ao ensaio de dureza Brinell, por exemplo, porém essa técnica também tem suas limitações.

O penetrador tanto pode ser um diamante esferocônico com ângulo de 120° e ponta ligeiramente arredondada ($r=0,2\text{mm}$), como uma esfera de aço endurecido, geralmente com diamante de 1,59mm, existindo também nos diâmetros de 3,17mm, 6,35mm e 12,70mm (GARCIA, 2008, p. 76).

A dureza do material (metal) é diretamente relacionada a marca deixada nesta superfície, com a característica da marca e da carga aplicada. Simbolicamente, mencionando, em um ensaio de dureza simples, quanto menor for a marca, maior será a dureza do material para uma mesma carga e vice-versa (COSTA, 2009).

O número de dureza Rockwell é sempre citado com o símbolo HR, seguido da escala utilizada e ocasionalmente da carga de ensaio. A tabela 13 mostra as várias escalas existentes para a dureza Rockwell, que dependem do penetrador e da carga aplicada, abrangendo toda a gama de materiais.

Tabela 13: Características das escalas de dureza Rockwell.

Símbolo da escala	Penetrador	Carga maior (Kgf)	Cor da escala	Aplicações das escalas
B	Esfera de 1,59 mm	100	Vermelha	Ligas de cobre, aços moles, Ligas de alumínio, Ferro maleável, etc.
C	Diamante	150	Preta	Aço, fofo duro, fofo maleável perlítico, titânio, aço endurecido e outros metais mais duros
A	Diamante	60	Preta	Carbonetos cementados, aço fino e aços endurecidos de baixa camada de endurecimento
D	Diamante	100	Preta	Aplicações de aços com camada de endurecimento entre os dois casos acima mencionados, fofo maleável perlítico

Fonte: Adaptado de GARCIA (2008)

O ensaio de dureza Rockwell é bastante versátil e confiável, no entanto, algumas precauções devem ser tomadas antes da realização do ensaio para obtenção de resultados precisos, entre elas estão:

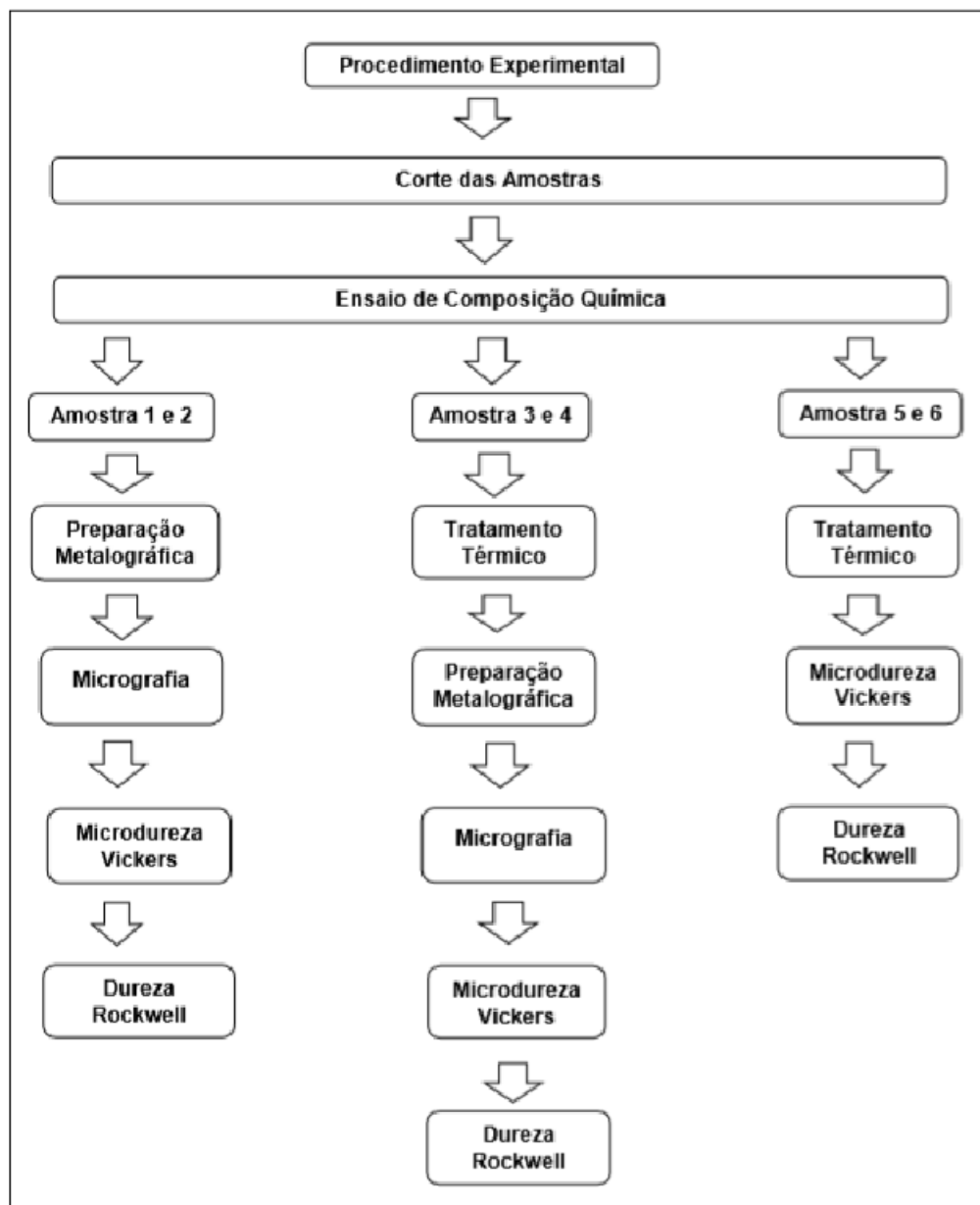
- O penetrador e o suporte devem estar limpos e bem assentados;
- A superfície a ser testada deve estar limpa e seca, plana e perpendicular ao penetrador;
- Não deve ocorrer impacto na aplicação das cargas;
- Deve-se realizar o ensaio em materiais desconhecidos partindo de escalas mais altas para evitar danos ao penetrador, seguido posteriormente de escalas mais baixas;
- O tempo de aplicação de pré-carga deverá ser menor que 3 segundos, sendo recomendados períodos de 1 a 8 segundos para aplicação de carga total, dependendo do material.
- O espaçamento entre as impressões deve ser no mínimo 3 vezes o diâmetro da penetração e 2,5 vezes o diâmetro para a distância da borda do corpo de prova.
- Na realização do ensaio, recomenda-se que a espessura do corpo de prova seja no mínimo 10 vezes maior que a profundidade da impressão.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento experimental foi todo realizado no Campus de Ponta Grossa da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Os experimentos foram realizados nas etapas que podem ser visualizadas no fluxograma apresentado na figura 10.

Figura 10: Fluxograma das etapas do procedimento experimental.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Para a realização da parte experimental deste trabalho, foram utilizados os seguintes laboratórios:

- Laboratório de Preparação Metalográfica;
- Laboratório de Ensaios Destrutivos e Não-Destrutivos;
- Laboratório de Caracterização de Materiais;
- Laboratório de Usinagem;
- Laboratório de Fundição.

O experimento teve como ponto de partida dois segmentos de barras circulares de alumínio a serem caracterizadas, pois foram doadas ao Laboratório de Usinagem sem especificação precisa da composição ou tratamento térmico a que as barras foram submetidas. A primeira barra de alumínio com aproximadamente duas polegadas (2") de diâmetro foi doada como sendo uma liga de alumínio de nomenclatura AA6351 já submetida ao tratamento térmico de T6 (solubilização e precipitação artificial), mas sem nenhuma comprovação desta especificação. A segunda barra de alumínio de aproximadamente seis polegadas (6") de diâmetro não havia especificação nenhuma, ficando a cargo a determinação de sua caracterização.

4.1 CORTE DAS AMOSTRAS

4.1.1 Corte primário

Foram cortadas inicialmente duas amostras, uma de cada barra, para que se tornasse possível uma análise no espectrômetro a fim de inicialmente determinar a composição química de ambas e suas respectivas porcentagens de elementos.

Foram cortados discos de 15 mm de espessura de cada material com auxílio de uma serra de fita da marca Diplomat 3001, modelo DPT 180/300A, que pode ser visualizada na figura 11.

Figura 11: Serra de fita Diplomat 3001.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Após o corte, as amostras foram faceadas até ter uma espessura de 12 mm cada para terem condições de serem analisadas no espectrômetro de emissão óptica.

4.1.2 Corte secundário

Para os tratamentos térmicos, preparação metalográfica, ensaio de dureza Rockwell e ensaio de microdureza vickers o formato de disco das amostras precisou ser modificado. Das amostras, com formato de disco inicialmente, foram retiradas amostras em formato cúbico de aproximadamente 12 mm de lado com o auxílio de uma serra de precisão da marca Buehler, modelo Isomet 4000, a qual pode ser vista na figura 12.

Figura 12: Cortadora de precisão Buehler Isomet 4000.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Os discos de 2" e 6" de diâmetro foram cortados para retirar amostras necessárias para análise primária, essas amostras foram chamadas de amostras 1 e 2 respectivamente.

Para posterior realização dos tratamentos térmicos, embutimento em baquelite, preparação metalográfica, análise em microscópio óptico, ensaio de microdureza Vickers e ensaio de dureza Rockwell foram escolhidas 4 amostras oriundas do disco da barra de 6" de diâmetro. Os cortes foram distribuídos ao longo de sua seção, essas amostras foram chamadas de amostras 3, 4, 5 e 6. Alguns cortes das amostras podem ser visualizados na figura 13.

Figura 13: Algumas regiões de corte da amostra de 6" de diâmetro.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

4.2 ENSAIO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A composição química foi determinada através da técnica de emissão óptica, fornecendo de maneira rápida e efetiva a composição química das amostras 1 e 2, gerando uma tabela com os elementos encontrados e suas respectivas porcentagens.

Para analisar a composição química das amostras foi utilizado um espectrômetro de emissão óptica da marca Shimadzu, de modelo PDA-7000, como

pode ser observado na figura 14. O mesmo possui alta performance analítica através do PDA (Pulse Height Distribution Analysis).

Figura 14: Espectrômetro de emissão óptica.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Para realizar as marcações, o material foi colocado dentro do espectrômetro, e após cada marcação mudou-se a posição da amostra para que não ocorresse na mesma posição marcas subsequentes. O interior do espectrômetro, com a amostra inserida pode ser observado na figura 15.

Figura 15: Interior do espectrômetro com a amostra inserida.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

É uma metodologia muito utilizada no controle de qualidade de materiais, como por exemplo, a composição química de uma determinada peça, que não pode ser diferente da pré-determinada, é submetida ao ensaio de composição química, controlando assim a quantidade de impurezas na amostra.

Neste caso, como não havia certeza da composição química das amostras, utilizou-se um espectrômetro de emissão óptica, com o objetivo de determinar as mesmas.

Foi definido o parâmetro de 3 marcações em cada amostra em regiões distintas e aleatórias, para que os resultados obtidos fossem comparados, a fim de definir os elementos mais representativos encontrados na composição química dessas ligas de alumínio. Pode-se observar na figura 16 os locais de marcação escolhidos para as amostras da barra de 2" e 6" de diâmetro respectivamente.

Figura 16: Locais de marcação das amostras de 2" e 6" de diâmetro.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

4.3 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Os tratamentos térmicos foram realizados no laboratório de caracterização de materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) no Campus de Ponta Grossa.

Para os tratamentos térmicos foi utilizado um forno tipo mufla da marca Jung que atinge uma temperatura máxima de 1200° C. O forno pode ser observado na figura 17.

Figura 17: Forno Jung tipo Mufla de temperatura máxima 1200°C.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Nos tratamentos térmicos foram utilizadas as amostras da barra de 6" de diâmetro, devido a maior disponibilidade de material dessa barra na instituição em relação a barra de 2".

Após a realização dos tratamentos térmicos, as amostras seriam submetidas aos ensaios de dureza Rockwell, microdureza Vickers e análise das referidas micrografias, para que, futuramente esses dados pudessem ser comparados com os dados das amostras iniciais (amostras 1 e 2).

Nos processos de solubilização foram tomadas precauções de segurança para abrir a porta do forno, devido ao fato de a temperatura de solubilização ultrapassar 500°C. Após atingido o tempo estipulado para a solubilização o forno foi desligado e aguardado 15 min antes de abrir a porta do mesmo.

A retirada da peça foi realizada após a abertura do forno com auxílio de luvas de couro e uma pinça de haste longa.

4.3.1 Tratamento Térmico da amostra 3

A amostra 3 foi submetida ao processo de recozimento (solubilização) por um período de 6 horas a uma temperatura de 520 °C (MACEDO NETO et al., 2015). Após

esse período o forno foi desligado e esperado o tempo necessário para abertura do mesmo (cerca de 15 minutos). A mesma foi mantida no forno até atingir o equilíbrio térmico com o ambiente. Esse processo durou aproximadamente 12 horas.

4.3.2 Tratamento Térmico da amostra 4

A amostra 4 também foi submetida ao processo de solubilização por um período de 6 horas a uma temperatura de 520 °C. Após esse período o forno foi desligado e esperado o tempo necessário para abertura do mesmo (cerca de 15 minutos). Em seguida, após a abertura do forno, a peça foi retirada e imediatamente resfriada em água a 60° C por um período de 30 minutos. Após esse processo a mesma foi submetida ao processo de precipitação artificial por um período de 8 horas a 160° C (MACEDO NETO et al., 2015).

Durante o processo de precipitação artificial da amostra 4, o forno apresentou oscilações de temperatura de 10% por aproximadamente 25 minutos até estabilizar na temperatura de 160°C.

4.3.3 Tratamento térmico da amostra 5

Os parâmetros utilizados para o tratamento da amostra 5 tiveram como referência base a ASM HANDBOOK (1998).

No tratamento da amostra 5 os parâmetros foram alterados. Para a solubilização foi utilizada uma temperatura de 504°C por um período de 8 horas. No início do tratamento de solubilização o forno apresentou uma oscilação de temperatura de 5%.

Em seguida a amostra foi resfriada em água a temperatura ambiente ($\pm 25^{\circ}\text{C}$), por um período de 30 minutos.

O tratamento de precipitação artificial foi realizado a 170°C por um período de 6 horas. Durante esse processo o forno apresentou uma oscilação de aproximadamente 45% na sua temperatura.

4.3.4 Tratamento Térmico da amostra 6

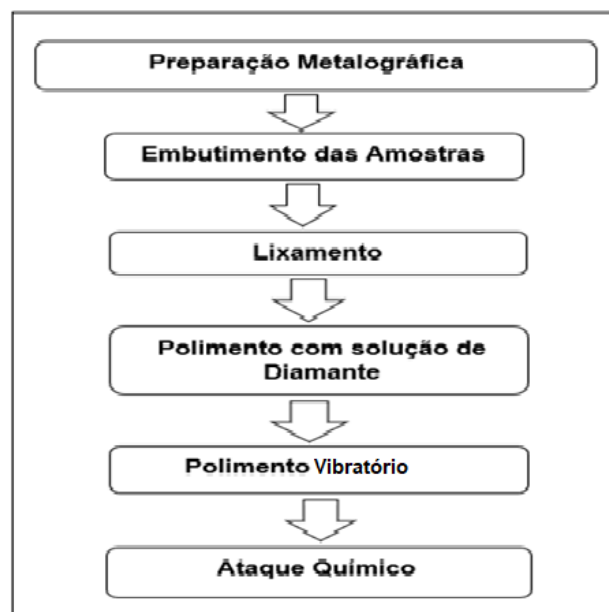
Para a solubilização da amostra 6 foi utilizada a temperatura de 504°C por um período de 8 horas (ASM HANDBOOK,1998). Durante o processo o forno apresentou uma oscilação de temperatura de 5%. Em seguida a amostra foi resfriada em água a temperatura ambiente ($\pm 25^{\circ}\text{C}$), por um período de 30 minutos.

Na precipitação artificial a amostra foi submetida a uma temperatura abaixo da usada anteriormente, porém o tempo de precipitação foi mantido. A amostra foi submetida a uma temperatura de 120°C por um período de 6 horas. Durante o início do processo o forno apresentou uma oscilação 55% da temperatura estipulada e depois de alguns minutos estabilizou.

4.4 PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA

Os processos de preparação metalográfica podem ser melhor visualizados no fluxograma mostrado na figura 18.

Figura 18: Fluxograma dos processos de preparação metalográfica.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

4.4.1 Embutimento das amostras

As amostras cortadas foram embutidas em baquelite utilizando uma embutidora da marca Buehler SimpliMet modelo XPS 1, como mostrado na figura 19.

Figura 19: Embutidora Buehler XPS 1.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

A figura 20 mostra algumas amostras já embutidas na baquelite.

Figura 20: Amostras embutidas em baquelite



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

4.4.2 Lixamento

Posteriormente foi iniciado o processo de lixamento, utilizando lixas d'água 400 e 600 respectivamente, até que a superfície de cada amostra embutida ficasse plana e lisa como um espelho. Para o processo de lixamento foi utilizado uma lixadeira metalográfica semiautomática da marca Arotec modelo APL-4D, conforme mostrado na figura 21.

Figura 21: Lixadeira semiautomática Arotec APL-4D.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

As amostras foram lixadas por aproximadamente 3 horas em cada granulometria de lixa, utilizando uma velocidade constante pré-fixada na lixadeira.

4.4.3 Polimento com Suspensão de Diamante

Mesmo após o lixamento as amostras ainda apresentavam deformidades e ranhuras, o que impediam uma visualização precisa no microscópio óptico. Iniciou-se então um processo de polimento com solução de diamante 0,25%.

Para o processo de polimento foi utilizada uma politriz metalográfica semiautomática da marca Arotec modelo APL-4, como mostrado na figura 22.

Figura 22: Politriz metalográfica Arotec APL-4.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

No processo de polimento além da solução de diamante 0,25%, também foi utilizado um disco polidor de feltro. Este processo durou em aproximadamente 3 horas para cada amostra. Durante esse período a solução de diamante era repostada de maneira intermitente, conforme a necessidade do procedimento.

4.4.4 Polimento Vibratório

Para finalizar o processo de preparação da amostra, as peças embutidas em baquelite foram submetidas ao polimento eletrolítico em uma polidora da marca Buehler, modelo VibroMet 2, conforme mostra a figura 23.

Figura 23: Polidora vibratória VibroMet 2.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

O processo de polimento eletrolítico durou cerca de 6 horas, até as amostras apresentarem uma planicidade e superfícies ideais para a visualização em microscopia óptica.

O polimento eletrolítico foi realizado no laboratório de preparação metalográfica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus de Ponta Grossa.

4.4.5 Ataque Químico

Terminada a etapa de polimento, as amostras foram submetidas a um ataque químico com solução composta de Ácido Nítrico (25 ml), Ácido Fluorídrico (2,5 ml) e Ácido Clorídrico (25 ml), por um período de 10 segundos, para que posteriormente pudessem ser visualizadas em microscópio óptico.

4.5 MICROGRAFIAS

Após os processos de lixamento e polimento tornou-se possível uma melhor visualização e análise da superfície das amostras no microscópio óptico. As micrografias serviram de base para avaliação das microestruturas antes e após os tratamentos térmicos.

As micrografias foram obtidas no microscópio óptico do laboratório de preparação metalográfica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) Campus de Ponta Grossa.

Para obtenção das micrografias foi utilizado um microscópio óptico da marca ZEISS, modelo MRc5, como mostrado na figura 24.

Figura 24: Microscópio ZEISS, modelo MRc5.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

As micrografias foram obtidas com auxílio do software AxioVision SE64 que se encontrava instalado no computador junto com o microscópio óptico.

4.5.1 Micrografias das amostras como recebido e após Tratamentos Térmicos

As amostras 1, 2, 3 e 4, já embutidas em baquelite, após serem lixadas e polidas foram então observadas em microscópio óptico. Inicialmente foram obtidas micrografias das amostras sem ataque químico, posteriormente com auxílio do mesmo.

4.6 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

O ensaio de Microdureza Vickers foi realizado no laboratório de preparação metalográfica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

O equipamento utilizado para realizar o ensaio de microdureza Vickers, foi um microdurômetro da marca Shimadzu, modelo G20, como pode ser visto na figura 25.

Figura 25: Microdurômetro Shimadzu.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Para realização do ensaio de Microdureza Vickers, o microdurômetro foi calibrado com uma carga de 0,3 Kgf e um tempo de permanência de 15 segundos. A visualização da amostra foi aumentada em 40 vezes.

Os valores de Microdureza Vickers foram fornecidos de forma direta, calculados pelo software do equipamento, dependendo apenas da informação manual das diagonais da impressão deixadas na peça.

Nenhuma das amostras ensaiadas no microdurômetro forneceram valores correspondentes para dureza Rockwell B. O equipamento utilizado realiza esta conversão (Microdureza Vickers para Dureza Rockwell B), de maneira automática, porém, os valores obtidos se mostraram baixos para tal conversão.

4.6.1 Ensaio de Microdureza Vickers das amostras do material como recebido

As duas amostras iniciais (1 e 2), previamente submetidas a preparação metalográfica e após a aquisição das respectivas micrografias, foram submetidas ao ensaio de Microdureza Vickers para obtenção de valores que posteriormente seriam comparados com os valores de microdureza das amostras termicamente tratadas.

4.6.2 Ensaio de Microdureza Vickers das amostras após Tratamentos Térmicos

Após realizado os diferentes tratamentos, preparação metalográfica e visualização microscópica, as amostras tratadas termicamente (amostras 3, 4, 5 e 6) foram submetidas ao ensaio de microdureza Vickers utilizando os mesmos parâmetros iniciais.

4.7 ENSAIO DE DUREZA ROCKWELL

Realizado de maneira rápida e de fácil execução, através do ensaio de dureza Rockwell foi possível encontrar diferenças de dureza na mesma amostra. O equipamento utilizado foi um durômetro de bancada da PANTEC, modelo RBS, como observado na figura 26 abaixo.

Figura 26: Durômetro de bancada PANTEC RBS.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

No equipamento utilizado, definiu-se a utilização de uma ponteira esférica de aço, considerando a escala B, normalmente utilizada para ensaios de ligas de alumínio, como pode ser observado na tabela 13.

A equipamento utilizado mede a dureza Rockwell das amostras devidamente preparadas para o referido ensaio. Quanto a escala de dureza utilizada, ela leva em consideração o tipo de penetrador e o valor de carga maior. A pré-carga utilizada foi de 10 kgf com uma carga maior de 100 kgf. Um material que foi ensaiado numa determinada escala, somente pode ser comparado com outro material ensaiado na mesma escala, como mostrada na figura anteriormente. O valor obtido no ensaio de dureza Rockwell é adimensional e fornecido diretamente no painel analógico do equipamento.

Às vantagens do ensaio de dureza Rockwell, é que podemos evidenciar a leitura da medida com rapidez e confiabilidade. Não é um ensaio destrutivo, então a peça pode ser utilizada depois do procedimento. Uma desvantagem observada foi que se a peça não estiver com bom acabamento superficial e principalmente com sua planicidade comprometida, pode ocorrer erro no ensaio e até mesmo comprometer a análise dos resultados coletados.

4.7.1 Ensaio de Dureza Rockwell das amostras do material como recebido

As amostras 1 e 2 referentes as barras circulares de 2” e 6” de diâmetro, respectivamente, foram inicialmente submetidas ao ensaio de dureza Rockwell, utilizando penetrador esférico e uma pré-carga de 10Kgf. Nesse ensaio foi utilizado a escala B, apropriada para este tipo de material, e os valores encontrados serviram de referência para futuras comparações.

Essas amostras foram tratadas termicamente apenas pelo fabricante, tratamento esse identificado previamente como T6 (Solubilização + Envelhecimento artificial).

Foi determinado como padrão a coleta de 10 medidas de dureza da amostra 1 e 10 medidas de dureza da amostra 2, já que as peças, nesse momento apresentavam uma maior área para realização do ensaio.

No processo de corte das amostras foi dedicado uma especial atenção com a planicidade das amostras para que o ensaio de dureza Rockwell não fosse comprometido.

Foi tomado o cuidado para que o penetrador e o suporte do durômetro estivessem limpos e bem assentados antes do início do ensaio. O penetrador foi fixado com ferramenta apropriada, para evitar danos ao equipamento.

Antes do início do ensaio foi verificado se as amostras estavam limpas e secas para diminuir a possibilidade de alterações dos resultados.

Também foi dada especial atenção para o espaçamento entre as impressões deixadas pelo ensaio. Espaços pequenos entre as impressões e em relação a borda da peça podem ser determinantes para obtenção de resultados alterados.

4.7.2 Ensaio de Dureza Rockwell das amostras após os Tratamentos Térmicos

Após a realização dos tratamentos térmicos as amostras 3, 4, 5 e 6 foram submetidas ao ensaio de dureza Rockwell utilizando a mesma escala utilizada para as amostras 1 e 2 (escala B), com ponteira esférica e pré-carga de 10 Kgf. Para esta fase do processo foram coletadas apenas 5 medidas de dureza de cada peça devido ao fato de que as amostras (3, 4, 5 e 6) submetidas aos tratamentos térmicos apresentarem uma área útil menor quando comparadas as amostras 1 e 2.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS AMOSTRAS 1 E 2

A figura 27 mostra o resultado do ensaio de composição química da amostra 1.

Figura 27: Porcentagem dos elementos químicos coletados para cada marcação na amostra de 2" de diâmetro (amostra 1).

Ele.Name	Ave.	N = 1	N = 2	N = 3
Cu	.01859	.01842	.01867	.01866
Si	.91666	.85450	.94850	.94698
Mg	.69662	.67769	.70425	.70792
Zn	.11587	.10026	.12219	.12515
Fe	.21092	.24236	.19325	.19714
Mn	.49998	.48976	.50638	.50379
Ni	.01586	.01640	.01482	.01636
Ti	.01226	.01285	.01197	.01196
Cr	.01013	.01024	.00999	.01015
Sn	.00228	.00383	.00122	.00177
Pb	.00000	.00000	.00000	.00000
V	.00000	.00000	.00000	.00000
P	.00000	.00000	.00000	.00000
Ca	.00270	.00378	.00231	.00202
Allnt	4.8949	4.7147	4.9016	5.0686
Al%	97.498	97.570	97.466	97.458

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Ao analisar os resultados obtidos no ensaio de composição química da amostra de 2" (amostra 1), fornecidos na figura 27, e comparados com a composição nominal da liga AA6351 fornecidos na tabela 4. Conclui-se então que se tratam da mesma classe de ligas, ou seja, a liga da amostra 1 possui os mesmos elementos principais da liga AA6351.

Os elementos mais representativos obtidos no ensaio de composição química, que podem ser visualizados na figura 27, são o Si e o Mg. O reforça a conclusão de que se trata de uma liga da série 6000.

Os elementos Ni, Cr, Sn e Ca fornecidos no ensaio de composição química que podem ser visualizados na figura 27 são considerados impurezas, já que os mesmos não constam na composição nominal da liga AA6351.

A figura 28 mostra o resultado do ensaio de composição química da amostra 2.

Figura 28: Porcentagem dos elementos químicos coletados para cada marcação na amostra de 6" de diâmetro (amostra 2).

Ele.Name	Ave.	N = 1	N = 2	N = 3
Cu	.01735	.01716	.01773	.01714
Si	1.0516	1.0068	1.1034	1.0444
Mg	.77784	.76646	.78698	.78009
Zn	.11225	.10733	.12203	.10737
Fe	.19512	.19209	.19869	.19457
Mn	.56295	.55765	.56293	.56826
Ni	.01457	.01395	.01538	.01438
Ti	.01936	.01961	.01929	.01917
Cr	.00652	.00623	.00686	.00648
Sn	.00250	.00247	.00270	.00234
Pb	.00000	.00000	.00000	.00000
V	.00000	.00000	.00000	.00000
P	.00000	.00000	.00000	.00000
Ca	.00106	.00109	.00093	.00117
Allnt	5.2753	5.4386	5.1327	5.2547
Al%	97.239	97.309	97.163	97.245

Fonte: **AUTORIA PRÓPRIA**

Os resultados obtidos no ensaio de composição química da amostra de 6" (amostra 2), fornecidos na figura 28, estão dentro da faixa dos valores da liga de Alumínio AA6351 fornecidos na tabela 4. Os elementos mais representativos são o Si e o Mg, reforçando a afirmação de que se trata de uma liga da série 6000.

Os elementos Ni, Cr, Sn e Ca, obtidos no ensaio de composição química, que podem ser visualizados na figura 28, são considerados impurezas, já que os mesmos não constam na composição nominal da liga AA6351 fornecidos na tabela 4.

5.2 MICRODUREZA VICKERS

5.2.1 Microdureza Vickers das amostras como recebido (amostras 1 e 2)

Os valores de microdureza Vickers das amostras 1 e 2 podem ser visualizadas na tabela 14.

Tabela 14: Valores de Microdureza Vickers para amostra 2" e 6" (amostras 1 e 2).

2"	6"	Unidade
118	114	HV
115	114	HV
113	119	HV
114	111	HV
120	117	HV
113	108	HV
114	110	HV
112	107	HV
115	110	HV
115	109	HV
Média	Média	
115	112	HV

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Os valores obtidos no ensaio de Microdureza Vickers visualizados na tabela 14, para amostra 1 (média de 115HV) e amostra 2 (média 112HV), estão muito próximos do valor de referência fornecido na tabela 6 (107 HV). Esses valores de Microdureza Vickers aliado aos valores de dureza Rockwell, somando-se com o ensaio de composição química, reforçam a afirmação de que se tratam de duas ligas de alumínio AA6351.

A variação considerável de valores fornecidos na tabela 14 pode ser explicada pela realização da impressão do ensaio de Microdureza Vickers em regiões distintas. Acredita-se que regiões com maior número de precipitados endurecedores, principalmente partículas de Silício e Magnésio nesse caso em particular, a microdureza tende a ser maior.

5.2.2 Microdureza Vickers das amostras após Tratamentos Térmicos de Recozimento, Solubilização e Precipitação Artificial (amostras 3, 4, 5 e 6)

Os valores de microdureza Vickers da amostra 3 podem ser visualizados na tabela 15.

Tabela 15: Valores de Microdureza Vickers para a amostra 3.

Valor	Unidade
35,4	HV
37,2	HV
38,3	HV
36,6	HV
36,6	HV
42,3	HV
38,8	HV
39,2	HV
40,3	HV
35,7	HV
Média	
38,1	HV

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Como era esperado os valores de Microdureza Vickers apresentados na tabela 15, para a amostra 3, se mostraram baixos. Essa conclusão se deve pelo fato de se tratar de uma amostra extremamente dúctil, situação também observado pelo ensaio de dureza Rockwell.

Os valores de microdureza Vickers da amostra 4 podem ser visualizados na tabela 16.

Tabela 16: Valores de Microdureza Vickers para a amostra 4.

Valor	Unidade
74,6	HV
77,5	HV
70,9	HV
70,1	HV
76,0	HV
76,0	HV
76,9	HV
79,5	HV
74,1	HV
78,6	HV
Média	
74,4	HV

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Os valores de microdureza Vickers da amostra 5 podem ser visualizados na tabela 17.

Tabela 17: Valores de Microdureza Vickers para a amostra 5.

Valor	Unidade
94,7	HV
96,3	HV
96,6	HV
103	HV
102	HV
100	HV
102	HV
101	HV
96,7	HV
98,2	HV
Média	
99,1	HV

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Os valores de microdureza Vickers da amostra 6 podem ser visualizados na tabela 18.

Tabela 18: Valores de Microdureza Vickers para a amostra 6.

Valor	Unidade
90,9	HV
78,0	HV
81,0	HV
79,4	HV
83,2	HV
85,2	HV
88,8	HV
90,0	HV
88,2	HV
82,8	HV
Média	
84,8	HV

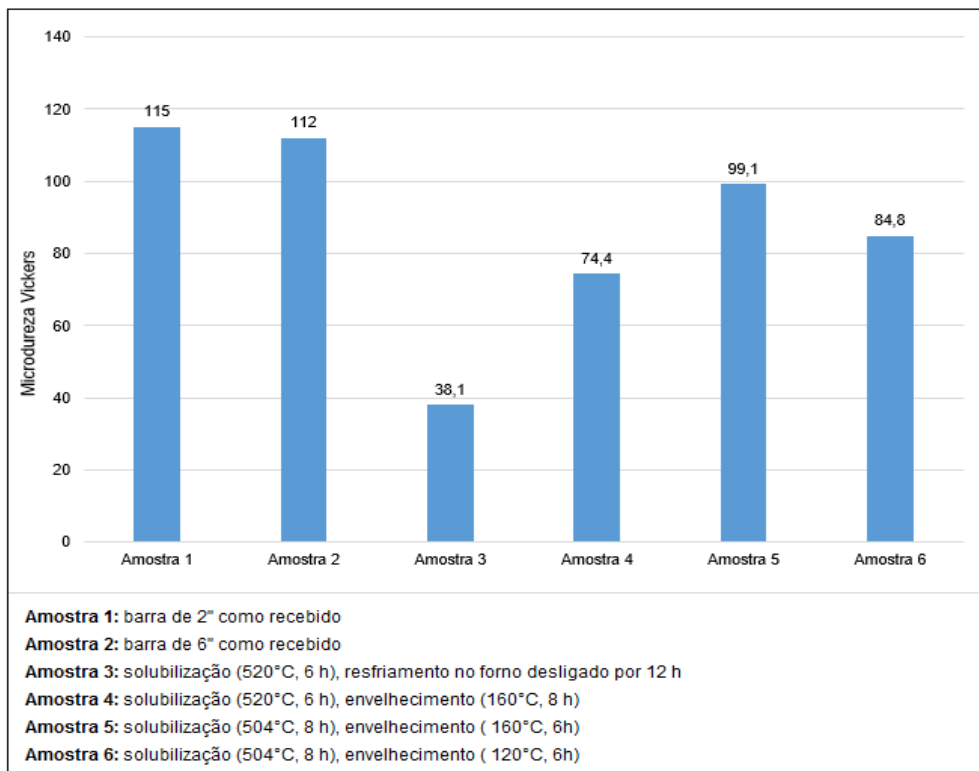
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Os resultados fornecidos pelas tabelas 16, 17, e 18 referentes as amostras 4, 5 e 6, evidenciam que a melhor combinação dos parâmetros de temperatura e tempo, fornecidos pela Matweb (2017), foram aplicados na amostra 5. Os valores de Microdureza Vickers da amostra 5 (média de 99,1 HV), fornecido pela tabela 17, estão bem próximos ao valor de referência fornecido pela tabela 6 (107 HV).

A disparidade dos valores fornecidos em cada uma da tabela anterior (tabelas 16, 17, e 18), pode ser explicado pelas impressões do ensaio de Microdureza Vickers ser realizado em regiões distintas. Regiões com maior concentração de precipitados endurecedores tendem a fornecer maiores valores de microdureza, em contrapartida, regiões com riscos, planicidade comprometida e pouca concentração de precipitados, tendem a fornecer valores menores de microdureza.

O gráfico 1 representa a média da microdureza Vickers das amostras, facilitando a visualização e comparação dos resultados.

Gráfico 1: Média da microdureza Vickers das amostras.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

5.3 DUREZA ROCKWELL

5.3.1 Dureza Rockwell das amostras como recebido (amostras 1 e 2)

Os valores de dureza Rockwell das amostras 1 e 2 podem ser visualizados na tabela 19.

Tabela 19: Valores de dureza Rockwell das amostras de 2" e 6" (amostras 1 e 2).

2"	6"	Unidade
66	57	HRB
65	61	HRB
67	59	HRB
66	60	HRB
66	59	HRB
66	62	HRB
66	61	HRB
66	62	HRB
65	62	HRB
66	62	HRB
Média	Média	
66	61	HRB

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Como pode ser observado na tabela 19, material de 2" de diâmetro tem a média de dureza Rockwell de 66 HRB, já o material de 6" de diâmetro tem uma média de 61 HRB. Conclui-se que ambas durezas estão com valores próximos.

Os valores das médias de dureza Rockwell das amostras de 2" de diâmetro (66HRB) e 6" de diâmetro (61HRB), estão muito próximos do valor de dureza Rockwell da liga AA6351 (60HRB), valor este que pode ser visualizado na tabela 6.

5.3.2 Dureza Rockwell após os tratamentos térmicos de Recozimento, Solubilização e Precipitação Artificial (amostras 3, 4, 5 e 6)

Os resultados do ensaio dureza Rockwell da amostra 3 pode ser visualizado na tabela 20

Tabela 20: Resultados de dureza Rockwell para a amostra 3.

Valor	Unidade
4,0	HRB
3,5	HRB
3,0	HRB
3,5	HRB
4,0	HRB
Média	
3,6	HRB

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Os resultados visualizados na tabela 20 mostram que após a amostra 3 ser recozida/solubilizada e resfriada lentamente (no forno), a mesma apresentou um baixo valor de dureza Rockwell e conseqüentemente uma elevada ductilidade. Este fato pode ser explicado pelo resfriamento lento, gerando um refinamento mais grosseiro e com maior tamanho de grão das amostras.

Ao analisar os resultados fornecidos pela tabela 20, chega-se à conclusão de que é possível recuperar consideravelmente a ductilidade de uma liga AA6351.

Os resultados do ensaio de dureza Rockwell da amostra 4 pode ser visualizado na tabela 21.

Tabela 21: Resultados de dureza Rockwell para a amostra 4.

Valor	Unidade
47,0	HRB
47,0	HRB
47,0	HRB
47,5	HRB
47,0	HRB
Média	
47,1	HRB

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

A amostra 4 foi solubilizada e precipitada conforme o trabalho de Macedo Neto et al. (2015). Os parâmetros de solubilização e precipitação eram voltados para uma liga de Alumínio da série 7000, e se tratava de uma liga fundida. Isso foi determinante para que os resultados de dureza Rockwell do referido trabalho se mostrassem

divergentes aos de Matweb (2017), já que para tratar uma liga da série 7000 utiliza-se temperaturas maiores do que para uma liga da série 6000.

Os resultados de dureza Rockwell fornecidos pela tabela 21, para a amostra 4 (média de 47,1 HRB), se mostraram abaixo do esperado, quando tomados como referência o valor da tabela 6 (60HRB). Esse fato pode ser explicado pela utilização de temperatura e tempo de solubilização e precipitação, diferentes dos fornecidos na tabela 9.

Durante os tratamentos térmicos da amostra 4 o forno apresentou oscilações de temperatura. O tratamento de precipitação apresentou uma oscilação máxima de 10% por um período aproximado de 25 minutos.

Os valores elevados de temperatura de solubilização e precipitação, aliados as oscilações de temperatura de precipitação artificial podem ter favorecido a um superenvelhecimento da amostra 4.

Os resultados do ensaio de dureza Rockwell da amostra 5 pode ser visualizado na tabela 22.

Tabela 22: Resultados de dureza Rockwell para a amostra 5.

Valor	Unidade
54,0	HRB
53,5	HRB
54,0	HRB
53,5	HRB
54,0	HRB
Média	
53,8	HRB

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

O tratamento da amostra 5 seguiu criteriosamente os parâmetros de Matweb (2017), e seu valor de dureza média (53,8) que pode ser visualizado na tabela 22, ficou bem próximo do valor de referência (60HRB).

Durante o tratamento da amostra 5 o forno apresentou oscilação de temperatura de 5% para solubilização e 45% para precipitação, fato esse que pode ter contribuído para uma discreta redução de dureza Rockwell da amostra 5.

O melhor resultado de dureza da amostra 5 em relação a amostra 4 também pode estar aliado ao tempo de permanência no forno durante a precipitação artificial. Enquanto a amostra 5 ficou por um período de 6 horas no forno, a amostra 4

permaneceu por 8 horas, reforçando assim a afirmação de superenvelhecimento da amostra 4. A dureza de uma peça aumenta até determinado ponto, e se exposta a um período prolongado no forno a uma determinada temperatura, a tendência é que a mesma diminua. Essa situação pode ser evidenciada na figura 3.

Os resultados do ensaio de dureza Rockwell da amostra 6 pode ser visualizado na tabela 23.

Tabela 23: Resultado de dureza Rockwell para a amostra 6.

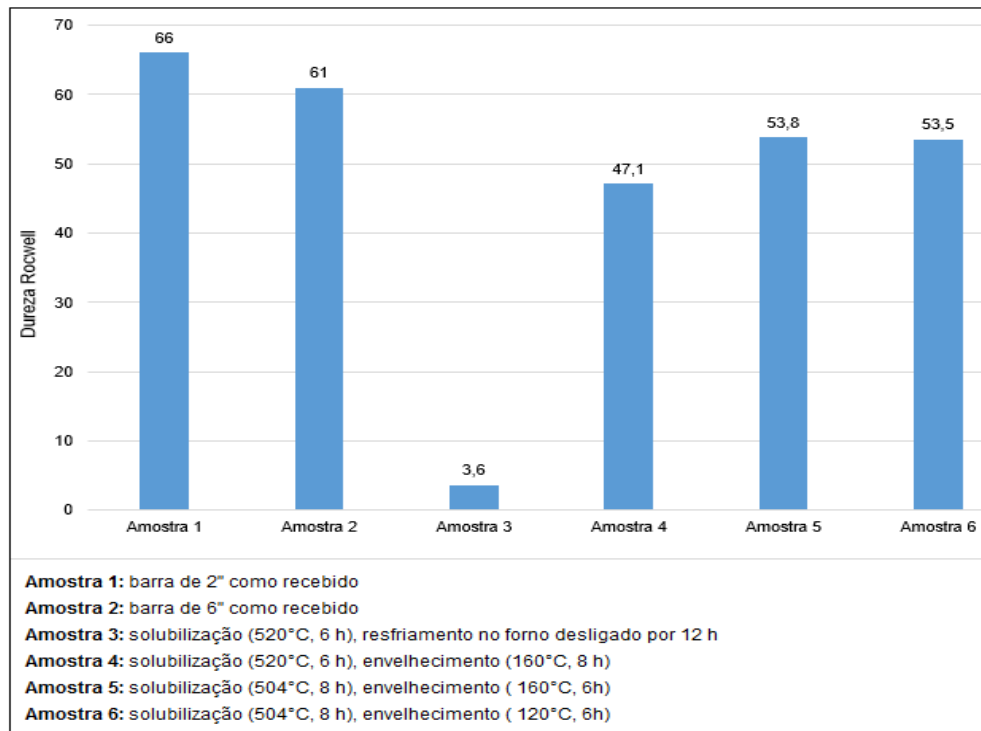
Valor	Unidade
53,5	HRB
53,5	HRB
53,5	HRB
53,5	HRB
53,5	HRB
Média	
53,5	HRB

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Os valores de dureza Rockwell fornecidos na tabela 23 (média de 53,5 HRB), estão próximos aos da tabela 6 (60HRB). O fato de não ter alcançado a dureza de referência, pode ser explicado pela baixa temperatura utilizada (120°C) ou pelo tempo de permanência no forno (6 horas). Sob essas circunstâncias a amostra 6 pode não ter atingido a combinação ideal de parâmetros para que chegasse a dureza esperada. Essa situação também pode ser evidenciada na figura 3.

Outro fator que pode ter influenciado na dureza da amostra 6 foi a oscilação de temperatura, que chegou a 55% na precipitação artificial.

O gráfico 2 representa a média da dureza Rockwell das amostras, facilitando a visualização e comparação dos resultados.

Gráfico 2: Média da dureza Rockwell das amostras.

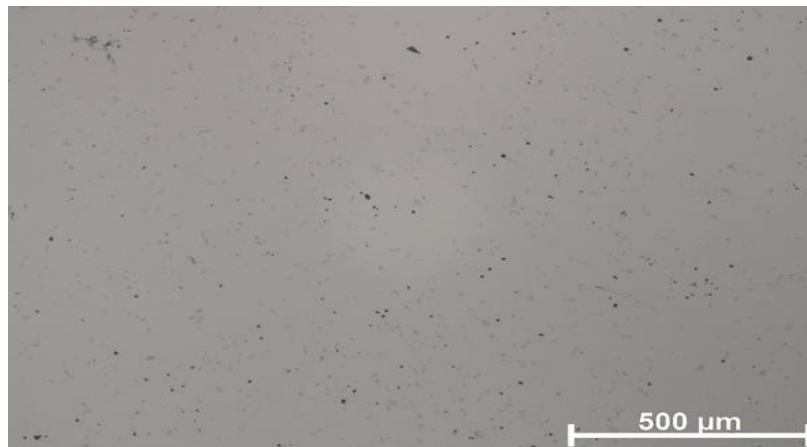
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

5.4 MICROGRAFIAS DAS AMOSTRAS

Os fenômenos microestruturais associados ao endurecimento por precipitação não puderam ser observado por microscopia óptica, muito provavelmente por se tratar de uma liga trabalhada mecanicamente.

A figura 29 mostra a micrografia da amostra 1 (barra de 2 polegadas de diâmetro) do material como recebido, com ampliação de 200x.

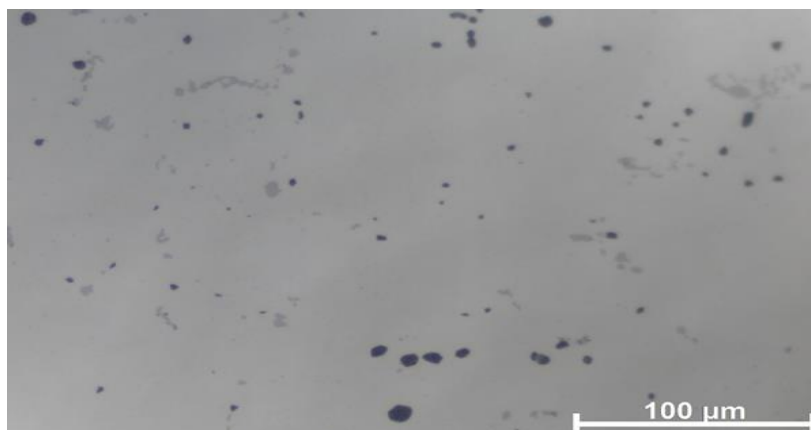
Figura 29: Micrografia da amostra 1, sem ataque químico com ampliação de 200x.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA via software AxioVision SE64

A figura 30 mostra a micrografia da amostra 1 (barra de 2 polegadas de diâmetro) do material como recebido, com ampliação de 1000x.

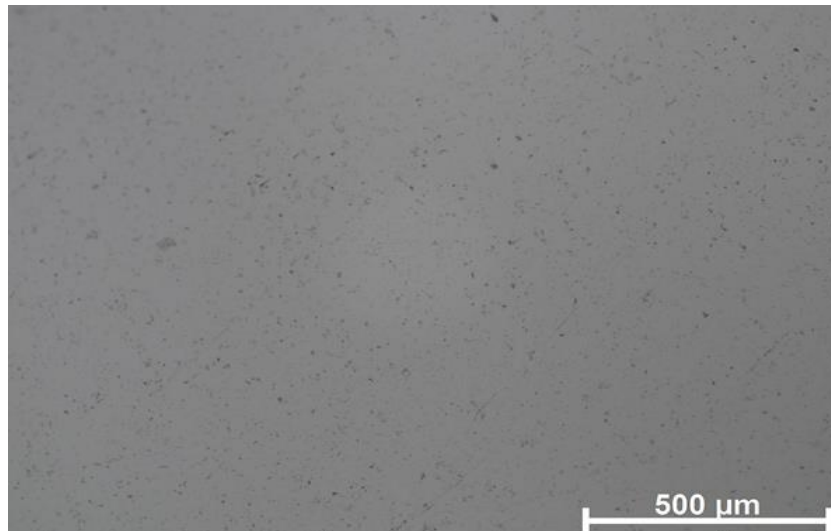
Figura 30: Micrografia da amostra 1, sem ataque químico com ampliação de 1000x.



Fonte: Autoria própria via software AxioVision SE64

A figura 31 mostra a micrografia da amostra 2 (barra de 6 polegadas de diâmetro) do material como recebido, com ampliação de 200x.

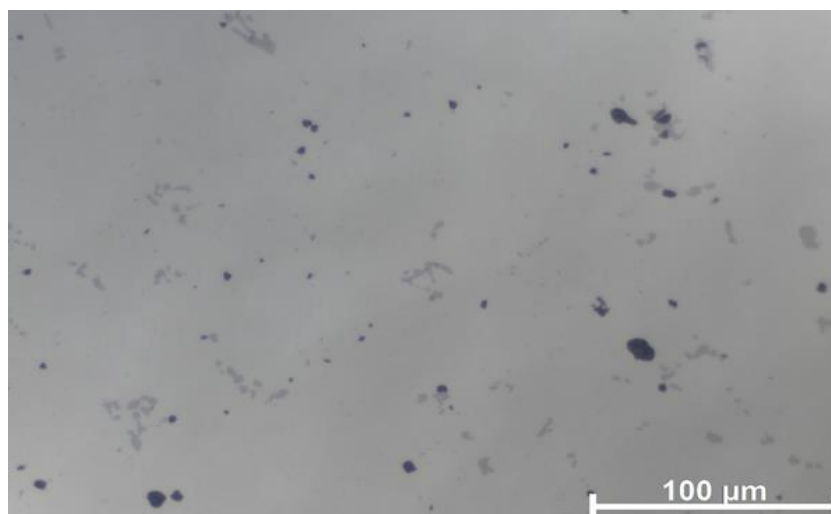
Figura 31: Micrografia da amostra 2, sem ataque químico com ampliação de 200x.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA via software AxioVision SE64

A figura 32 mostra a micrografia da amostra 2 (barra de 6 polegadas de diâmetro) do material como recebido, com ampliação de 1000x.

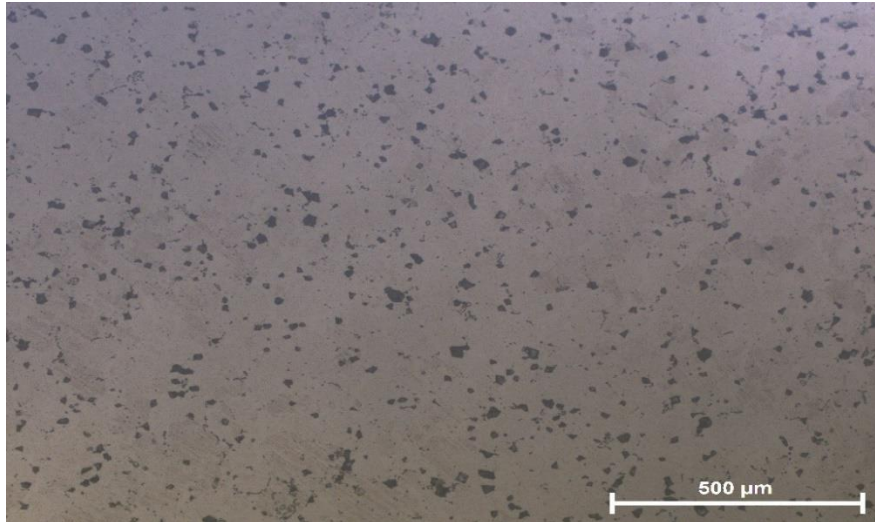
Figura 32: Micrografia da amostra 2, sem ataque químico com ampliação de 1000x.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA via software AxioVision SE64

A figura 33 mostra uma micrografia da amostra 3, que foi submetida apenas ao recozimento, seguida de um resfriamento lento (em forno), com ampliação de 200x. Nessa amostra foi utilizado ataque químico para auxiliar a visualização.

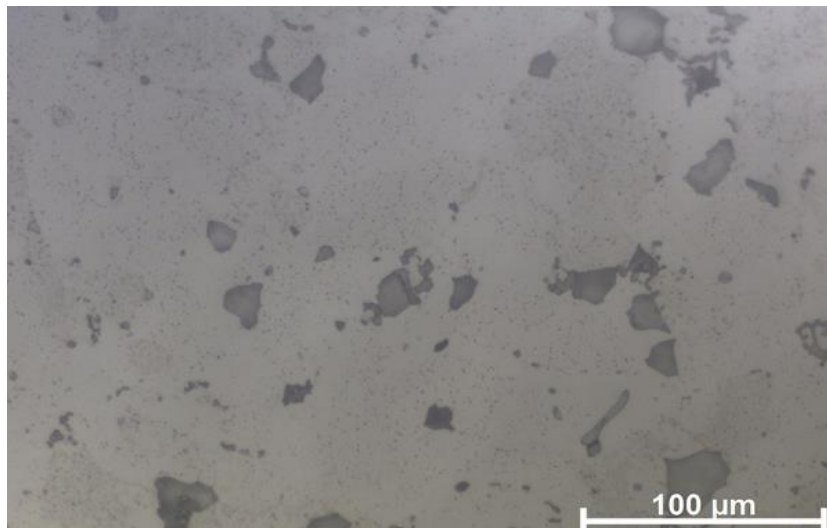
Figura 33: Micrografia da amostra 3, submetida a ataque químico com ampliação de 200x.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA via software AxioVision SE64

A figura 34 mostra uma micrografia da amostra 3, visualizada com auxílio de ataque químico e ampliação de 1000x.

Figura 34: Micrografia da amostra 3, submetida a ataque químico com ampliação de 1000x.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA via Software AxioVision SE64

A figura 35 mostra uma micrografia da amostra 4, sem auxílio de ataque químico e com ampliação de 200x.

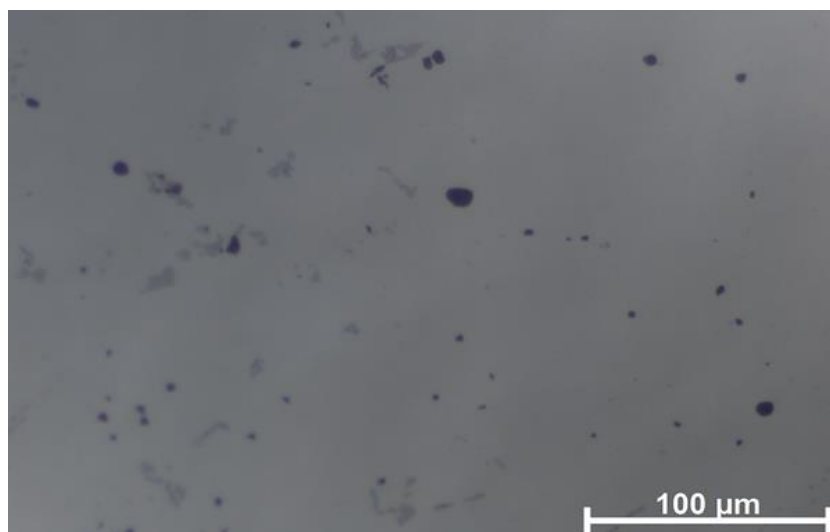
Figura 35: Micrografia da amostra 4, sem ataque químico e com ampliação de 200x.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA via Software AxioVision SE64

A figura 36 mostra uma micrografia da amostra 4, sem auxílio de ataque químico e com ampliação de 1000x.

Figura 36: Micrografia da amostra 4, sem ataque químico e com ampliação de 1000x



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA via Software AxioVision SE64

A figura 37 mostra uma micrografia da amostra 4, com a utilização de ataque químico, com ampliação de 200x.

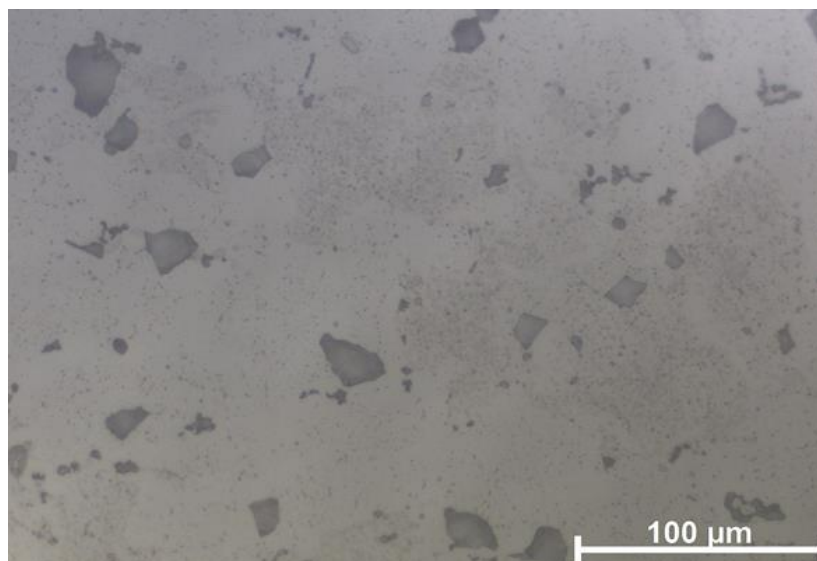
Figura 37: Micrografia da amostra 4, submetida a ataque químico com ampliação de 200x



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA via Software AxioVision SE64

A figura 38 mostra uma micrografia da amostra 4, visualizada com auxílio de ataque químico, com ampliação de 1000x.

Figura 38: Micrografia da amostra 4, submetida a ataque químico com ampliação de 1000x



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA via Software AxioVision SE64

CONCLUSÃO

Por meio do ensaio de composição química, realizado no espectrômetro de emissão óptica, foi possível classificar as barras cilíndricas, objetos iniciais do referido trabalho, como uma liga de Alumínio da série 6000, comercialmente classificada como liga AA6351.

O tratamento de recristalização realizado na amostra 3, permitiu que a liga AA6351 sofresse redução de dureza e recuperação de ductilidade, como pôde ser comprovado nos ensaios de dureza Rockwell e Microdureza Vickers.

Outra constatação foi a de que as oscilações de temperatura do forno tiveram um impacto relevante nos resultados de dureza Rockwell e microdureza Vickers. Devido a esse fato, algumas amostras podem ter sofrido o fenômeno conhecido como superenvelhecimento.

O ensaio de microdureza Vickers mostrou que uma amostra pode apresentar diferentes valores em regiões distintas. Regiões com maior número de precipitados endurecedores apresentam maiores valores de microdureza, em contrapartida, regiões com riscos e com planicidade comprometida apresentam valores menores.

De acordo com os experimentos realizados, conseguiu-se determinar qual a melhor combinação de parâmetros para aprimorar a dureza e a microdureza de uma liga de alumínio AA6351. A amostra 5 foi a que obteve os melhores resultados em comparação a todas as amostras tratadas termicamente.

Por fim os experimentos comprovaram que é possível alterar a dureza e microdureza da liga AA6351, através de tratamentos térmicos com controle rigorosos de tempo e temperatura, principalmente na etapa de precipitação artificial. Assim essa liga pode ter bom desempenho, na fabricação de artefatos que exijam variações de dureza e maior ductilidade durante suas etapas de fabricação e beneficiamento.

REFERÊNCIAS

ABAL (Associação Brasileira de Alumínio). Fundamentos e Aplicações do Alumínio. Maio de 2007.

ALCOA. **Ligas e Têmperas de extrusão**. Disponível em: <<http://www.alcoa.com/brasil/pt/default.asp>>. Acesso em: 25 nov. 2017.

ALVES, Gianni Ferreira; VIEIRA, Estéfano Aparecido and OLIVEIRA, José Roberto de. Influência do tempo e deformação na microestrutura de ligas de alumínio reciclado condicionadas para tixotomografia. Rem: Rev. Esc. Minas [online]. 2012, vol.65, n.1, pp.107-112. ISSN 0370-4467. <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672012000100015>.

ALFA, ALUMÍNIO. **Catálogo de produtos**. 2016. Disponível em: <HTTP://www.alfaaluminio.com.br/downloads/catalogo.pdf>. Acesso em 23 ago. 2016.

ALUMICOPPER. **Informações Técnicas ALUMÍNIO 6351**. 2018. Disponível em: <http://www.alumicopper.com.br/pdf/aluminio/info-tec-alumi_aluminio_6351.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2018.

ALUMÍNIO, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO. Tratamento Térmico. 1. ed. São Paulo : Associação Brasileira do Alumínio-ABAL, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A751 - 11: Standard test methods, practices, and terminology for chemical analysis of steel products. ASTM International.

ASM HANDBOOK, CASTING, v15, 9th edition, p1659, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A751 - 11: Standard test methods, practices, and terminology for chemical analysis of steel products. ASTM International.

BRESCIANI FILHO, ETTORE. Seleção de materiais não ferrosos. 2. ed. São Paulo: Editora da Unicamp, 1997.

BRITO, Raphaelson; QUEIROGA, Sandro; MACEDO, José. **CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E MICRODUREZA DE UMA LIGA DE AL-SI PROCESSADA POR FUNDIÇÃO SOB ALTA E BAIXA PRESSÃO**. 2014. 8 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Manaus, 2014.

CALLISTER JR, WILLIAM D. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

COSTA, Adalberto Vieira da; GUTIERREZ JUNIOR, Jurandir; RODRIGUES, Ricardo M. **Ensaio Mecânico de Materiais Metálicos**. 2009. 50 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Manutenção Industrial, Universidade de Mogi das Cruzes, São Paulo, 2009. Disponível em: <www.itensp.com.br>. Acesso em: 13 mar. 2018.

ELFER, Alumínio. **Características e Aplicações**. 2017. Disponível em: <<http://elfer.com.br/site/produtos/caracteristicas-e-aplicacoes/>>. Acesso em: 25 set. 2017.

ESPÓSITO, I.m.. **Caracterização Mecânica e Microestrutural da liga Al 6063 após Tratamentos Termomecânicos**. 2006. 10 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Ipen-usp, São Paulo, 2006.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro: Ltc, 2008. 247 p. p. 64-78.

HASKEL, Tatiane. **Efeito do Tratamento Térmico de Solubilização na Microestrutura e nas Propriedades Mecânicas da Liga de Alumínio A356**. 2009. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Engenharia Mecânica, Universidade do Estado de Santa Catarina - Udesc, Joinville, 2009. Disponível em: <<http://tede.udesc.br/handle/handle/1742>>. Acesso em: 14 mar. 2018.

MACEDO NETO, José Costa de et al. ESTUDO COMPARATIVO DA MICROESTRUTURA E MICRODUREZA DA LIGA AL-5%Si0,3%Mg ANTES E APÓS O TRATAMENTO TÉRMICO T6. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 72., 2015, Fortaleza. **Anais....** Fortaleza: Soea, 2015. p. 3 - 4.

MATWEB, LIGA 6351 T6. **Propriedades da liga 6351 t6**. <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ca1cf891973c4745b41677780dad6240>. Acesso em: 31 out. 2017.

MOREIRA, Paulo Sérgio. **Efeito da Taxa de resfriamento e dos Tratamentos Térmicos sobre as Propriedades Mecânicas da liga Al-Si-Mg(A356.0) Fundida**. 2011. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

OLIVEIRA, R.A.; O forjamento de ligas de alumínio – Um estudo para a liga ABNT 6061, Porto Alegre – RS, 2001. Dissertação (Mestrado em engenharia metalúrgica), UFRS-RS.

PARREIRAS, Luiz Guilherme Souza. **Avaliação dos Esforços de Corte no Torneamento da Liga de Alumínio Silício (a356) com Diferentes Anteligas**. 2014. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-rei, São João Del-rei, 2014.p. 21.

ROHDE, R. A. **Metalografia Preparação de Amostras**, Uma Abordagem Prática. Santo Ângelo, 2010. Disponível em: <<http://www.urisan.tche.br/~lemm/metalografia.pdf>>. Acesso em: 23 mai. 2018.

SILVA JUNIOR, Altino Ribeiro da. **Determinação das propriedades mecânicas da liga a356 conformada por spray para diferentes teores de ferro e condições de processamento**. 2008. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008. Disponível em: <www.btdt.ufscar.br/htdocs/tedeSimplificado//tde_busca/arquivo.php?>. Acesso em: 07 abr. 2016. p. 5-6.

SILVA, Pamella Stefanés da; BOING, Denis. INFLUÊNCIA DO ACABAMENTO DA SUPERFÍCIE NO ENSAIO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA POR ESPECTROSCOPIA DE EMISSÃO ÓPTICA. **Revista da Unifebe**, Brusque, v. 1, n. 11, p.5-6, jul. 2013. Disponível em: <periodicos.unifebe.edu.br/index.php/revistaeletronicadaunifebe/article/download/.../73>. Acesso em: 18 maio 2018.

SOUZA, S.A. Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos, Ed. Edgar Blücher Ltda., 1982 p 111-127.

VIANA, Carlos Sérgio da Costa. **Seleção dos Materiais: Alumínio e suas ligas**. 2009. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAUAZkAF/aluminio-suas-ligas>>. Acesso em: 15 mar. 2017.