

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA

GUSTAVO FERREIRA DUNIN

**ESTUDO DAS VARIAÇÕES DE MICROESTRUTURA E DUREZA DA
LIGA DE ALUMÍNIO A380 SUBMETIDA AOS TRATAMENTOS DE
RECOZIMENTO, HOMOGENEIZAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2018

GUSTAVO FERREIRA DUNIN

**ESTUDO DAS VARIAÇÕES DE MICROESTRUTURA E DUREZA DA
LIGA DE ALUMÍNIO A380 SUBMETIDA AOS TRATAMENTOS DE
RECOZIMENTO, HOMOGENEIZAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Profa. Ma. Sandra Mara Kaminski Tramontin

PONTA GROSSA

2018



TERMO DE APROVAÇÃO

**ESTUDO DA MICROESTRUTURA E DUREZA DA LIGA DE ALUMÍNIO A380
SUBMETIDA AOS TRATAMENTOS DE RECOZIMENTO, HOMOGENEIZAÇÃO E
SOLUBILIZAÇÃO**

por

GUSTAVO FERREIRA DUNIN

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 29 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.Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz
Membro Titular

Prof.Dr. Marcos Eduardo Soares

Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho

Coordenador do Curso

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a Profa. Ma. Sandra Mara Kaminski Tramontin, pelo comprometimento e carinho que sempre tratou do curso de Engenharia Mecânica da UTFPR-PG. Pela excelência e apoio na minha orientação, sem dúvidas, sem ela, nada disso seria possível.

À Profa. Ma. Heliety Rodrigues Borges Barreto, por sempre se mostrar solícita em auxiliar e tirar dúvidas a respeito do presente trabalho.

À todo o corpo docente do curso de Engenharia Mecânica e à Universidade Tecnologia Federal do Paraná.

Aos meus diversos colegas de curso, que, por sua maioria, sempre se mostraram solidários e compartilharam horas de estudos. Aos meus amigos Fabio Barbosa, Filipe Ongarato, Cristiano Dominoni e Carlos Henrique Diedrich; que caminharam junto comigo do início ao fim do curso.

Por fim, quero agradecer aos meu pais, Adriana Aparecida Ferreira Dunin e Léo Dunin, sem eles nada disso seria possível, todo o apoio e compreensão demonstrados no decorrer da minha jornada até aqui.

RESUMO

DUNIN, Gustavo Ferreira. **Estudo das Variações de Microestrutura e Dureza da Liga A380 aos Tratamentos de Recozimento, Homogeneização e Solubilização.** 2018. 48p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018

O alumínio e suas ligas apresentam uma infinidade de variações de características e aplicações, com isso, é importante conhecer as diferentes maneiras de se trabalhar com essas variações. A adição de diferentes elementos de ligas ou a utilização de alguns tratamentos térmicos podem causar mudanças benéficas ou não para o material. O objetivo desse trabalho é analisar a mudança que os tratamentos de recozimento, homogeneização e solubilização podem causar dentro da liga de alumínio A380 com temperatura de fundição de 630°C e 670°C, também foi utilizado uma liga com a adição de um refinador de grãos do tipo Al-gTi-1B. Depois da aplicação dos tratamentos térmicos, foi realizada toda a preparação metalográfica das amostras para a caracterização das ligas antes e depois dos tratamentos, foram utilizados o ensaio de microdureza Vickers e o estudo da metalografia das mesmas. Analisando os resultados obtidos notou-se um comportamento semelhante entre as amostras submetidas aos tratamentos térmicos. Com relação as micrografias obtidas, observou-se pequenas modificações estruturais que podem ser estudadas mais a fundo.

Palavras-chave: Liga A380. Tratamentos Térmicos. Recozimento. Homogeneização. Solubilização.

ABSTRACT

DUNIN, Gustavo Ferreira. **Study of the Variations of Microstructure and Hardness of the A380 Alloy to the Treatments of Annealing, Homogenization and Solubilization.** 2018. 48p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018

Aluminum and its alloys have a multitude of variations of characteristics and applications, so it is important to know the different ways of working with these variations. The addition of different alloying elements or the use of some heat treatments may cause beneficial or no beneficial changes to the material. The objective of this work is to analyze the changes that the treatments of annealing, homogenization and solubilization can cause within the A380 aluminum alloy with melting temperature of 630°C and 670°C, also an alloy was used with the addition of an Al type grain refiner -GTi-1B. After the thermal treatments were applied, the entire metallographic preparation of the samples was performed for the characterization of the alloys before and after the treatments, the Vickers microhardness test and the metallography study were used. A similar behavior was observed between the samples submitted to the heat treatments.

Keywords: League A380. Thermal Treatments. Annealing. Homogenization. Solubilization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - 670°C, 100x, sem ataque lote 1, com uso de refinador AL-5Ti-1B.	17
Figura 2 - 670°C, 100x, sem ataque lote 2, sem refinador	18
Figura 3 - 630°C, 100x, sem ataque lote 3, sem refinador	18
Figura 4 - Transformação das fases Al-Fe-Si.....	22
Figura 5 - Perfurador de Microdureza Vickers.....	26
Figura 6 - Fluxograma das etapas do procedimento experimental.....	27
Figura 7 – Demonstração do corte das amostras.....	28
Figura 8 – Forno Jung tipo Mufla de temperatura máxima 1200°C.	29
Figura 9 - (A) Embutidora Metalotest Maxipress; (B) Baquelite preto e desmoldante.	31
Figura 10 - Lixadeira Arotec APL-4.	32
Figura 11 - Polidora Vibratória.....	33
Figura 12 – Microscópio ótico Olympus modelo BX60.	34
Figura 13 – Visor microdurômetro Shimadzu.	35
Figura 14 - Lote 1, sem ataque 100x (a) Micrografia Inicial; (b) Tratamento de Recozimento a 250°C; (c) Homogeneização à 450°C; (d) Solubilização a 506°C.....	39
Figura 15 - Lote 2, sem ataque 100x (a) Micrografia Inicial; (b) Tratamento de Recozimento a 250°C; (c) Homogeneização à 450°C; (d) Solubilização a 506°C.....	40
Figura 16 - Lote 3, sem ataque 100x (a) Micrografia Inicial; (b) Tratamento de Recozimento a 250°C; (c) Homogeneização à 450°C; (d) Solubilização a 506°C.....	41
Gráfico 1 - Tratamentos Térmicos.....	19
Gráfico 2 - Tratamento Térmico de Solubilização/Precipitação.....	24
Gráfico 3 – Comportamento das microdurezas das amostras relacionadas ao tratamento térmico realizados.	38

LISTA DE TABELAS.

Tabela 1 – Propriedades físicas típicas do Alumínio, Aço e Cobre	14
Tabela 2 – Microdureza Vickers das composições originais.	16
Tabela 3 - Temperatura e tempo de tratamento das ligas de Alumínio.....	22
Tabela 4 – Grupos de amostras para Tratamento Térmico.....	29
Tabela 5 - Microdureza (HV) lote 670°C com refinador, sujeitos aos tratamentos de recozimento, homogeneização e solubilização.	36
Tabela 6 - Microdureza (HV) lote 670°C sem refinador, sujeitos aos tratamentos de recozimento, homogeneização e solubilização.	37
Tabela 7 - Microdureza (HV) lote 630° sem refinador, sujeitos aos tratamentos de recozimento, homogeneização e solubilização.	38

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVOS.....	12
2.1 OBJETIVO GERAL.....	12
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	12
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
3.1 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS.....	13
3.1.1 Liga de Alumínio A380.....	15
3.1.2 Uso de Refinador Al-5Ti-1B.....	15
3.1.3 Caracterização da Liga A380.....	16
3.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS.....	19
3.2.1 Recozimento de Ligas de Alumínio.....	20
3.2.2 Homogeneização de Ligas de Alumínio.....	21
3.3.3 Solubilização/Precipitação das Ligas de Alumínio.....	22
3.3 MICROSCOPIA ÓTICA DAS LIGAS DE ALUMÍNIO.....	24
3.4 MICRODUREZA VICKERS.....	25
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	27
4.1 CORTE DAS AMOSTRAS.....	28
4.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS.....	28
4.2.1 Tratamento Térmico de Recozimento.....	30
4.2.2 Tratamento Térmico de Homogeneização.....	30
4.2.3 Tratamento Térmico de Solubilização.....	30
4.3 PREPARAÇÃO METALOGRAFICA.....	31

4.3.1 Embutimento.....	31
4.3.2 Lixamento.....	32
4.3.3 Polimento.....	32
4.3.4 Polimento Vibratório.....	33
4.4 MICROGRAFIA.....	34
4.6 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS.....	35
5 RESULTADOS.....	36
5.1 MICRODUREZA VICKERS.....	36
5.2 ANÁLISE POR MICROSCOPIA ÓTICA.....	39
CONCLUSÃO.....	42
REFERÊNCIAS.....	43

1 INTRODUÇÃO

O alumínio tem se mostrado uma interessante alternativa dentro do ambiente industrial moderno, dentro dos metais não ferrosos é o mais importante e conhecido. Sua baixa densidade comparado com outros materiais que são aplicados dentro da indústria metalúrgica fazem com que o alumínio ganhe cada vez mais espaço e competitividade.

O aumento no consumo de alumínio é a prova do que esse material significa na indústria moderna, esse material segue o ferro entre os materiais de maior consumo anual (ABAL,2003).

Historicamente, o alumínio foi descoberto por Sir Humphrey Davi em 1809 e desde então a aplicação do alumínio vem tendo uma crescente dentro da indústria, devido a necessidade de desenvolver produtos mais sustentáveis. O alumínio possui outro aspecto interessante, ele pode ser combinado com outros materiais de engenharia, formando as ligas de alumínio.

O alumínio pode passar por alguns tratamentos térmicos e também adição de elementos de liga, fazendo com que suas propriedades mecânicas e físicas se alterem conforme a necessidade da aplicação do material (NETO, 2014).

Com o aumento do uso do alumínio e suas ligas, é importante conhecer os diversos processos de fabricação, assim como os tratamentos a que esse material é exposto. O estudo do comportamento das ligas de alumínio quando se faz o uso de tratamentos térmicos é muito importante, pois cada composição de liga e os parâmetros utilizados durante o processo fazem diferença no resultado final.

Esse estudo visa obter e comparar o comportamentos da liga A380 quando submetida aos processos de recozimento, homogeneização e solubilização.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a variação do comportamento mecânico e microestrutural da liga de alumínio A380 com e sem a adição de refinador de grãos tipo Al-5Ti-1B, sujeita aos tratamentos térmicos de recozimento, homogeneização e solubilização.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar a variação de microestrutura da liga sujeita aos tratamentos térmicos;
- Caracterizar mecanicamente as ligas tratadas termicamente utilizando ensaio de dureza Vickers;
- Caracterizar micro estruturalmente as ligas tratadas através de ensaios de microscopia ótica.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

Os materiais basicamente se distinguem entre três distintos grupos, sendo eles: metais, cerâmicos e poliméricos. Sua diferenciação se dá devido a diferença de composição química e estrutura atômica. As ligas de Alumínio, que se originaram no século 19, a partir da redução eletrolítica da alumina, se tornaram importantes no setor industrial, pois possuem algumas particularidades e vantagens com relação a outras ligas ferrosas (CALLISTER, 2011)

O professor Carlos Sérgio da Costa Viana relata as características principais do alumínio metal:

- Baixo peso;
- Elevada condutividade elétrica e térmica;
- Elevada ductilidade;
- Tem aplicabilidade na indústria alimentícia, pois não é tóxico;
- Pode ser submetido a diversos tratamentos térmicos para endurecimento;
- Baixa temperatura de fusão;

Tem-se duas maneiras de obter as ligas de alumínio, são divididas em alumínio primário e alumínio secundário. O primário é obtido por um processo denominado “Hall-Héroult” e o secundário é obtido através da reciclagem da sucata.

A designação final do alumínio determina em qual grupo as ligas se encaixam, basicamente se dividem em dois, as ligas para trabalho e conformação e as ligas para fundição.

- Ligas para trabalho e conformação: ligas que passam por processos de laminação, extrusão, forjamento, estiramento; que passam por algum tipo de processo de fabricação.
- Ligas para fundição: destinam-se a fabricação de elementos fundidos.

Conforme a ABAL, as ligas de alumínio dividem-se em ligas tratáveis termicamente e ligas não tratáveis termicamente. As ligas de alumínio se dão por uma combinação de elementos, que podem ser: Cobre, Magnésio, Silício, Manganês e Zinco. A maior característica do Alumínio e suas ligas é a versatilidade, sua combinação de propriedades podem tornar seu uso vantajoso em diversas situações, como em condições que se requer baixar o peso do componente sem perder tanta condutibilidade. A seguir, vê-se uma tabela comparativa do alumínio com o aço e cobre, dois dos principais elementos de fabricação dentro da indústria metalúrgica.

Tabela 1 – Propriedades físicas típicas do Alumínio, Aço e Cobre

Propriedades físicas típicas	Alumínio	Aço	Cobre
Densidade (g/cm³)	2,7	7,86	8,96
Temperatura de fusão (°C)	660	1500	1083
Módulo de elasticidade (GPa)	70	205	110
Coefficiente de dilatação térmica (L/°C);	23.10 ⁶	11,7.10 ⁶	16,5.10 ⁶
Condutibilidade térmica a 25°C (Cal/cm/°C)	0,53	0,12	0,94
Condutibilidade elétrica (%IACS)	61	14,5	100

Fonte: Adaptado de ABAL

Na comparação acima, pode-se notar que o alumínio se torna uma opção interessante devido a sua baixa densidade, por outro lado, em determinadas aplicações deve-se atentar a sua baixa temperatura de fusão. Sua condutividade térmica e elétrica é intermediária considerando os outros dois materiais.

As propriedades mecânicas das ligas de alumínio se alteram conforme os materiais escolhidos para composição de determinada liga, propriedades como dureza, ductilidade e condutividades (térmicas ou elétricas) podem sofrer alterações, por isso, se faz importante conhecer a composição ideal para determinado fim.

O alumínio quando fundido solubiliza outros metais e quando solidificado, alguns dos constituintes da liga podem ser retidos em solução sólida fazendo com que

o metal resultante fique mais resistente e mais duro. Quando ocorre esse resfriamento, pode ser que haja a precipitação do excesso dos elementos de liga da solução, os compostos intermetálicos podem gerar partículas duras. Esses compostos podem transformar a rede cristalina, fazendo com que haja um endurecimento da liga. (OLIVEIRA, 2011).

3.1.1 Liga de Alumínio A380

Essa liga, caracterizada pela presença do Silício, cobre e magnésio como elementos primário de composição, possui alta reciclabilidade e uma variedade de composição devido a quantidade de elementos adicionados à ela, assim como nas impurezas encontradas. Dentro da sua composição química, também pode-se encontrar elementos secundários como o níquel e estanho; sua microestrutura também se modifica a medida que encontramos elementos que possuem elevado potencial de modificação, podendo citar elementos como: titânio, manganês, fosforo, entre outros. Durante o processo de fundição, podem surgir impurezas, como o ferro, cromo e zinco (VERRAN, 2017)

Comparando a liga A380 com outras ligas, pode-se considerar que esta torna-se melhor opção quando se trata de processos de fundição, pois apresenta excelente fluidez e baixa solubilidade para gases. Seu ponto de fusão é considerado baixo, o que também influencia no processo de fundição. (VERRAN,2017).

3.1.2 Uso de Refinador – AL-5TI-1B

As ligas de Alumínio sofrem variação no tamanho de grão conforme a quantidade de núcleos de grãos no líquido e da velocidade de solidificação. Para que o material tenha um tamanho de grão menor, deve-se aumentar a velocidade de resfriamento ou o aumento do número de núcleos no líquido.

A técnica de refinamento de grãos tem a redução dos tamanhos das dendritas como principal objetivo. Outras modificações também são encontradas, como as

melhores condições de alimentação, alteração nos limites de escoamento e resistência e também a formação de trincas a quente.

Quando trata-se de uma liga que pretende-se tratar termicamente, é preciso tomar cuidado com o chamado “super modificação”, que pode diminuir a temperatura de resfriamento em até 7°C.

O refinador Ti-B forma agulhas de Al_3Ti que faz com que as partículas de TiB_2 sejam encobertas por essas mesmas partículas, melhorando o processo de refinamento. (LUMLEY, 2011)

3.1.3 Caracterização da Liga A380

Foram trabalhadas com 3 diferentes composições de liga de alumínio A380, dessas 3, uma foi fundida com a adição do refinador de grão AL-5Ti-1B e as outras duas sofreram alteração na temperatura de fusão atingida. Essas ligas foram fundidas no trabalho de conclusão de curso da Shayemme Oliveira de Pontes.

Na caracterização dos 3 lotes, foi empregado o ensaio de microdureza Vickers, na tabela 2 pode-se observar o comportamento da dureza desses materiais e que seu valor médio sofre uma leve alteração.

Tabela 2 – Microdureza Vickers das composições originais.

	Lote 1	Lote 2	Lote 3
	670°C com	670°C	630°C
	utilização de	sem	sem
	refinador	refinador	refinador
	100	102	105
	106	99,8	102
	102	99,6	108
	92	111	109
	95	108	106
	96	109	108
	102	102	109
	98,7	105	114
	103	103	110
MÉDIA	99	104	108

Fonte: Adaptado de Fontes, 2017.

A primeira amostra foi fundida com o uso do refinador AL-5Ti-1B e teve sua temperatura de fusão de 670°C. A seguir pode-se observar a micrografia original da amostra. Na figura 4, pode-se observar um refinamento das estruturas brutas de fusão das ligas Al-Si, o que se dá pelo fato da utilização do refinador de grãos. (PONTES, 2017)

Figura 1 - 670°C, 100x, sem ataque lote 1, com uso de refinador AL-5Ti-1B.



Fonte: Pontes, 2017

A segunda amostra não foi aplicada o refinador de grãos, e sua temperatura de fusão continuou a mesma, sendo de 670°C. Pode-se observar a formação dendrítica característica das estruturas brutas de fusão das ligas Al-Si.

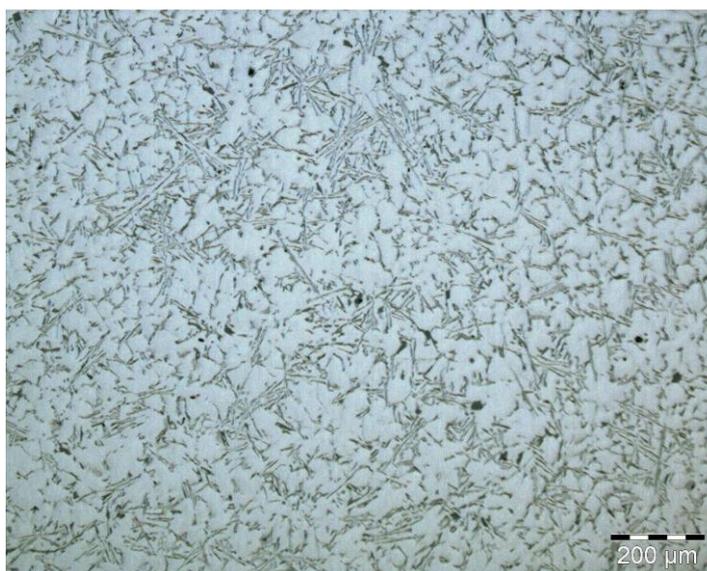
Figura 2 - 670°C, 100x, sem ataque lote 2, sem refinador



Fonte: Pontes, 2017

Por fim, a amostra 3 foi fundida sem a adição de refinador de grão, porém sua temperatura de fusão foi alterada para 630°C. Pode-se notar na figura 6, que a temperatura de fusão apresenta uma grande mudança na morfologia da liga, mostrando maior solubilidade da fase precipitada na fase matriz.

Figura 3 - 630°C, 100x, sem ataque lote 3, sem refinador



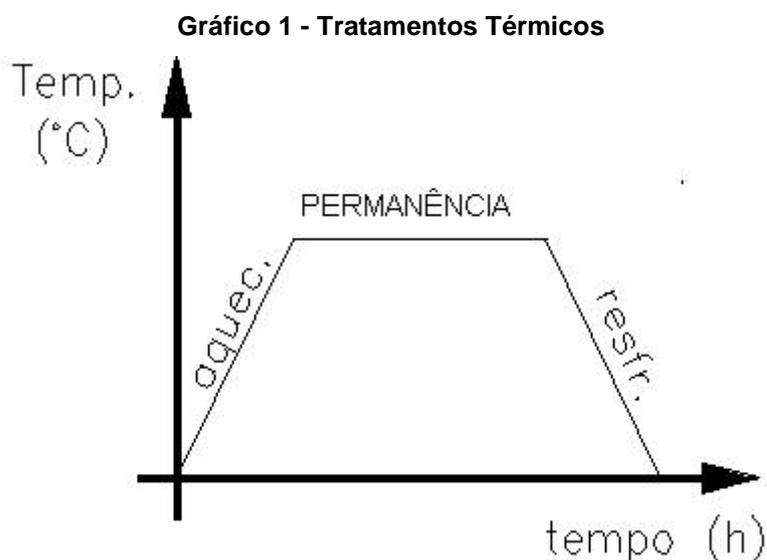
Fonte: Pontes, 2017

3.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS

O tratamento térmico consiste no aquecimento ou resfriamento controlado dos metais, tendo como objetivo alterar as propriedades físicas e mecânicas de um determinado material. Nas ligas de Alumínio, as operações estão restritas a operações específicas, tendo por objetivo o aumento da resistência e dureza por precipitação (ASM, 1998).

Alguns fatores influenciam diretamente nas propriedades finais do material, esses fatores variam de acordo com o tipo de tratamento a qual o metal será submetido e ao tipo de material. Esses fatores são: temperatura de aquecimento, tempo de permanência no forno, tipo de resfriamento e a atmosfera do forno.

A seguir, segue um gráfico 1 que ilustra esses fatores.



Fonte: Autoria Própria

Os tratamentos térmicos basicamente se dividem em dois grandes grupos, os tratamentos para redução de dureza, que tem por objetivo remover tensões residuais, reduzir a dureza, refinar os grãos e também podem ter por objetivo melhorar a tenacidade da liga tratada. O segundo grupo, trata-se do tratamento de endurecimento, que tem dois principais objetivos, aumentar a resistência mecânica e a resistência ao desgaste.

Conhecer o tratamento térmico a ser aplicado, é de suma importância conhecer os parâmetros a serem adotados. Por exemplo, saber se para determinado tratamento térmico é necessário atingir ou não a temperatura de austenitização do material, a qual também difere com o material adotado.

As ligas de alumínio denominadas “tratáveis termicamente” são sujeitas a tratamentos térmicos que tem como função alterar as características dos materiais. São divididas, principalmente em cinco tratamentos. São eles:

- Homogeneização;
- Solubilização/Envelhecimento;
- Recozimento Pleno;
- Recozimento Parcial;
- Estabilização;

3.2.1 Recozimento de Ligas de Alumínio

As ligas de alumínio, depois de passarem pelo processo de fundição e conformação mecânica, podem apresentar tensões desenvolvidas durante os processos de fabricação, o tratamento de recozimento tem por objetivo diminuir essas tensões, além de diminuir a dureza e melhorar a ductilidade. Vicente Chiaverini define o recozimento pleno e parcial da seguinte forma:

- Recozimento pleno: Geralmente o material é aquecido até uma temperatura acima da temperatura de recristalização seguido por um resfriamento lento. Esse tratamento pode ser aplicado em várias ligas Fe-C e a algumas ligas não ferrosas, como as de cobre e alumínio.
- Recozimento Parcial: Não é necessário atingir a temperatura de recristalização. Seu principal objetivo é reduzir as tensões originadas durante a solidificação.

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. Esse procedimento pode ser realizado entre as temperaturas de 200°C e 280°C, dependendo da porcentagem de redução aplicada na laminação a frio (CALLISTER, 2011).

3.2.2 Homogeneização de Ligas de Alumínio

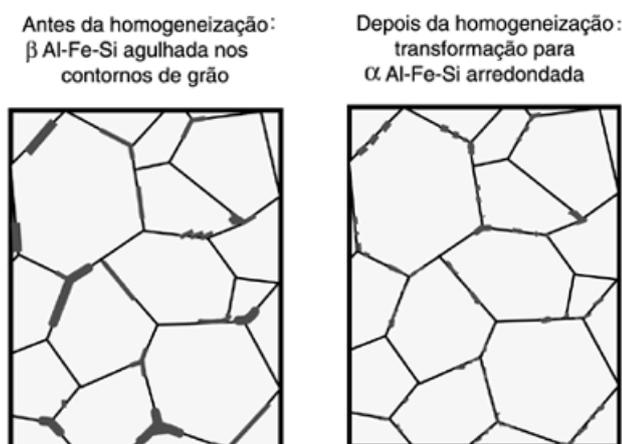
O tratamento de Homogeneização tem como principal objetivo remover ou reduzir significativamente as segregações, devido a estrutura heterogênea dos tarugos e placas fundidas de alumínio. Como o próprio nome já diz, esse tratamento procura transformar em uma estrutura homogênea, conseguindo atingir certas características estruturais.

O material é aquecido por um certo tempo em alta temperatura, onde o material se encontra em equilíbrio de fases. Esse tratamento também pode ser conhecido por pré-aquecimento do lingote.

Segundo a ABAL, a homogeneização não pode ser classificada exatamente como tratamento térmico, na realidade trata-se de um tratamento de condicionamento de microestrutura, visando o aumento da trabalhabilidade da liga.

O aquecimento do material próximo a temperatura do ponto de fusão da liga promove a redistribuição dos elementos presentes na liga dentro da estrutura, minimizando a microsegregação (ABAL, 2003).

A figura 1 ilustra a transformação das fases Al-Fe-Si.

Figura 4 - Transformação das fases Al-Fe-Si

Fonte: Abal et al, 2003

Em geral, o tratamento de homogeneização utiliza-se de temperaturas ao redor de 500°C, o que pode variar conforme a liga. O tempo de tratamento também varia de acordo com a liga utilizada, na tabela 2, pode-se observar as práticas comumente aplicadas dentro da indústria, embora na realidade do mundo competitivo industrial, cada fabricante tem seus próprios segredos para o tratamento das ligas específicas.

Tabela 3 - Temperatura e tempo de tratamento das ligas de Alumínio.

Ligas	Temperatura de Tratamento (Celsius)	Tempo de Tratamento (Horas)
1XXX - Al "Puro"	230-550	4
2XXX - Al-Cu(Mg/Mn)	485-520	4-12
3XXX - Al-Mn	570-625	4-40
4XXX - Al-Si	450-550	4-40
5XXX - Al-Mg(Mn)	520-535	5
6XXX	530-570	4
7XXX - Al-Mg-Zn(Cu)	460-480	8-24

Fonte: Adaptado de ABAL,2003

3.2.3 Solubilização e Precipitação das Ligas de Alumínio

Esse tratamento tem alguns efeitos que se tornam valiosos dependendo de onde pretende-se utilizar a liga, os limites de escoamento e resistência a tração

recebem um aumento significativo quando o tratamento é aplicado de maneira correta, além de uma considerável redução da ductilidade do material. No geral, esse tratamento é aplicado quando se pretende obter uma maior resistência mecânica.

No tratamento de solubilização, o aquecimento da liga se faz até uma temperatura que permita a dissolução dos precipitados (que gira em torno de 500°C para ligas de alumínio), contudo, o resfriamento é feito de maneira rápida, de forma a obter o silício ainda em solução sólida. A temperatura exata de aquecimento depende da liga que se está trabalhando (ABAL,2003).

O resfriamento geralmente é realizado em água, que previne temporariamente a precipitação dos elementos de liga.

Na prática, é importante delimitar a temperatura máxima de aquecimento, pois, se o aquecimento for realizado com uma temperatura muito alta, pode-se atingir o ponto de fusão dos elementos com menor valor de ponto de fusão, causando uma fusão localizada na liga. Essa alteração na liga pode constituir alguns problemas posteriores, como o acabamento e problemas com alteração localizada de propriedades mecânicas.

Segundo a ABAL, quanto mais alta a temperatura e mais longo o tempo de tratamento, maior a tendência para o crescimento de grãos recristalizados, o que também pode causar prejuízos nas propriedades mecânicas e acabamento.

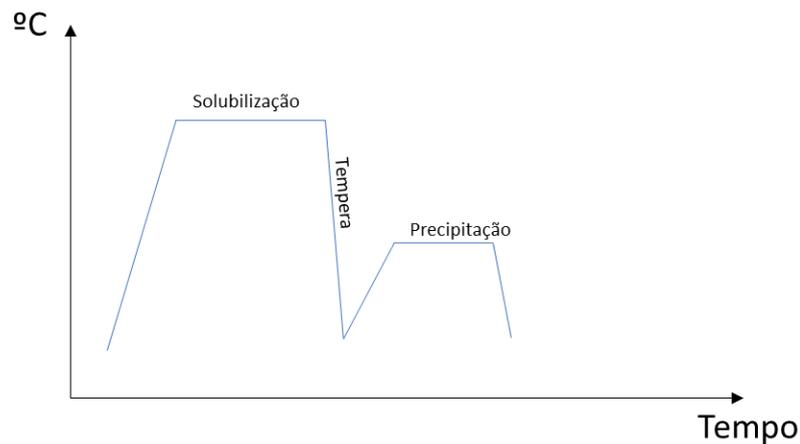
A precipitação causa um endurecimento que é obtido através da transformação das fases, essa transformação é obtida através de tratamentos térmicos apropriados, o tratamento térmico de solubilização seguido por tratamento térmico de precipitação (CALLISTER, 2011).

O endurecimento por precipitação ocorre porque existe interação entre os campos de tensão associados as discordâncias e aos precipitados. Pode-se comparar ao esforço para separar o ímã do aço, onde para movimentar as discordâncias “ancoradas” pelos precipitados é necessária a aplicação de uma tensão adicional que se reflete no endurecimento do material (ABAL, 2003).

O processo de precipitação consiste em aquecer uma solução sólida até uma temperatura que aumentem as taxas de difusão e onde as partículas finas e dispersas de precipitados começam a se formar com composições C_{β} . Após o tempo necessário de tratamento, a liga é resfriada a temperatura ambiente. Para algumas ligas, o

envelhecimento ocorre à temperatura ambiente por longos períodos de tempo (CALLISTER). A seguir, no gráfico 2 pode-se observar como se comporta o tratamento de solubilização e precipitação.

Gráfico 2 - Tratamento Térmico de Solubilização/Precipitação.



Fonte: Autoria Própria

3.3 MICROSCOPIA ÓPTICA

A metalografia pode ser considerada uma das análises mais importantes dentro do processo de fabricação, assim como se faz importante para estudos de diferentes tipos de materiais. Trata-se de um estudo dos produtos metalúrgicos, com o auxílio de um microscópio, onde pode-se determinar seus constituintes e sua textura.

O processo inclui a preparação metalográfica das amostras, isto é, usualmente as amostras são lixadas e polidas de diferentes formas. O ataque químico com um reagente químico também pode ser empregado de maneira a melhorar a visualização da composição da liga (BAPTISTA, NASCIMENTO, ROSESTOLATO, 2009). A amostra obtida através do microscópio é chamada de micrografia.

A microscopia ótica é muito importante dentro da metalografia, trata-se de uma das técnicas mais antigas para observar a estrutura do material. Dependendo do

poder de ampliação do microscópio é possível ampliar a imagem de um objeto, ou, no caso, de uma amostra de um determinado material.

Como dito anteriormente, preparação da amostra é uma técnica importante para a análise metalográfica do material. Uma preparação adequada é constituída dos seguintes itens:

- Lixamento: Usualmente realizado de forma manual, onde o objetivo é tornar a superfície o mais plana possível, é utilizado uma sequência de lixas, alterando sua granulação de forma que seus riscos fiquem cada vez mais finos.
- Polimento: Utiliza-se substâncias abrasivas muito finas dispersas em uma solução lubrificante. O polimento eletroquímico também pode ser empregado nesse processo, onde a amostra fica imersa em uma solução eletrolítica e sofre um ataque químico. O objetivo continua sendo o mesmo para ambos os casos, deixar a superfície a mais espelhada possível.

3.4 MICRODUREZA VICKERS

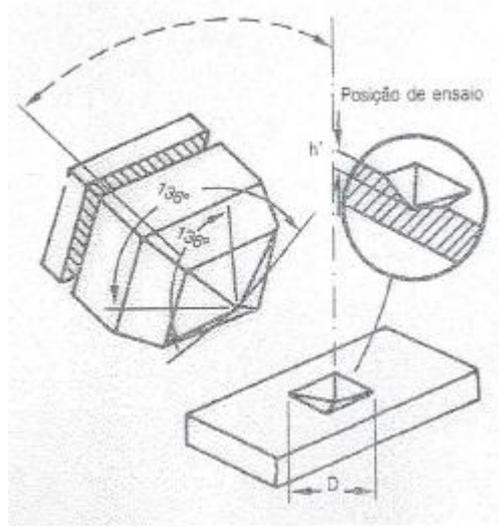
Para se conhecer um material, é de suma importância conhecer sua dureza, que se trata da resistência de um material a uma deformação plástica localizada. Ao longo dos anos, diversas técnicas e ensaios de dureza foram desenvolvidos, constituída de um pequeno penetrador que é forçado contra a superfície do material a ser testado, isso, em condições de carga controlada e taxa de aplicação (CALLISTER, 1985).

Há várias formas de realizar identificar a dureza dos materiais, dentre os ensaios mais conhecidos, pode-se citar o de dureza Rockwell, Brinell e o Vickers. Em ambos os três, faz-se o uso de um penetrador, que deixa uma marca no material, essa impressão se relaciona diretamente com o índice de dureza do material.

O ensaio de microdureza Vickers, por se tratar de um ensaio não-destrutivo, de torna interessante por deixa uma pequena marca no material. Essa marca é constituída a partir de um penetrador de diamante, que deixa duas marcas diagonais na superfície do corpo de prova. (ROY, 2013).

A primeira vez que essa técnica foi realizada, foi em 1925 por Smith e Sandland, que posteriormente foram homenageados nas máquinas que operam essa técnica. O indentador de diamante, presente na figura 5, possui base quadrada com um ângulo de 136° entre as faces opostas.

Figura 5 - Perfurador de Microdureza Vickers



Fonte: <http://mecanica-blog.blogspot.com/2010/05/dureza-vickers-hv-1925.html>

A carga utilizada para o cálculo desse dito de dureza pode variar de 1 até 120 kgf, a qual é aplicada lentamente sobre a superfície por volta de 18 segundos. O cálculo da dureza é obtido através da equação:

$$HV = \frac{\text{carga aplicada}}{\text{area da superfície piramidal}} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

Carga aplicada = N/mm² ou kgf/mm²

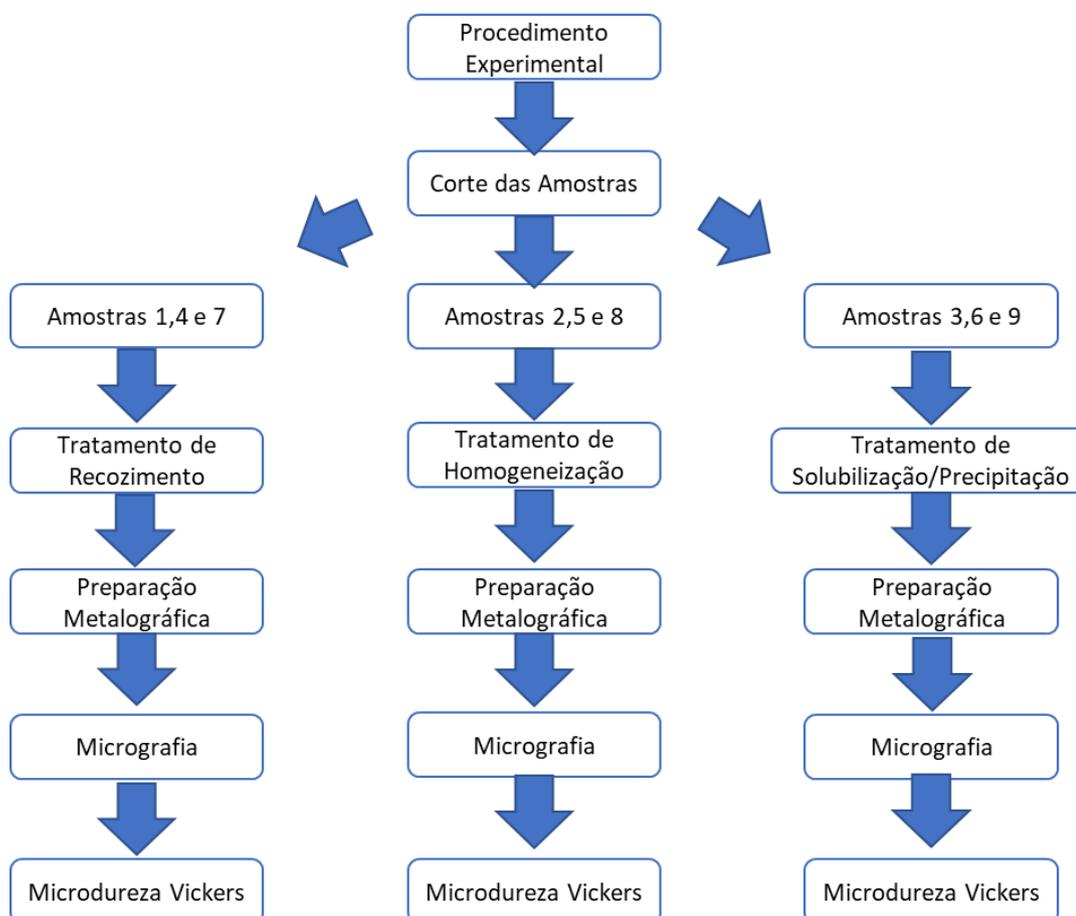
Área da superfície piramidal = mm²

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Todo o procedimento experimental foi realizado nos Laboratórios de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) no campus de Ponta Grossa. Neste tópico serão discutidos os materiais e procedimentos utilizados para o desenvolvimento do trabalho.

Cada etapa e os materiais utilizados serão discutidos conforme o fluxograma da figura 7.

Figura 6 - Fluxograma das etapas do procedimento experimental.

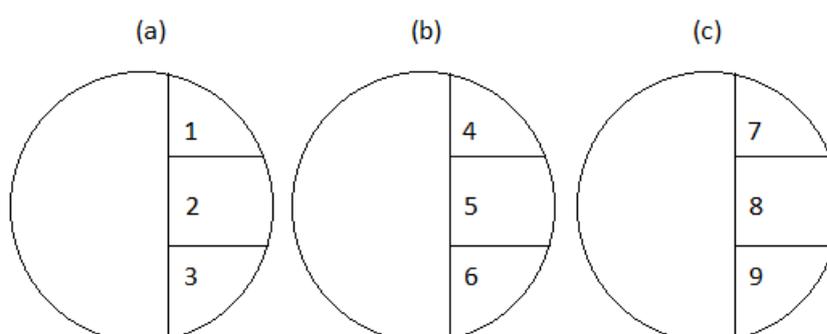


Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

4.1 CORTE DAS AMOSTRAS

As amostras consideradas padrão para este trabalho (originais), foram cortadas em 3 segmentos. Originaram-se então nove amostras, que foram divididas em 3 grupos iguais, onde, para cada grupo aplicou-se um tratamento térmico diferente, sendo eles: Recozimento, Homogeneização e Solubilização. Com o auxílio de uma cortadora, as amostras foram cortadas conforme a figura 7.

Figura 7 – Demonstração do corte das amostras.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Após o corte, originaram-se 9 novas amostras, dispostas conforme a figura acima, posteriormente foi realizado os tratamentos térmicos, seguidos pela preparação metalográfica, ensaio de microdureza e micrografia.

4.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Para a realização dos tratamentos térmicos, foi utilizado um forno tipo mufla da marca Jung que pode ser observado na figura 8, de temperatura máxima de 1200°C. Os tratamentos foram realizados dentro do laboratório de caracterização de materiais.

Figura 8 – Forno Jung tipo Mufla de temperatura máxima 1200°C.



Fonte: AUTORIA PROPRIA

Foram aplicados três diferentes tratamentos: Recozimento, Homogeneização e Solubilização, a tabela 4.

Tabela 4 – Grupos de amostras para Tratamento Térmico.

Tratamento Térmico	Amostras
Recozimento	1,4 e 7
Homogeneização	2,5 e 8
Solubilização/Precipitação	3,6 e 9

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Com a caracterização previa das amostras sem os tratamentos térmicos, essas 9 amostras seriam submetidas ao ensaio de microdureza Vickers e análise das micrografias, para comparação e verificar quais foram os efeitos que cada tratamento causou nas características originais.

4.2.1 Tratamento Térmico de Recozimento

As amostras 1,4 e 7 foram submetidas ao tratamento de Recozimento, para isso, segundo a literatura, as amostras ficaram dentro do forno durante o período de 8 horas a uma temperatura de 260°C. O tempo de tratamento iniciou a partir do momento em que o forno estabilizou.

O resfriamento adotado nesse tratamento foi em forno, ou seja, após o forno ser desligado, esperou-se com ele fechado por cerca de 24 horas, tempo suficiente para que a temperatura dentro do forno se iguale-se a temperatura ambiente.

4.2.2 Tratamento Térmico de Homogeneização

O segundo tratamento escolhido para as amostras foi o de Homogeneização. Para isso, os parâmetros adotados para o tratamento das amostras 2,5 e 8 foi mantê-las durante 8 horas a temperatura de 450°C.

O mesmo tipo de resfriamento foi empregado, o resfriamento lento, onde as amostras ficaram dentro do forno fechado por cerca de 24 horas, até que o equilíbrio térmico fosse atingido.

4.2.3 Tratamento Térmico de Solubilização

O terceiro tratamento empregado nas amostras 3,6 e 9 foi o tratamento de Solubilização, a temperatura de tratamento utilizada foi de 506°C durante 6 horas.

O resfriamento escolhido nesse tratamento foi o rápido, para isso, as amostras foram mergulhadas em água que estava com temperatura de $\pm 15^\circ\text{C}$ por um período de 15 minutos. As amostras tratadas ficaram expostas a temperatura ambiente após o resfriamento em água. O tempo de envelhecimento natural foi de 24 horas.

Considerou-se também, que esta composição de liga, após solubilizada poderia sofrer precipitação natural, gerando precipitados endurecedores ocasionando incremento de dureza às amostras tratadas. Portanto não houve tentativa de realização de tratamento de precipitação artificial para as amostras solubilizadas.

4.3 PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA

Com os tratamentos térmicos finalizados, começaram as preparações metalográficas das amostras, os processos utilizados foram:

- I. Embutimento;
- II. Lixamento;
- III. Polimento;
- IV. Polimento Vibratório.

4.3.1 Embutimento

Como as amostras possuíam tamanho pequeno, foi realizado o embutimento das amostras, utilizando o equipamento embutidora METALOTEST MAXIPRESS, figura 9. As amostras foram embutidas com baquelite preto, também foi utilizado um desmoldante para facilitar a remoção das amostras embutidas do equipamento.

Durante esse processo, como o equipamento havia passado por manutenção, teve-se o cuidado de não ultrapassar em muito a pressão de 100bar, o tempo de embutimento escolhido foi de 18 minutos.

Figura 9 - (A) Embutidora Metalotest Maxipress; (B) Baquelite preto e desmoldante.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

4.3.2 Lixamento

A seguir, como as amostras já apresentavam um bom acabamento superficial, foi utilizada uma lixa de granulometria de #1200 para a retirada do excesso de material provocado pelo embutimento das amostras. O tempo de lixamento variou conforme as amostras, em média, cada amostra foi lixada por aproximadamente 15 minutos.

A lixadeira utilizada para o procedimento foi da marca Arotec, conforme a figura 10.

Figura 10 - Lixadeira Arotec APL-4.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

4.3.3 Polimento

Com as amostras devidamente lixadas, iniciou-se o polimento das mesmas, foi utilizado um disco polidor de feltro com suspensão de diamante de 1 µm para deixar a superfície com melhor acabamento. Porém, o acabamento alcançado não foi o ideal para visualização da micrografia das amostras, então foi alterado o disco de polimento

e utilizado a suspensão de diamante de 0,3 μ m. O equipamento utilizado para polir as amostras foi o mesmo Arotec APL-4.

Todas as amostras, passaram pelo mesmo procedimento, sendo que cada uma delas, ficou aproximadamente 1 hora sendo polida. Durante todo o processo, a suspensão de diamante era continuamente colocada no disco de polimento, conforme a necessidade do processo.

4.3.4 Polimento Vibratório

Com o polimento com a solução de diamante concluído, as amostras ainda necessitavam de um melhor acabamento, para isso, foi empregado o processo de polimento vibratório, dentro do laboratório de materiais da UTFPR-PG, utilizando um equipamento da marca Buehler, modelo VibroMet 2, conforme mostra a figura 11.

Figura 11 - Polidora Vibratória.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

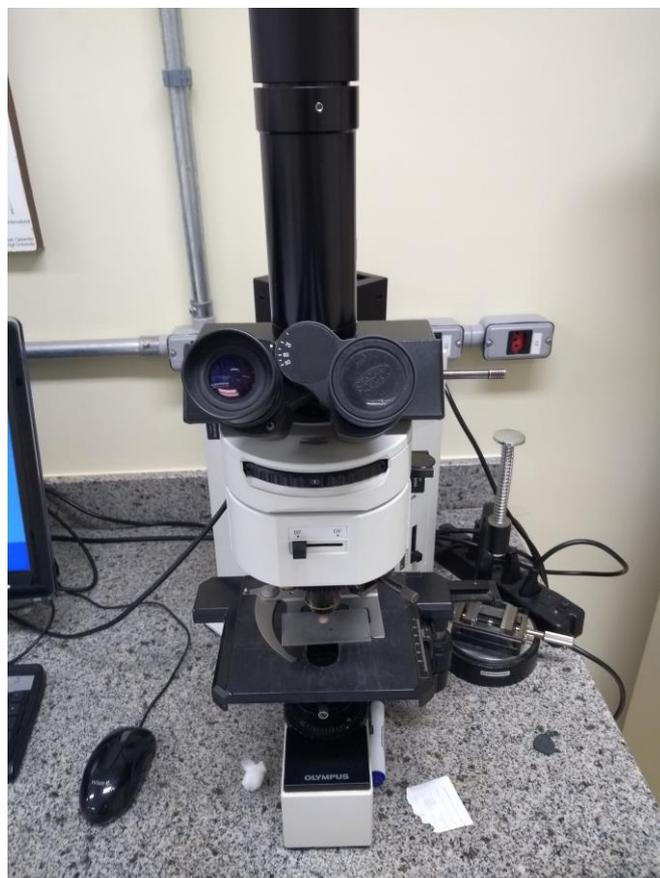
As amostras ficaram dentro do equipamento por cerca de 5 horas, até que sua superfície ficasse isenta de imperfeições, visando a melhor visualização das micrografias de suas respectivas amostras.

4.4 MICROGRAFIA

Para a realização da microscopia ótica foi utilizado um microscópio ótico da marca OLIMPUS modelo BX60 na figura 12, para isso, as fotografias foram capturadas com o auxílio do Olympus Image Analysis Software, tendo sempre o cuidado para colocar as escalas de forma correta.

As regiões foram escolhidas de maneira que se pudesse melhor observar as fases e a microestrutura constituinte de cada amostra.

Figura 12 – Microscópio ótico Olympus modelo BX60.



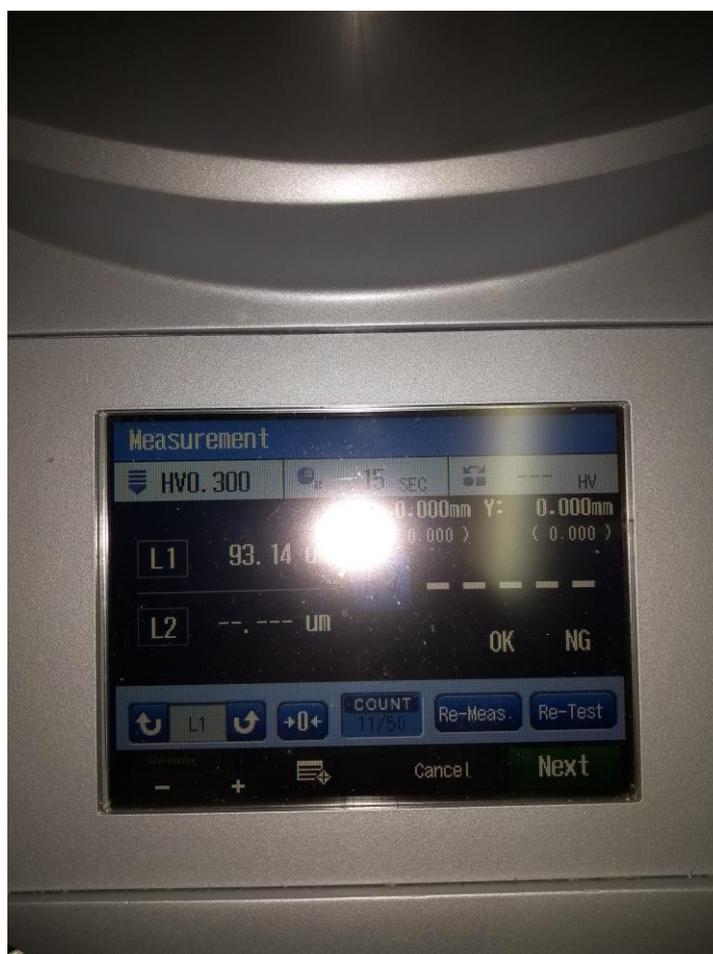
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

4.5 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

O ensaio de microdureza foi realizado pelo equipamento da marca Shimadzu, dentro do laboratório de materiais da UTFPR-PG. Para isso, foram realizadas 5 diferentes medições em cada amostra, essas medições foram realizadas de forma aleatória, respeitando a distância mínima entre uma marcação e outra, pois toda a amostra foi tratada de maneira igual.

Os parâmetros utilizados para a realização do ensaio de microdureza foram de carga igual a 0,3 Kgf pelo tempo de 15 segundos. Esses parâmetros, podem ser visualizados da figura 13.

Figura 13 – Visor microdurômetro Shimadzu.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

O equipamento, a partir da medida das diagonais da indentação, calcula a microdureza na escala Vickers (HV).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 MICRODUREZA VICKERS

A partir dos resultados obtidos pela técnica de microdureza Vickers, pode-se verificar a variação de comportamento mecânico (dureza) das amostras tratadas termicamente.

Pelos valores da tabela 5, pode-se observar que a amostra padrão (somente fundida) mostrou-se sensível aos tratamentos térmicos pelos quais foi submetida, modificando, sofrendo alterações na sua propriedade mecânica de dureza.

O tratamento de homogeneização foi o que promoveu queda de dureza de aproximadamente 21%, quando comparada a liga original.

A amostra solubilizada obteve um acréscimo de 11% de dureza, resultando então em uma amostra que provavelmente sofreu precipitação natural depois de resfriada em água.

Quando comparamos a dureza inicial com a obtida depois do tratamento de recozimento, percebe-se que essa recebeu um decréscimo de 8%.

Tabela 5 - Microdureza (HV) lote 670°C com refinador, sujeitos aos tratamentos de recozimento, homogeneização e solubilização.

Amostra 1			
Microdureza Inicial	Recozimento	Homogeneização	Solubilização
	91,5	76,2	106
	86,9	76,6	120
	100	72,1	113
	90,7	89,7	110
	86,1	75,5	101
Média			
99	91,04	78,02	110

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Na tabela 6, observa-se que a amostra padrão de composição A380 sem a utilização do refinador de grãos também sofreu alterações na sua propriedade mecânica de dureza.

O tratamento de homogeneização foi o que promoveu queda de dureza de aproximadamente 24%, quando comparada a liga original.

A amostra solubilizada obteve dureza maior que a obtida nos outros dois tratamentos, porém ficou com dureza 13% abaixo do padrão, resultando então em uma amostra onde não houve, ou houve baixa formação dos precipitados em temperatura ambiente. A dureza também diminuiu no tratamento de recozimento, sofrendo uma alteração de 16%.

Tabela 6 - Microdureza (HV) lote 670°C sem refinador, sujeitos aos tratamentos de recozimento, homogeneização e solubilização.

Amostra 2			
Microdureza Inicial	Recozimento	Homogeneização	Solubilização
	88,8	78,7	78,4
	84,4	82,7	87,8
	87,6	81	94,2
	90,5	74,2	95,9
	85,3	79,8	95,9
Média			
104	87,32	79,28	90,44

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Na tabela 7, encontra-se os resultados obtidos para as amostras tratadas e comparadas com a padrão de composição.

Este foi o grupo de amostras em que houve menor variação de dureza entre as amostras tratadas termicamente. Mantendo ainda a mesma tendência de comportamento, onde o tratamento de homogeneização foi o que gerou menor dureza.

A amostra solubilizada também obteve maior dureza, mas ainda com dureza 5% abaixo da amostra padrão.

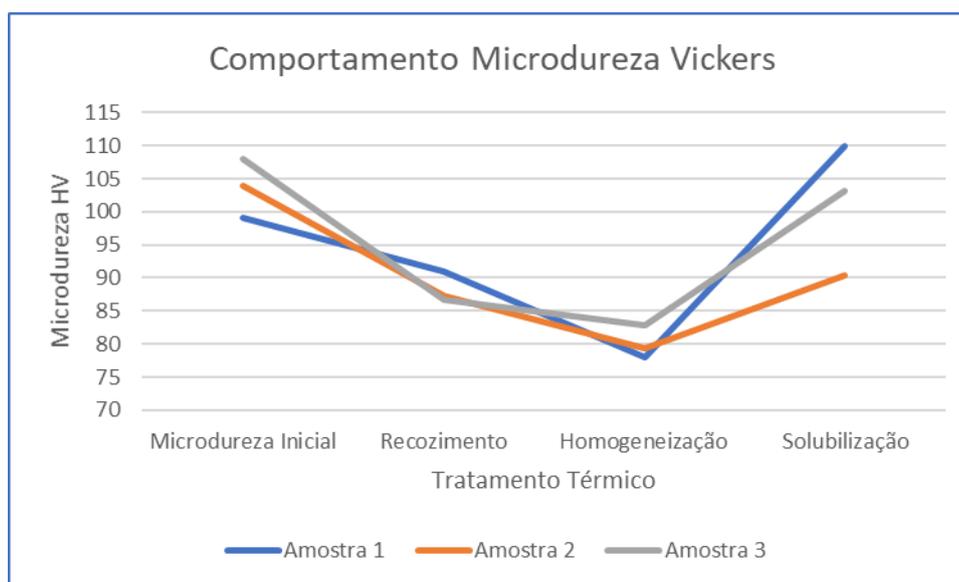
Tabela 7 - Microdureza (HV) lote 630º sem refinador, sujeitos aos tratamentos de recozimento, homogeneização e solubilização.

Amostra 3			
Microdureza Inicial	Recozimento	Homogeneização	Solubilização
	84,9	81	102
	88,8	78	102
	84	80,2	101
	90,5	87	105
	85,3	88,1	106
Média			
108	86,7	82,86	103,2

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Com os resultados obtidos, notou-se um comportamento semelhante nos tratamentos térmicos aplicados, conforme pode-se observar no gráfico 3 em que as amostras sofrem um decréscimo na microdureza Vickers nos tratamentos de recozimento e homogeneização, enquanto quando são submetidas ao tratamento de solubilização, voltam a apresentar maior dureza quando comparada aos outros tratamentos.

Gráfico 3 – Comportamento das microdurezas das amostras relacionadas ao tratamento térmico realizados.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

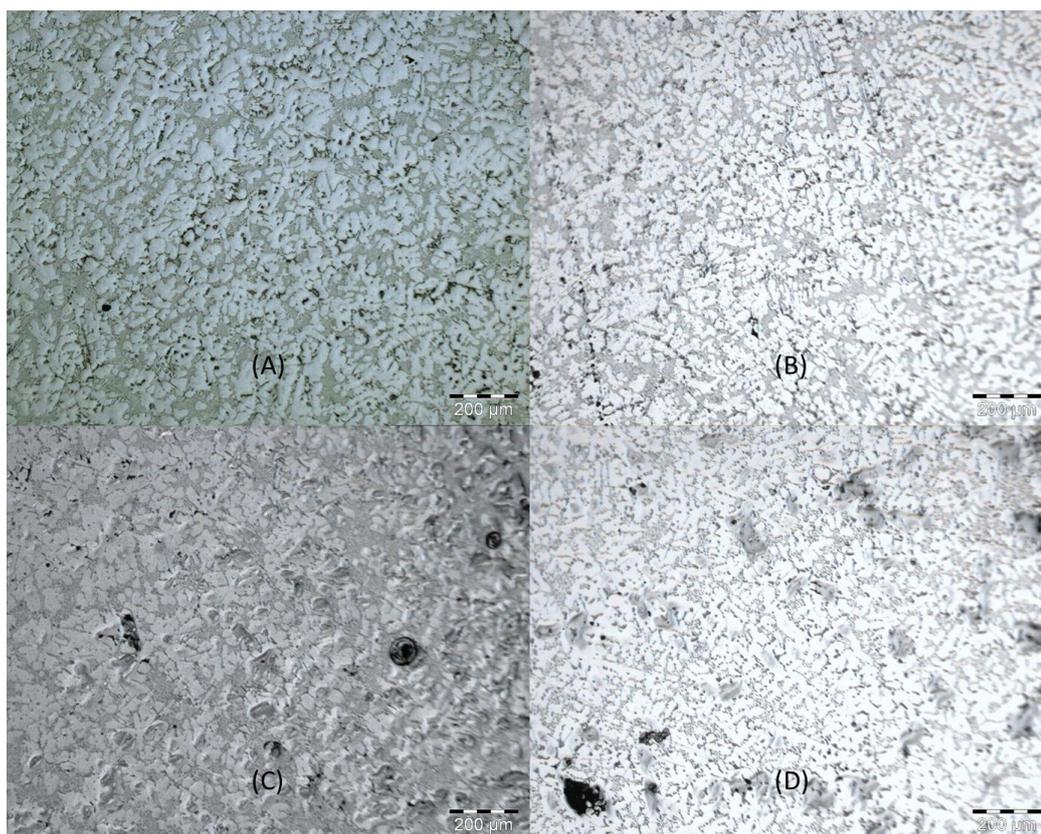
5.2 ANÁLISE POR MICROSCOPIA ÓTICA

As figuras 15 (a) até (d) representam as micrografias obtidas das amostras tratadas termicamente, bem como da amostra fundida padrão.

Pela avaliação por microscopia ótica, não se pôde observar de forma significativa grandes mudanças morfológicas entre as amostras tratadas e a padrão. Sugerindo-se uma maior investigação pela técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura, onde provavelmente precipitados mais refinados podem ser visualizados.

Na amostra 14 (d) observa-se um discreto refinamento de grão em relação a figura 14(a).

Figura 14 - Lote 1, sem ataque 100x (a) Micrografia Inicial; (b) Tratamento de Recozimento a 250°C; (c) Homogeneização à 450°C; (d) Solubilização a 506°C.

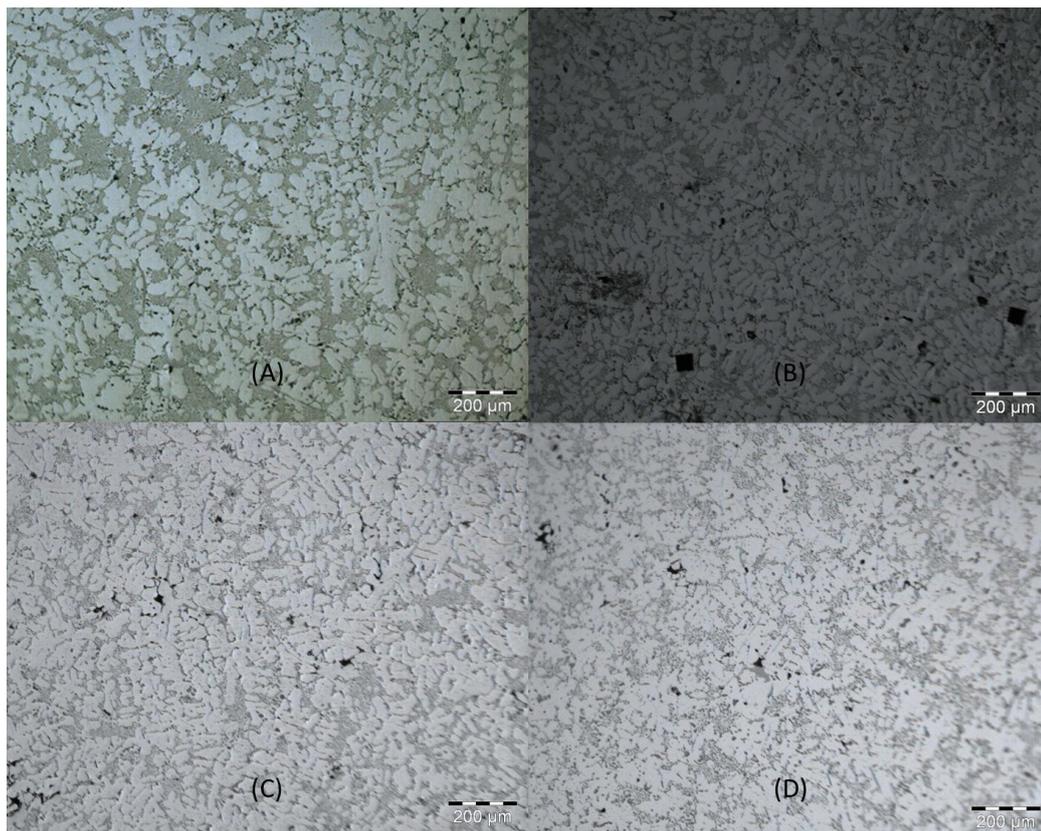


Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

As figuras 15 (a) até (d) representam as micrografias obtidas das amostras tratadas termicamente, bem como da amostra fundida padrão.

Nesta composição também, não se observou de grandes variações morfológicas entre as amostras tratadas e a padrão. Porém estas aparecem mais visíveis que na composição anterior desde o primeiro tratamento, mesmo sendo discretas.

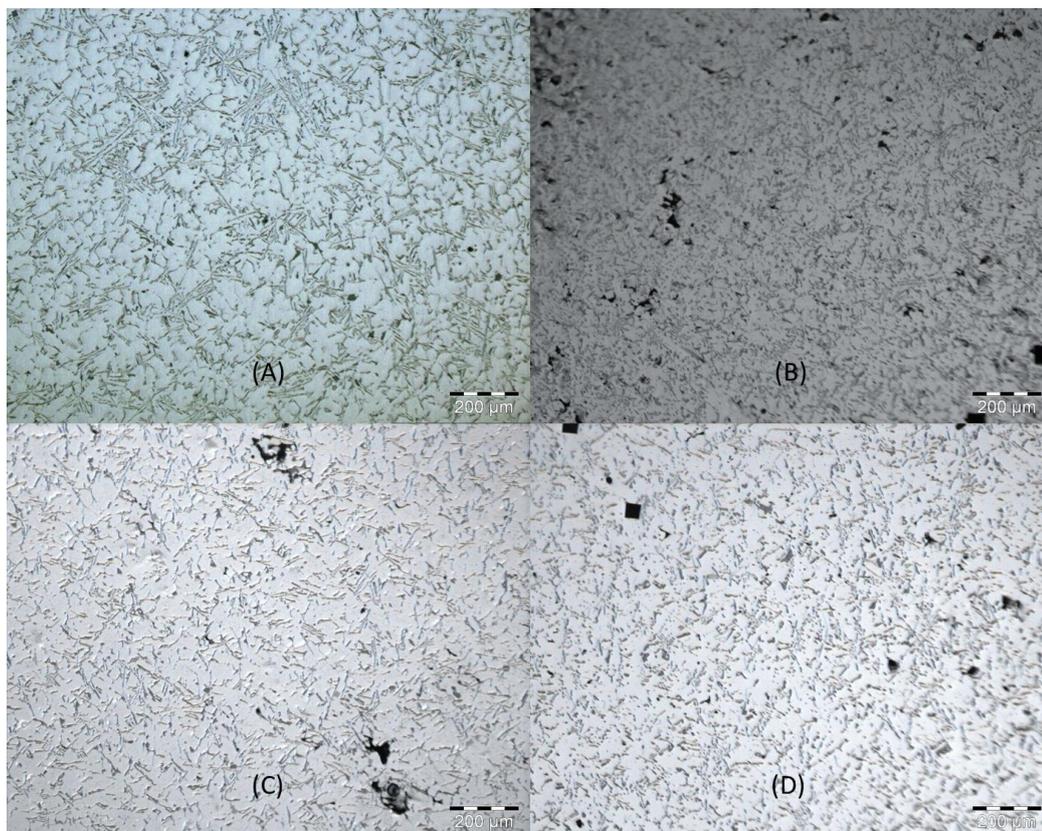
Figura 15 - Lote 2, sem ataque 100x (a) Micrografia Inicial; (b) Tratamento de Recozimento a 250°C; (c) Homogeneização à 450°C; (d) Solubilização a 506°C.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Nas micrografias da composição representada nas figuras 16 (a) até (d) observou-se a mesma tendência de comportamento da liga do lote 2, onde as discretas variações morfológicas puderam ser notadas desde o primeiro tratamento, mesmo sendo discretas.

Figura 16 - Lote 3, sem ataque 100x (a) Micrografia Inicial; (b) Tratamento de Recozimento a 250°C; (c) Homogeneização à 450°C; (d) Solubilização a 506°C.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

CONCLUSÃO

A liga de alumínio fundida A380 com e sem a adição de refinador de grãos tipo Al-5Ti-1B, apresentou variações de dureza após a realização dos tratamentos térmicos de recozimento, homogeneização e solubilização, como comprovado pelos ensaios de microdureza Vickers.

Para todos os lotes de amostras, tratadas termicamente ensaiadas, repetiu-se a mesma tendência de comportamento quanto a variação de dureza: para os tratamentos de recozimento e homogeneização a dureza das amostras diminuíram em relação ao lote original (sem tratamento).

Já em relação ao tratamento térmico de solubilização, somente para a liga que utilizou refinador na sua composição (lote 1) houve acréscimo de dureza em relação a liga original.

Quando comparados os resultados obtidos através da microdureza Vickers, é possível concluir que essa liga sofre maior alteração quando aplicou-se o tratamento de homogeneização, sofrendo alteração de em média 22%.

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: 26 mar. 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.

ARAÚJO, SACHA K., **Efeito da modificação com estroncio na microestrutura e nas propriedades mecânicas da liga alumínio-sílcio 356**. UDESC, 2012.

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

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.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica: Processos de fabricação e tratamento**. Vol. 2,2 ed. p.2. São Paulo, 1986.

ELFER, Alumínio. **Características e Aplicações**. 2017. Disponível em: <<http://elfer.com.br/site/produtos/caracteristicas-e-aplicacoes/>>. Acesso em: 25 abril. 2018.

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

LUMLEY, R. **Fundamentals of aluminium metallurgy: Production, processing and applications**. Cambridge, UK. Woodhead Publishing, 2011, 843 p.

KORI, S. A; MURTY, B. S.; CHAKRABORTY, M. **Development of grain refiner for Al-7Si alloy**. *Materials Science and Engineering*, v. 280, 2000

NETO, Rui J. L.; **Tratamentos térmicos das ligas de alumínio**. ISEP, 2014. Disponível em: <http://www.aluminio100porcento.com/uploads/files/1_tratamento_t%C3%A9rmico_de_ligas_de_alum%C3%ADnio.pdf>. Acesso em 08 mai. 2018

PONTES, S. O. **Análise da influência da temperatura de vazamento na microestrutura da liga A380 durante o processo de fundição com e sem a adição de refinado Al-5Ti-1B**. Trabalho de conclusão de curso – Engenharia Mecânica, UTFPR, 2017.

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: 7 jun. 2018.

ROY, Patricia B.; CALLAHAN, Edward J. Armellino; O'CONNEL, Fiona M; ELBAN, Wayne L. **Vickers microindentation hardness testing of brazed joints in aluminium**. Baltimore: Loyola University, 2013.

OLIVEIRA, Rene R. **Avaliação da tensão residual em alumínio 7050 conformado pelo processo peen forming**. Instituto de pesquisas energéticas e nucleares, autarquia associada à USP. São Paulo, 2011.

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

VERRAN, Guilherme O.; **Solidificação de ligas de alumínio**, UDESC. Santa Catarina, 2017. Disponível em: http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/verran/materiais/Aula_05__Solidifica_o_de_Ligas_Al.pdf. Acesso em: 5 mai. 2018

VIANA, Carlos Sérgio da Costa. **Seleção dos Materiais: Alumínio e suas ligas**. 2009. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAUZkAF/aluminio-suas-ligas>>. Acesso em: 15 mar. 2018.