

Artigo

Caracterização microestrutural de ligas de alumínio tratadas termicamente

Bel. William Donizete Inacio da Silva ^[1]

Prof .Dr. Manoel Quirino da Silva Junior^[2]

^[1]Universidade Federal Rural do Semiárido – UFERSA. Curso; Engenharia mecânica. Aluno; William Donizete Inacio da Silva, donizetewilliam250@gmail.com.

^[2] Universidade Federal Rural do Semiárido – UFERSA. Curso; Engenharia mecânica. Docente; Prof. Dr Manoel Quirino da Silva Junior, manoel.quirino@ufersa.edu.br.

Data da defesa: 09/06/2022;

Resumo: Este trabalho foi realizado com o intuito de promover uma caracterização microestrutural de 2 tipos de liga alumínio, sendo elas; Al-Zn 0,11% at e Al-Ti 0,17% at, ligas que apresentam após os tratamentos térmicos de solubilização e precipitação uma apreciável variação de dureza, entretanto pouca variação na microestrutura. Aliado a isso o material ainda apresenta grande leveza por se tratar de ligas de alumínio. As ligas foram analisadas através de microscopia optica, aferições de dureza e microdureza. Onde foi verificado que, o tratamento de solubilização a 400°C por 3 horas e o tratamento de precipitação a 205°C por 2 horas apresentaram o maior ganho de dureza e microdureza e variação na microestrutura o que possibilita que ambas as ligas possam ser utilizadas em aplicações aeroespaciais e navais.

Palavras-chave; Caracterização; Liga de alumínio; Microestrutura; Dureza; Microdureza.

1. INTRODUÇÃO

Historicamente as primeiras aplicações do alumínio foram para objetos de decorações, como molduras, espelhos, travessas e utensílios domésticos, pois sua obtenção era de difícil acesso, dificultando com que tivesse aplicações industriais. O processo realizado para obtenção do alumínio é a redução eletrolítica da alumina, (Al_2O_3), dissolvida em criolita líquida. Segundo a ABAL – Associação brasileira do Alumínio [1] o processo é chamado de Hall-Herolot e foi desenvolvido em 1886 por Charles Hall (EUA) e Paul Herolt (França).

Atualmente na indústria tem se tornado cada vez maior a procura por produtos que utilizam ligas de alumínio, tendo como seus maiores mercados segundo a ABAL, os de embalagens para alimentos e medicamentos, representando 34%, indústria automobilística e de transportes 21%, construção civil 17%, cabos e componentes elétricos 9% e aplicações diversas 18%. Muito dessa demanda se deve as características que o alumínio apresenta, como, baixo peso, tendo uma densidade 2,7 g/cm³, ótima condutividade térmica e elétrica, resistência a corrosão atmosférica e não ferromagnético, porém, a alguns contrapontos, possuindo uma baixa resistência mecânica, por volta de 90 (Mpa) e baixa dureza, entre 20 a 40 (HRF). Com o intuito de contornar as deficiências que o alumínio possui, se faz necessária a dição de elementos de liga, como o zinco e o titânio que serão o principal alvo de estudo.

Nesse contexto, o presente artigo tem como objetivo realizar uma caracterização microestrutural de ligas de alumínio Al-Zn 0,11% e Al-Ti 0,17% não tratadas e tratadas termicamente para verificação dos seus parâmetros de dureza, microdureza e microestrutura. Toda pesquisa será embasada de acordo com os resultados obtidos nos experimentos por meio de Microscopia Óptica, Análise de Dureza e Microdureza.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. tipos de ligas de alumínio

Existem 2 grupos para as ligas de alumínio, sendo eles o grupo das ligas não-tratáveis, que não podem receber tratamentos térmicos, e as ligas tratáveis termicamente, que como o nome diz, podem ter suas características mecânicas melhoradas por meio tratamentos térmicos. Nas ligas de alumínio os tratamentos térmicos são restritos para aumentar a dureza e resistência das ligas.[4]. Atualmente nós temos como principais elementos de liga para o alumínio o Zn, Mg, Cu, Mn, e Si.

2.2. Características das ligas de alumínio (Al-Zn e Al-Ti)

2.2.1 Ligas de alumínio zinco (Al-Zn)

As ligas de Al-Zn se encontram na classe 7xxx, são ligas que podem ser endurecíveis por precipitação, ou seja, são ligas que possuem a capacidade de ser tratadas termicamente. Esses tratamentos ocorrem mediante a condições específicas que são determinadas mediante o seu diagrama de fase, esses tratamentos geralmente são de solubilização e envelhecimento, os tratamentos possuem como sua principal função o intuito de gerar um aumento significativo na sua resistência mecânica.

Através do diagrama de fases Al-Zn (gráfico 1) é possível se obter as temperaturas solvus (temperatura acima do qual o elemento de liga irá entrar em solução), os valores obtidos através desse diagrama são imprescindíveis para a realização dos tratamentos térmicos, pois serão eles quem determinarão a temperatura exata da solubilização e precipitação do elemento.

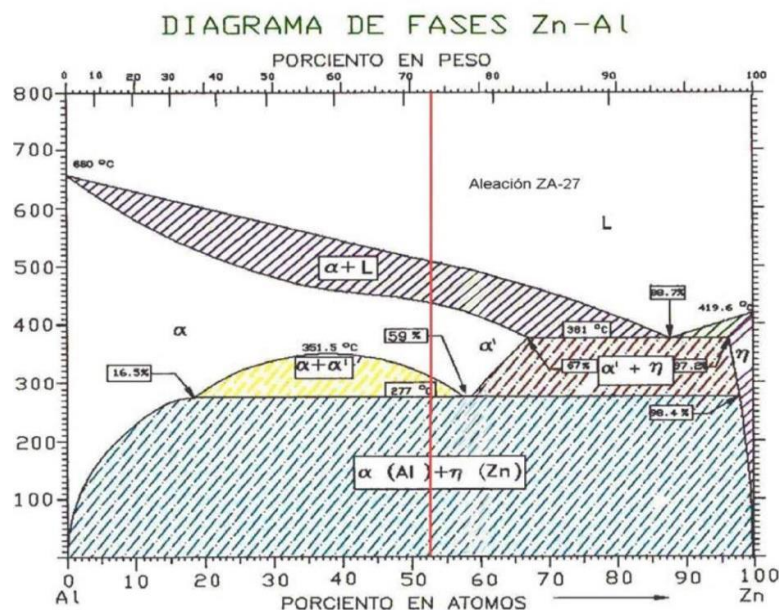


Imagem 1 – Diagrama de fase Al-Zn. Fonte: : ASM Metals Handbook.

A principal aplicação para ligas de Al-Zn encontra-se na fabricação de componentes aeroespaciais, pois além da sua baixa densidade, possuem a capacidade de obter o maior nível de resistência mecânica dentre todas as ligas. O zinco é o elemento de liga que possui maior solubilidade no alumínio e não exerce grande influência na microestrutura da liga.

2.2.2 Ligas de alumínio titânio (Al-Ti)

A adição de titânio em ligas metálicas tem como principal intuito o aumento da resistência a corrosão, resistência mecânica e diminuição do peso do metal, entretanto, uma das principais dificuldades de se trabalhar com ligas que contem adição de titânio é que quando aquecido a altas temperaturas o metal possui uma alta reatividade, podendo se contaminar facilmente, essa característica pode dificultar a obtenção dos resultados esperados através de sua adição.

A adição do titânio a ligas de alumínio ainda é pouco utilizada, pois devido a sua pouca solubilidade no material e sendo usada como principal função para o aumento de dureza da liga, o zinco se torna uma alternativa mais econômica e confiável para os mesmos fins.

A liga de alumínio titânio (Al-Ti) pode ser atribuída a classe 9xxx, pois é uma liga não usual, ou seja, é uma liga não comercial, possuindo pouco arcabolo teórico na literatura atual, os tratamentos térmicos realizados no presente artigo serão todos baseados no diagrama de fase apresentado no gráfico 2 onde se pode retirar a temperatura solvus da liga e determinar os parâmetros para os tratamentos.

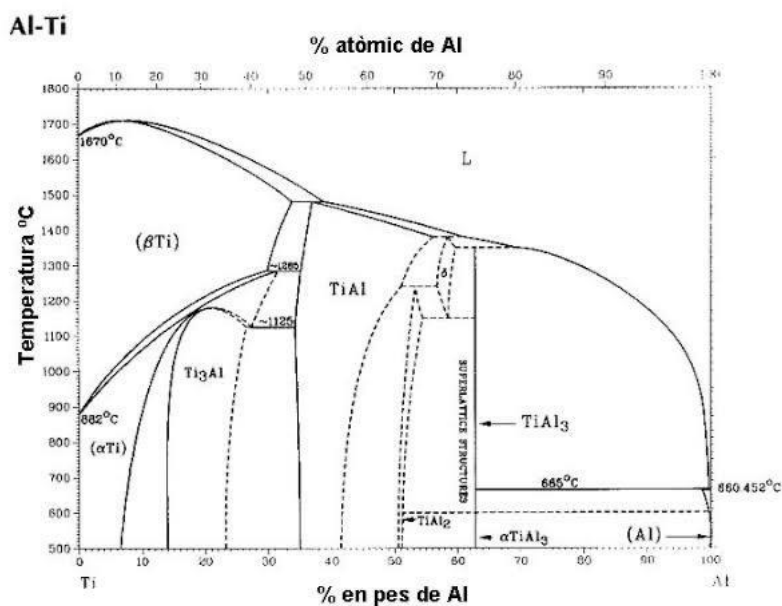


Imagem 2 – Diagrama de fase Al-Ti. Fonte: ASM Metals Handbook.

2.3. Tratamentos térmicos

2.3.1 Tratamento térmico de solubilização e envelhecimento.

O tratamento térmico de solubilização e envelhecimento é concebido com a função de separar da matriz metálica rica em alumínio a maior porcentagem possível de átomos de soluto, o intuito desse tratamento é causar o aumento da dureza e da resistência mecânica do alumínio.

O tratamento térmico é feito submetendo o material a determinada temperatura, que seja próximo ao seu ponto de fusão, por algum período de tempo, para que assim seja possível a migração dos átomos dos elementos de liga devido a reação dos seus coeficientes de difusão que será desencadeado pelo aumento da temperatura.

Os parâmetros para realização do tratamento térmico de solubilização devem ser consultados através dos valores determinados pelo diagrama de fase, de acordo com cada elemento presente na liga de alumínio, e também pela característica do elemento de liga, pois existem materiais que não podem ser solubilizados de acordo com sua porcentagem dentro do alumínio, na tabela 1 podemos verificar a temperatura de solubilização assim como a porcentagem em massa e atômica que pode ser solubilizada dentro do alumínio.

Elemento	Temperatura °C	% em massa	% atômica
Zinco	445	82,8	66,4
Magnésio	450	17,4	18,5
Cobre	550	5,65	2,40
Manganês	655	1,82	0,90
Silício	580	1,65	1,59
Titânio	665	1,3	0,74
Cromo	660	0,77	0,40
Zircônio	660	0,28	0,08
Ferro	665	0,05	0,025

Tabela 1 - Solubilidade máxima dos principais elementos de liga do alumínio fonte: (autoria própria).

O envelhecimento tem como intuito a precipitação controlada da fase endurecedora no material que já passou pelo tratamento de solubilização. A temperatura e o tempo que o tratamento de envelhecimento irão determinar a mobilidade dos átomos do elemento de liga que tendem a formar a fase (θ). É comum nas ligas de alumínio tratáveis termicamente o tratamento de envelhecimento ocorrer na temperatura de 280 °C que consiste no campo ($\alpha + \eta$), por um intervalo de tempo pré-determinado. Para determinada temperatura é possível encontrar um tempo adequado onde a dispersão dos precipitados será o mais coerente possível e seja possível obter o maior valor de endurecimento da liga.

No gráfico 2 podemos verificar como se dá o comportamento das curvas de envelhecimento para ligas de alumínio. Quanto maior a temperatura de envelhecimento o seu ponto de resistência máxima ocorre mais rápido, porem será obtido um valor de resistência menor.

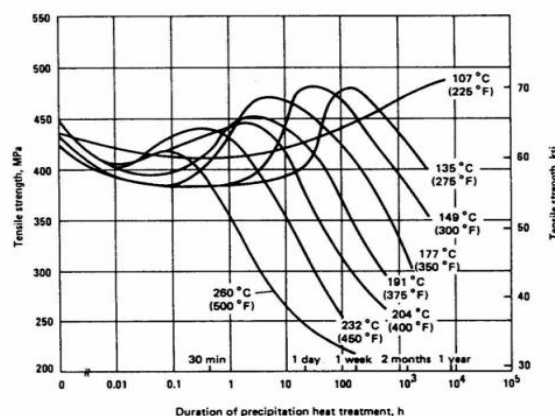


Gráfico 3 - Curvas de envelhecimento para ligas de alumínio fonte: MURRAY, J.L. - Alloy Phase Diagrams.

2.4. Ensaios mecânicos

2.4.1 Conceito de ensaios mecânicos

De acordo com GARCIA, SPIM, SANTOS, 2000 [7] ensaios mecânicos proporcionam a determinação de parâmetros que se referem ao comportamento do material quando sob a ação de esforços, que podem ser expressas em função de tensões e/ou deformações.

2.4.2 Análise de microestrutura

A análise da microestrutura é feita através de microscópio ótico acoplado a um computador, onde se faz fotografias das microestruturas sem tratamentos térmicos, e após os tratamentos térmicos com principal objetivo de fazer sua caracterização analisando seus padrões e junto com o diagrama de fases determinar suas fases que para as ligas de alumínio segundo a ABAL[11] é geralmente constituída pelas fases ($\alpha + \eta$) que pouco se alteram na presença de tratamentos térmicos.

2.4.3 Análise de dureza e microdureza

A análise da dureza e microdureza tem como objetivo realizar a medição dos valores antes e após os tratamentos térmicos com o fim de efetuar a comparação entre esses índices podendo identificar o ganho de dureza de acordo com o tratamento térmico aplicado na liga de alumínio.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O processo se inicia com a seleção e identificação através de marcações das amostras das ligas de alumínio. Onde as mesmas foram marcadas de acordo com seu principal elemento de liga e sua porcentagem.

Após a identificação das amostras, foi realizado o processo de corte através da máquina de corte metalográfico ilustrada na imagem 2, com o intuito de otimização dos corpos de prova, podendo fazer um corte preciso, separação e diminuição dos corpos de prova para amostras menores assim podendo realizar todos os experimentos necessários.

Dando continuidade aos procedimentos de preparo das amostras, se deu início ao procedimento de lixamento. O processo foi feito com lixas de gramatura 400, 500, 600, 800, 1000 e 1200. Após examinar as amostras e constatar o bom resultado, foi efetuado o polimento com o auxílio da politriz metalográfica, onde para realizar o processo de polimento foi utilizado um disco de polimento com adição de alumina 5.000 mesh.

Realizado todo o preparo das amostras, foi iniciado o processo de microscopia óptica, onde foi fotografada a microestrutura das amostras de liga de alumínio com o zoom diversos. Realizada a captura da microestrutura de cada amostra, foi realizado a medição da dureza e microdureza onde foram medidos os valores 5 vezes em cada amostra para a dureza e 1 medida em cada fase para a microdureza, o processo foi realizado utilizando um microdurometro Vickers com uma carga de 2,942 N e penetrador de 136° diamante e um durometro Rockwell digital com uma carga de 60 kgf e penetrador de 1/2' de aço.

Após a realização das medidas de dureza e microdureza das amostras, teve início os tratamentos térmicos nas ligas, onde os parâmetros foram escolhidos de acordo com o comportamento de cada elemento de liga do alumínio, e foi decidido que os tratamentos adequados seriam de solubilização e precipitação/envelhecimento.

Os parâmetros para realização dos tratamentos térmicos foram adquiridos na literatura onde se foi avaliado o diagrama de fases apresentado no gráfico 1 e 2, para obtenção da temperatura de solubilização que se localiza próximo a linha solvus que é cerca de 640°C para ambas as ligas, na região “ α ” de ambos os gráficos, para o tratamento de precipitação foram consultadas as curvas características de envelhecimento para ligas de alumínio

apresentado no gráfico 3 onde se tem por objetivo fazer com que a liga tenha a formação da fase α mais precipitados da fase η .

Para o tratamento de solubilização da liga de Al-Zn foi escolhido a temperatura de 400°C com duração de 3 horas, 400°C com duração de 5 horas e a 500°C com duração de 5 horas, com o seu resfriamento acontecendo de forma rápida em água a temperatura ambiente, analogamente o mesmo procedimento foi realizado na liga de Al-Ti, pois ambas as ligas devida a sua porcentagem atômica de elemento de liga apresentam padrões de tratamentos térmicos bem próximos tendo sua linha solvus por volta de 640°C. Para efetuar o tratamento térmico foi utilizado o forno elétrico tipo mufla.

Após o tratamento de solubilização foi realizado o tratamento de precipitação com o intuito do aumento de dureza nas ligas apresentadas, o tratamento teve início após a solubilização das peças tratadas a 500°C por 5 horas, a temperatura escolhida tendo em base o gráfico 2 foi de 205°C por 2 horas.

Com os tratamentos térmicos finalizados, o processo de lixamento, polimento, microscopia óptica, medição de dureza e microdureza foram repetidos, com o intuito de realizar a caracterização da microestrutura antes e após cada tratamento térmico, assim como seus parâmetros de dureza e microdureza.

4. RESULTADOS

4.1 Microestruturas das ligas de Al-Ti e Al-Zn sem tratamentos térmicos.

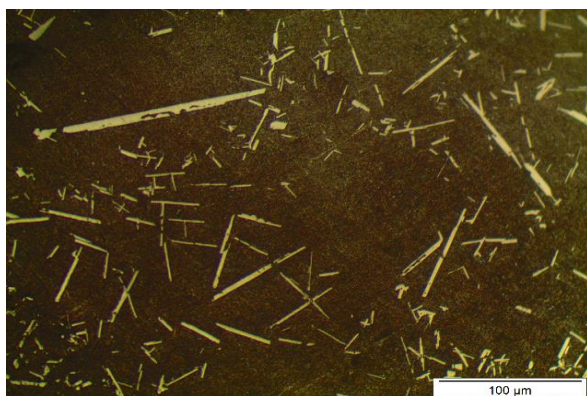


Figura 1 – microestrutura da liga de Al-Zn zoom 100x

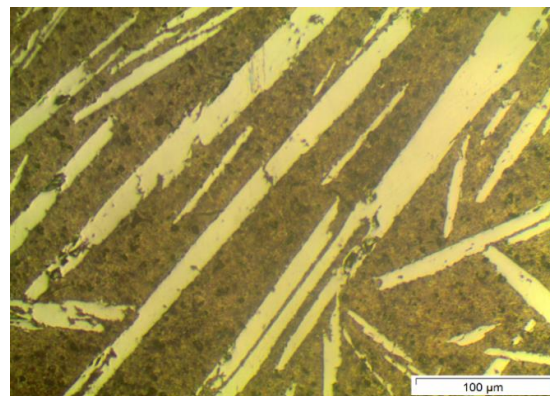


Figura 2 – microestrutura da liga de Al-Ti zoom 100x

As figuras 1 e 2 apresentam as micrografias das ligas de alumínio no estado “como recebido” ambas as ligas de alumínio apresentam em suas microestruturas 2 fases sendo uma mais escura causada devido a rugosidade e porosidade do metal e a outra sendo mais clara se apresentando como lamelas com o formato de agulhas, segundo o diagrama de fases ilustrado no gráfico 1 e o ASM hendebook, podemos caracterizar as fases como sendo a predominante “ α ”, e a fase de lamelas agulhiformes sendo a “ η ”, de acordo com a ABAL, as ligas de alumínio tendem a apresentar duas fases ($\alpha + \eta$) sendo em sua predominância na liga a fase α que faz referência a sua fase solubilizada, já os seus elementos de ligas menos solúveis se apresentam na fase η .

4.2 Microestruturas após o tratamento de solubilização a 400°C por três horas.

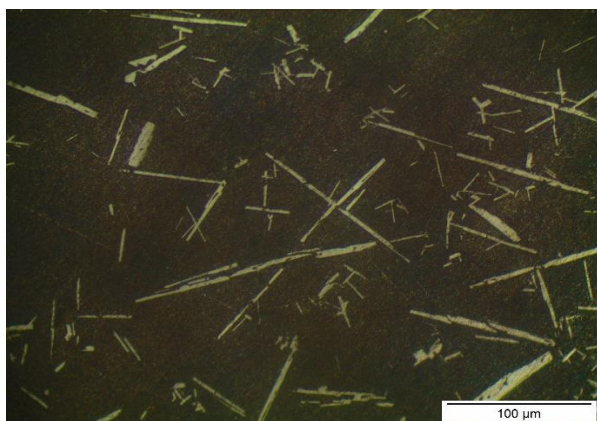


Figura 3 – microestrutura liga Al-Zn zoom 100x

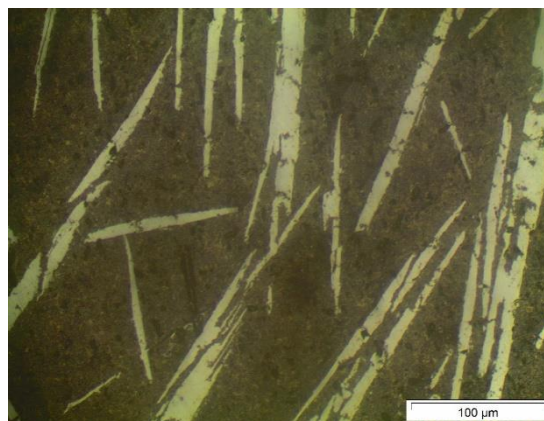


Figura 4 – microestrutura liga Al-Ti zoom 100x

As figuras 3 e 4 apresentam as micrografias das ligas de alumínio após receber tratamento térmico de solubilização por 3 horas a 400°C atacada quimicamente. Após receber o tratamento térmico pouca foi a alteração na microestrutura conservando seu padrão de duas fases com lamelas agulhiformes.

4.3 Microestruturas após o tratamento de solubilização a 500°C por cinco horas atacada quimicamente

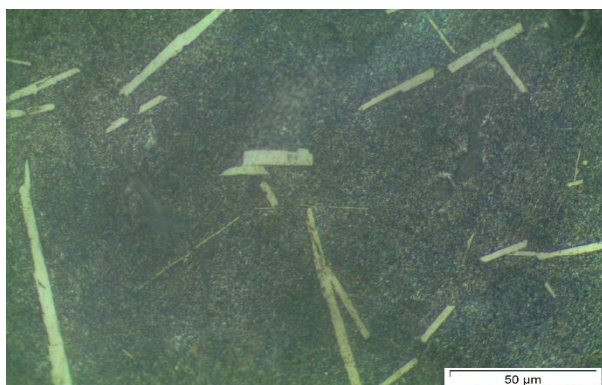


Figura 5 – microestrutura liga Al-Zn zoom 50x

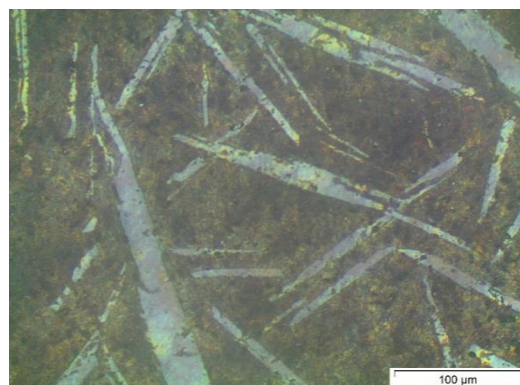


Figura 6 – microestrutura liga Al-Ti zoom 100x

As figuras 5 e 6 apresentam as micrografias das ligas de alumínio após receber tratamento térmico de solubilização por 5 horas a 500°C, nesse tratamento também foi realizado o ataque químico nas amostras entretanto ao receber o tratamento térmico com tempo e temperatura diferentes e ataque químico a microestrutura não apresentou variações.

4.4 Microestruturas após o tratamento de precipitação a 205°C por duas horas



Figura 7 – microestrutura liga Al-Zn zoom 100x



Figura 8 – microestrutura liga Al-Ti zoom 100x

As figuras 7 e 8 apresentam as micrografias das ligas de alumínio após receber tratamento térmico de precipitação por 2 horas a 205°C, nesse tratamento podemos ver novamente a formação das duas fases ($\alpha + \eta$) contudo nesse tratamento o objetivo é que as microestruturas apresentem precipitados, que são pequenos grãos da fase η dentro das fases das ligas metálicas, os quais elevam a dureza das ligas, como podemos notar circulado em ambas as figuras, após o tratamento houve o surgimento de pequenos precipitados o que indica o sucesso do tratamento térmico e alteração nas microestruturas de ambas as ligas.

4.5 Medidas de dureza rockell (HRF) microdureza vickers (HV)

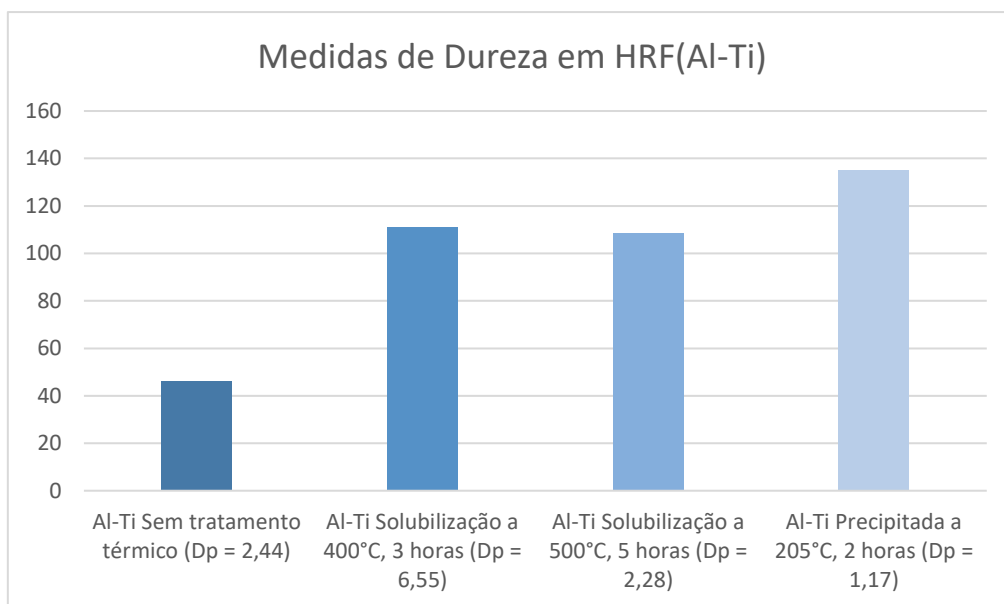


Gráfico 1 – Medidas de dureza em HRF (Al-Ti). Fonte: Autoria própria.

Como podemos notar através das medições ilustradas no gráfico 1 quando a peça não tinha nenhum tratamento térmico sua dureza foi de 46,28 HRF com desvio padrão de 2,44, quando recebeu o tratamento térmico de solubilização a 400°C por 3 horas sua dureza foi de 111,1 HRF com desvio padrão de 6,55, quando foi tratada a 500°C por 5 horas sua dureza foi de 108,54 HRF com desvio padrão de 2,28 e por fim quando recebeu o tratamento térmico de precipitação sua dureza foi de 134,88 HRF com desvio padrão de 1,17.

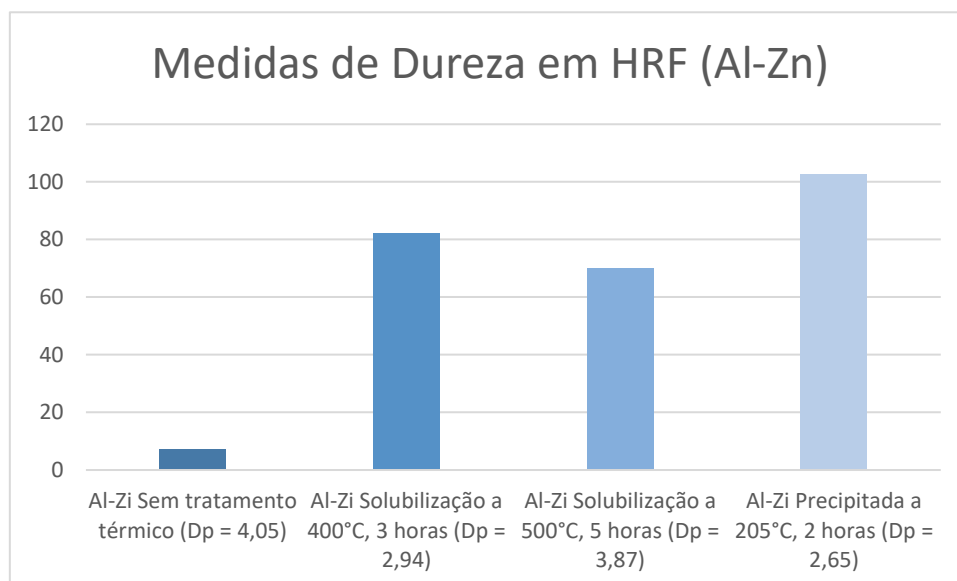


Gráfico – 2 Medidas de dureza em HRF (Al-Zn). Fonte: Autoria própria.

Analisando o Gráfico 2 podemos ver que os padrões de pico de dureza acontecem na mesma temperatura que a liga de Al-Ti, sendo as medidas, quando a peça não tinha nenhum tratamento térmico sua dureza foi de 7,16 HRF com desvio padrão de 4,05, quando recebeu o tratamento térmico de solubilização a 400°C por 3 horas sua dureza foi de 82,12 HRF com desvio padrão de 2,94, quando foi tratada a 500° por 5 horas sua dureza foi de 69,88 HRF com desvio padrão de 3,87 e por fim quando recebeu o tratamento térmico de precipitação sua dureza foi de 102,42 HRF com desvio padrão de 2,65.

Podemos afirmar através das medições, que, como apresenta as curvas de envelhecimento para ligas de alumínio, ambas as ligas estudadas apresentaram seu pico de dureza quando foi efetuado o tratamento térmico de solubilização a 3 horas e 400°C e após, a precipitação por 2 horas a 205°C, tendo notado também que de acordo com as curvas de envelhecimento, quando o tratamento térmico de solubilização ultrapassa as 3 horas, as peças começam a apresentar superenvelhecimento, que ocasionou a redução da dureza da amostra.

4.6 Medidas de microdureza vickers (HV).

Seguindo o mesmo padrão das medidas de dureza, a microdureza das ligas de alumínio quando estão sem nenhum tratamento térmico apresentam valores baixos, entretanto diferente da dureza com relação a microdureza é que se faz possível medir as duas fases que as ligas apresentam ($\alpha + \eta$), podendo assim nos informar qual fase contém maior microdureza.

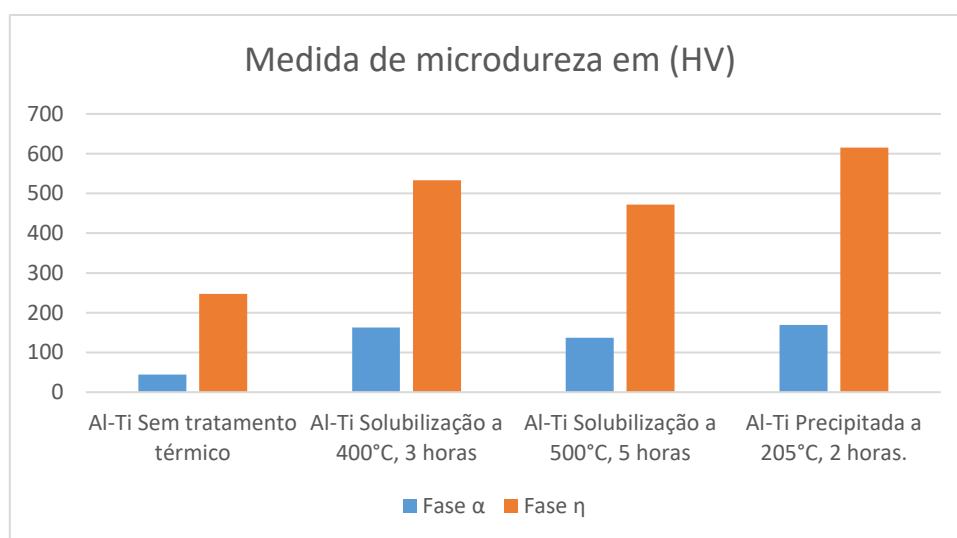


Gráfico – 3 Medidas de dureza em HRF (Al-Ti). Fonte: Autoria própria.

Como podemos averiguar de acordo com os valores medidos apresentados no gráfico 3, a microdureza medida das amostras da liga de Al-Ti, segue o mesmo padrão da dureza, onde seus picos ocorrem com a solubilização a 400°C por 3 horas e após a precipitação a 205°C por duas horas, os valores obtidos nas medições se apresentam da seguinte forma, sem tratamento térmico; 44,5 HV na fase α e 247,5 HV na fase η , com tratamento térmico de solubilização a 400°C por 3 horas; 163 HV na fase α e 533 HV na fase η , com tratamento térmico de solubilização a 500°C por 5 horas; 137,2 HV na fase α e 472 HV na fase η , com tratamento térmico de precipitação após solubilização a 205°C por duas horas; 168,9 HV na fase α e 615 HV na fase η . Como esperado e respeitando as curvas de envelhecimento, os melhores valores de microdureza ocorrem quando a peça é tratada com 3 horas e após a precipitação, já quando esse tempo é extrapolado temos a diminuição na dureza que caracteriza o superenvelhecimento.

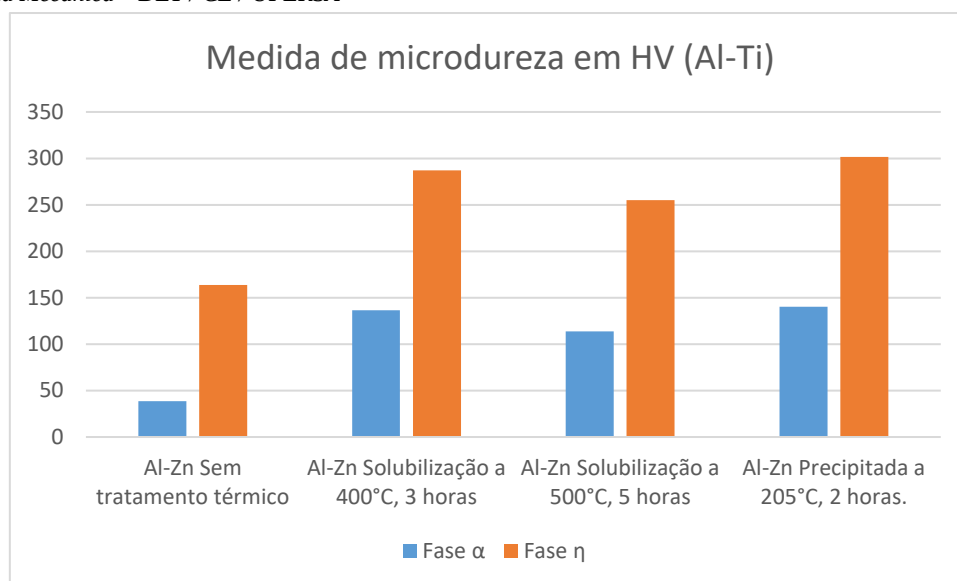


Gráfico – 4 Medidas de dureza em HRF (Al-Zn). Fonte: Autoria própria.

Semelhante aos valores das medidas de microdureza para a liga de Al-Ti os valores medidos para a liga de Al-Zn também apresentam o mesmo padrão da dureza, onde seus picos ocorrem com a solubilização a 400°C por 3 horas e após a precipitação a 205°C por duas horas, os valores obtidos nas medições se apresentam da seguinte forma, sem tratamento térmico; 38,6 HV na fase α e 163,7 HV na fase η , com tratamento térmico de solubilização a 400°C por 3 horas; 136,3 HV na fase α e 287 HV na fase η , com tratamento térmico de solubilização a 500°C por 5 horas; 113,7 HV na fase α e 255 HV na fase η , com tratamento térmico de precipitação após solubilização a 205°C por duas horas; 140,2 HV na fase α e 301,5 HV na fase η . Como esperado e respeitando as curvas de envelhecimento, os melhores valores de microdureza ocorrem quando a peça é tratada com 3 horas e após a precipitação, já quando esse tempo é extrapolado temos a diminuição na dureza que caracteriza o superenvelhecimento.

Com os valores medidos de dureza e microdureza, podemos afirmar que a liga que tem o maior ganho de dureza após o tratamento térmico é a liga de Al-Zn, pois se trata de uma liga que já é feita para receber tais tratamentos, visto que é bastante difundida na indústria para aplicações aeroespaciais, onde necessita de uma maior dureza e grande resistência a impactos. A Liga de Al-Ti também apresentou um significativo ganho na dureza após os tratamentos podendo ser utilizada em aplicações navais, onde se necessita de uma grande resistência a corrosão e a fortes pressões.

5. CONCLUSÃO

A microestrutura das ligas de Al-Ti 0,17% e Al-Zn 0,11% são caracterizadas por duas fases ($\alpha + \eta$) no estado como recebido. As microestruturas de ambas as ligas apresentam padrão de lamelas agulhares que são observados para quase todas as ligas de alumínio segundo o artigo Efeitos do tratamento térmico em ligas de alumínio [9]. As peças foram tratadas termicamente para que apresentassem apenas a fase α nos tratamentos de solubilização e as fases ($\alpha + \eta$) no tratamento de precipitação. Como apresentado nos resultados apesar de seguir os valores de temperatura da linha solvus para o tratamento de solubilização contidos na imagem 1 e 2 de cada liga de alumínio, e os tempos de tratamento recomendados pela ABAL[11], a microestrutura de ambas as peças não apresentaram mudanças significativas continuando com sua característica principal, as duas fases do estado como recebido. Já a microestrutura das amostras que receberam a solubilização e depois o tratamento de precipitação, notasse que nas regiões circulares obtivemos a presença de precipitados da fase η . Quando

avaliamos as medidas de dureza e microdureza, podemos afirmar que os tratamentos térmicos surtiram os efeitos desejados nas amostras e como descrito pelo livro Ensaio dos materiais[8]. Com o tratamento de solubilização tivemos um ganho nas durezas quando respeitado o tempo recomendado pelas curvas de envelhecimento apresentada na imagem 3, quando esses valores foram extrapolados apresenta-se o início do superenvelhecimento que causou um decaimento na dureza da amostra tratada por 5 horas em relação a tratada por 3 horas. Quando as amostras receberam o tratamento de precipitação foi visto através das aferições que esse tratamento apresenta os melhores valores de ganho na dureza e microdureza. Esses ganhos de dureza e microdureza apesar da pouca variação na microestrutura confirma o que é apresentado na literatura, que existe um aumento nesses padrões o que faz com que essas ligas ganhem aplicações nos meios aeroespaciais e navais.

6. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu professor orientador Manoel Quirino por me disponibilizar as amostras estudadas no artigo em questão, assim como a ajuda no conhecimento necessário para todo o desenvolvimento do mesmo, agradeço também a Deus e aos meus familiares por toda ajuda e apoio durante toda a minha formação em especial meus pais, a minha mãe por todo sacrifício que faz para que eu estude fora e ao meu pai que quando vivo sempre me mostrou o valor da educação e dos estudos e minha namorada Vitoria Camila que sempre me apoia incondicionalmente e agradeço também aos bolsistas Herbenia e Ricardo por todo auxílio prestado durante os ensaios e utilização dos equipamentos do laboratório.

7. REFERÊNCIAS

- [1] ABAL. Fundamentos e Aplicações do Alumínio. 2006
- [2] Callister Jr., William D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 8.ed. LTC. 2012
- [3] Chiaverini, Vicente. Tecnologia mecânica materiais de construção mecânica. 2.ed. McGrawHill. 1986.
- [4] Rooy, E.L., Aluminum and Aluminum Alloys, IN.: American Society for Metals: ASM Handbook, vol 2 – Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, 10ª edition.
- [5] Diagrama de fase Al-Zn. MURRAY, J.L. - Alloy Phase Diagrams. ASM Metals Handbook. v. 3. 1992.
- [6] Diagrama de fase Al-Ti. MURRAY, J.L. - Alloy Phase Diagrams. ASM Metals Handbook. v. 3. 1992.
- [7] Curvas de envelhecimento para ligas de alumínio. MURRAY, J.L. - Alloy Phase Diagrams. ASM Metals Handbook. v. 3. 1992.
- [8] GARCIA, SPIM, SANTOS, Ensaio dos Materiais. Ed 1 ano 2000.
- [9] Prof. Dr. Warley Augusto Pereira, Gabriel Lopes Rodrigues. Efeitos do tratamento térmico em ligas de alumínio. UniRV. 2015.
- [10] Prof. Dr. Durval Rodrigues Junior, Técnicas de análise microestrutural. USP. 2014.
- [11] ABAL. Características químicas e físicas. 2019. <<http://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/temperas/#:~:text=Tratamento%20t%C3%A9rmico,As%20ligas%20de&text=%C3%89%20realizado%20em%20temperaturas%20ao,gr%C3%A3o%2C%20estampabilidade%2C%20entre%20outras>>. Acessado em 20/05/2022.
- [12] Prof. Dr. JUNIOR R. D. Metalografia. USP Lorena. 2017.
- [13] NUNES, KREISCHER. Introdução a metalurgia e aos materiais metálicos. ed 1. Ano 2010.
- [14] SOUZA F. O alumínio e suas ligas. Destaque na liga AA4006 produzida por lingoteamento contínuo e semicontínuo. ed 2. Ano 2015.

WILLIAM DONIZETE INACIO DA SILVA

Caracterização Microestrutural de Ligas de Alumínio Tratadas Termicamente

Relatório final, apresentado a Universidade Federal Rural do Semi Árido, como parte das exigências para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Mossoró, 09 de junho de 2022.

BANCA EXAMINADORA

**MANOEL QUIRINO
DA SILVA JUNIOR:
04045779469**

Assinado digitalmente por MANOEL QUIRINO DA SILVA
JUNIOR:04045779469
DN: CN=MANOEL QUIRINO DA SILVA JUNIOR:
04045779469, OU=UFERSA - Universidade Federal Rural
do Semi-Árido, O=ICPEdu, C=BR
Razão: Eu estou aprovando este documento
Localização: sua localização de assinatura aqui
Data: 2022-06-17 11:06:45
Foxit Reader Versão: 10.0.1

Prof. Dr. Manoel Quirino da Silva Junior
(UFERSA)

F^{co} Evaristo Uchoa Reis

Prof. Dr. Francisco Evaristo Uchoa Reis
(UFERSA)

**FRANCISCA GEIDILANY
SARAIVA DE OLIVEIRA
FRUTUOSO:07138834489**

Assinado de forma digital por
FRANCISCA GEIDILANY SARAIVA DE
OLIVEIRA FRUTUOSO:07138834489
Dados: 2022.06.15 16:53:26 -03'00'

Francisca Geidilany Saraiva de Oliveira Frutuoso
(UFERSA)