

ANÁLISE E COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E METALGRÁFICAS DOS ALUMÍNIOS 5052F E 7075-T651 SOLUBILIZADO E ENVELHECIDO

RIBEIRO, Fabricio de Sousa

Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA. fabriciosr1996@gmail.com

AQUINO, Paulo Henrique Peixoto de

Centro Universitário de Anápolis - UniEVANGÉLICA. phpeixotto@hotmail.com

BRANDÃO, Sérgio Mateus

Centro Universitário de Anápolis - UniEVANGÉLICA. sergio.brandao@unievangelica.edu.br

RODRIGUES, Rosemberg Fortes Nunes

Centro Universitário de Anápolis - UniEVANGÉLICA. rosemberg.rodrigues@docente.unievangelica.edu.br

Resumo

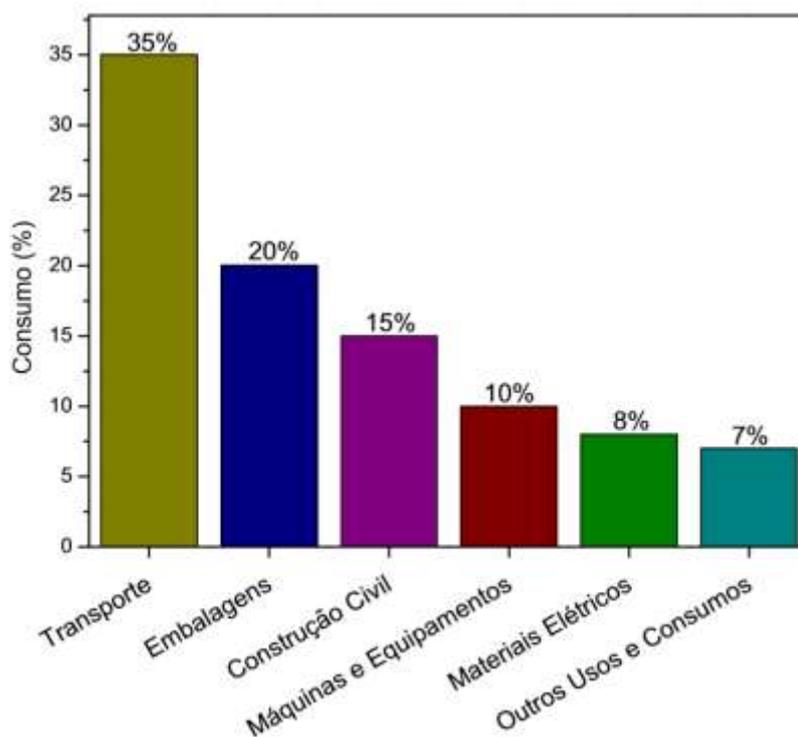
A revolução industrial 4.0 entrou na nova era dos materiais. A indústria aeronáutica e naval atualmente utiliza as ligas de alumínio 5052F e 7075-T651 em larga escala para fabricação de embarcações e aeronaves. O uso desse metal por estes segmentos se justifica pelo fato do elemento se apresentar bastante soldável, possuir boa capacidade anticorrosiva, condutibilidade elétrica e baixa densidade. As ligas metálicas compostas por alumínio são divididas em dois grupos: as ligas forjadas, onde o alumínio sofre uma etapa de conformação para obter o produto final, e as ligas fundidas, onde é realizada apenas a fusão do material ao qual umas podem e outras não podem sofrer tratamento térmico. Assim sendo, estas últimas são endurecidas com encruamento que é o aumento da rigidez na zona elástica. O objetivo deste trabalho é analisar e comparar as propriedades mecânicas e metalográficas das ligas de alumínio 5052F e 7075-T651, submetidas aos tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento. Para isso foram retiradas 20 amostras das ligas 5052F e 7075-T651 e submetidas ao ensaio de impacto Charpy-V, ensaio de dureza Rockwell e ensaio metalográfico antes e após a execução dos tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento; conforme ABNT NBR NM ISO 6508:2008. As amostras foram expostas a variação temporal de: 0,5, 2,5, 4, 6, 9, 12,16, 24, 30 e 36 horas. Os resultados comparativos indicaram que as amostras do alumínio 7075-T651 em um determinado intervalo de tempo atingiu menores índices de dureza Rockwell, mas em contrapartida demonstrou alteração na curva de deformação, expandindo a zona plástica e ampliando seu limite de ruptura se tornando mais dúctil. O alumínio 5052F por não ser tratável termicamente teve sua dureza praticamente estática no ponto inicial e final do experimento.

Palavras-Chave: Alumínio 5052F e 7075-T651; Solubilização; Envelhecimento; Metalografia.

1. Introdução

Há sete milênios, artesãos da antiga região da Pérsia produziam vasos com uma argila contendo óxido de alumínio. XXX séculos depois, os egípcios e os povos da Babilônia manipularam remédios e produtos de beleza contendo o mesmo componente químico ¹. Entretanto, o alumínio foi deparado em 1809 por um cientista chamado Sir Humphrey Davy e isolado pela primeira vez por H.C. Oersted em 1825 ². Com o desenvolvimento tecnológico atual, a indústria vem aperfeiçoando-o e patrocinando pesquisas e, entre as diversas ligas metálicas atuais, as mais utilizadas estão as ligas de alumínio. Suas ligas estão presentes em vários setores e suas propriedades mecânicas são bastante versáteis ³. Com isso, atualmente o alumínio é amplamente utilizado na indústria de transportes, na construção civil e na fabricação de maquinários conforme e mostrado no gráfico 1⁴.

Gráfico 01: Consumo do alumínio no mundo



Fonte: [4]

A densidade do alumínio corresponde à um terço da encontrada no aço, visto que ele apresenta uma excelente resistência à corrosão em ambientes hostis e boa tenacidade⁵. Devido ao seu baixo custo em relação a outras fusões metálicas, o alumínio é um material influente na fabricação de aeronaves, embarcações e automóveis por apresentar um baixo peso e resistência mecânica eminente⁵. Essa dilatação tecnológica faz com que projetos navais, aeroespaciais e automobilísticos o utilizem em grande escala, fazendo-o chegar até 8,6% do peso estrutural dos automóveis e 80% da estrutura aeronáutica, além de ser um exímio componente na fabricação de embarcações⁵.

Essas ligas marinhas sempre estiveram presentes desde o início do progresso naval. De embarcações de apenas 17 pés, até as atuais de 300 toneladas. Muitos profissionais como engenheiros navais, marítimos e construtores já perceberam que seu baixo peso necessita de uma potência reduzida, reduz o consumo de combustível e a capacidade anticorrosiva provoca uma economia nas manutenções⁶.

Em 1888 começaram a ser produzidos em escala comercial, principalmente na fabricação de escotilhas e capotas sem nenhum elemento ligante no alumínio. As ligas com aditivos só começaram a ser produzidas comercialmente a partir de 1930 e foi dominada pela classe 6xxx especialmente pela liga 6061. A partir daí a produção foi crescendo paulatinamente, até o surgimento da classe 5xxx contendo alumínio e magnésio, oferecendo resistência à corrosão e boa soldabilidade⁷. Com isso, as indústrias navais economizam cerca de 50% de peso com alumínio em relação ao aço. Entre essas ligas está a classe 5052F. A liga de alumínio utilizado na indústria naval 5052-F é composta por 0.25% Si, 0.40% Fe, 0.10% Cu, 0.10% Mg, 0.15-0.30% Cr, 0.10% Zn, 96.00-99.00% Al, 0.05-0.015% de outros; além de um peso específico de 2,80 g/cm³⁸. Esta liga de alumínio/magnésio é empregada na fabricação de cascos das embarcações, principalmente por apresentar os seguintes fatores: ser bastante soldável, boa capacidade anticorrosiva e condutibilidade elétrica. Fazendo que ele seja componente essencial na fabricação de cabos elétricos e motores, porém não tratável². A figura 1 mostra a aplicação de ligas de alumínio na construção de grandes embarcações¹⁵.

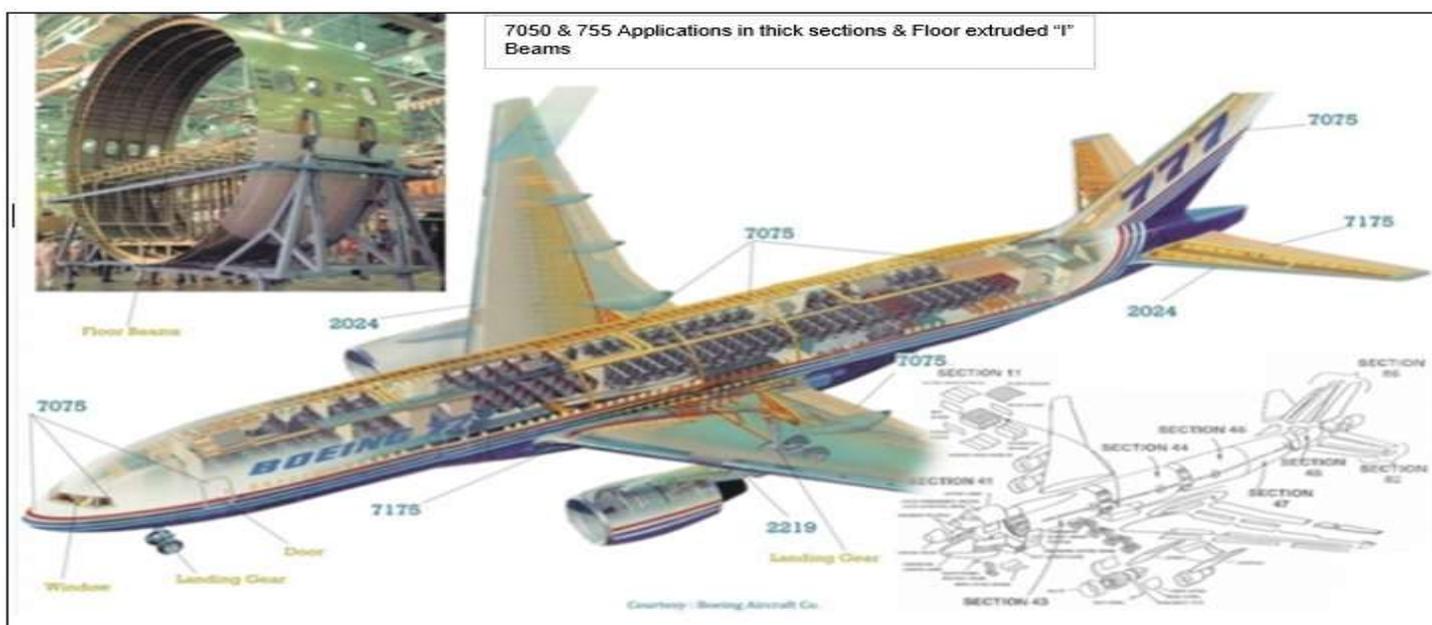
Figura 1: late com casco em alumínio



Fonte: [15]

Em 1906, Alfred Wilm descobriu o endurecimento por precipitação em uma liga de alumínio Al-Cu-Mg-Mn. Isso foi o princípio do desenvolvimento de ligas de alumínio aeronáuticas. A liga 7075-T651 contém 5,6% Zn, 2,5% Mg, 1,6% Cu e 0,30% Cr ⁹. As ligas de alumínio-zinco possuem baixa densidade (entre 2,7 e 2,94 g/cm³). Esta liga possui boa resistência mecânica sendo utilizada usualmente na estrutura e fuselagem das aeronaves devido ao seu baixo peso acarretando o ganho econômico operacional e no consumo de combustível ⁶. A localização destes componentes é mostrado na figura 2 ².

Figura 2: Localização dos componentes fabricados em liga alumínio em um avião de grande porte



Fonte: [2]

No processo de solubilização ocorre o aquecimento do material com temperaturas superiores a 579 °C. Será realizado o tratamento no alumínio 7075-T651 cuja solubilização ocorre à temperatura de 480°C. Os principais compostos nas ligas de alumínio são: o silício, manganês, magnésio e principalmente o zinco. Este último com maior solubilidade chegando a 66,4%. Seguidamente, ocorre um brusco resfriamento para que não ocorra a difusão ou formação da fase α retida. Após realizar a têmpera, inicia-se a etapa de envelhecimento. O envelhecimento consiste em aquecer a liga em uma região entremeio à região bifásica $\alpha + n$, onde a porcentagem de difusão ocorre em taxas consideráveis. Durante a realização da fase n as partículas ficam livres em uma região com alta composição de soluto. O tempo de resfriamento é tabelado para cada liga ¹⁰. Já a liga de alumínio 5152-F, após a etapa de laminação será estabilizada a 150 C° para a recuperação das propriedades perdidas pelo processo de encruamento. A etapa de ensaios mecânicos contará com a realização do ensaio de dureza e Charpy ¹¹. O ensaio metalográfico servirá como métrica para o controle de qualidade, objetivando relacionar as propriedades físico químicas e mecânicas do processo de fabricação ¹². O objetivo deste trabalho é analisar e comparar as propriedades mecânicas de metalográficas das ligas de alumínio 5052F e 7075-T651 submetidos aos tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento.

2. Referencial teórico

2.1. Ligas de alumínio magnésio e alumínio zinco

O elemento químico magnésio apresenta uma coloração prateada, mas, quando é exposto ao ar, o seu brilho reduz a intensidade. O magnésio quando ligado a outro elemento químico correto viabiliza uma ampla faixa de materiais com dureza significativa, sendo suficiente para a aplicação em estruturas que não são acompanhadas de abrasão. Com uma densidade de 1800 kg/m³ equivale a 2/3 a do alumínio que corresponde a 4300kg/m³ ¹³. Quando o magnésio é ligado ao alumínio ele adquire boa propensão a soldagem e resistência à corrosão, tornando-se excelente para a fabricação de cascos de navios, barcos, tanques criogênicos, tanques de combustível, carroceria de caminhões e um dos principais homogeneizados em componentes da indústria automotiva ¹². O zinco é um elemento de liga que tem a propriedade de enrijecer, haja vista que as ligas de alumínio comercial com maior dureza têm zinco em sua composição. Entretanto, as ligas de alumínio e magnésio possuem limitações quando expostas à corrosão sob tensão. Devido a essa restrição é necessário executar um rigoroso protocolo de fabricação e controle de qualidade, pois a maior área de aplicação destas ligas é na indústria aeronáutica¹³. Em algumas ligas é realizada a junção de magnésio, cobre ou cromo, mas somente após passar por tratamento térmico são empregadas na indústria, principalmente na aeronáutica que necessita de alta resistência/peso ¹⁴. A figura 3 ilustra duas chapas compostas por ligas de alumínio magnésio e alumínio e zinco.

Figura 3: Chapa de alumínio e magnésio e de alumínio zinco



Fonte: Autor

2.2. Tratamentos térmicos aplicáveis em ligas de alumínio

As ligas metálicas compostas por alumínio são divididas em dois grupos: as ligas forjadas, onde o alumínio sofre uma etapa de conformação para obter o produto final, e as ligas fundidas, onde é realizada apenas a fusão do material, na qual umas podem e outras não podem sofrer tratamento térmico e ser endurecidas apenas com encruamento (que é o aumento da rigidez por deformação plástica), como a liga de alumínio 5052-F. Nestes casos, o material sofre apenas um aumento de temperatura após o esfriamento natural, para recuperar algumas propriedades perdidas durante a deformação. Já as ligas que podem sofrer tratamento térmico a melhora das propriedades podem ocorrer por endurecimento ou envelhecimento, processos que geralmente ocorrem após a solubilização¹⁵.

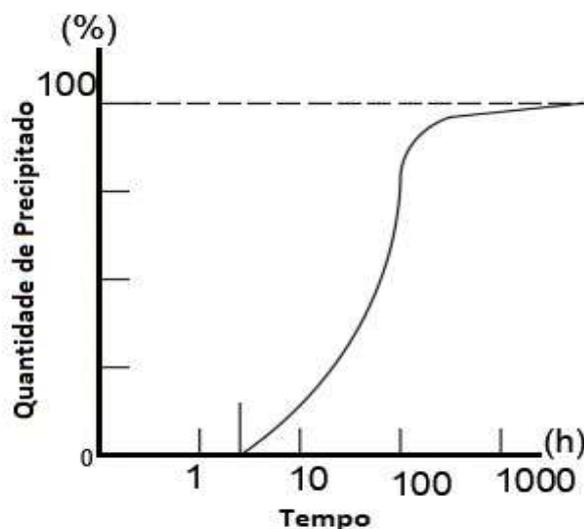
O tratamento térmico de solubilização consiste em colocar o objeto de estudo em de solução sólida com uma maior quantidade de átomos de soluto possível, que são os aditivos mais comuns nas ligas de alumínio como o cobre, magnésio, zinco e silício, dentro da matriz farta em alumínio¹⁶. Em algumas ligas, a temperatura que pode ocorrer a maior quantidade de soluto em estado de dissolução é equivalente a temperatura eutética, ou seja, a temperatura mais próxima ao ponto de fusão de ambas. Com isso, a temperatura de solubilização necessita de atenção para que não haja superaquecimento e fusão fracionada das ligas, como exemplo, algumas ligas da classe 2xxx (alumínio /cobre)¹⁷.

Já outras ligas não necessitam de tantos cuidados como a classe 7xxx (alumínio/ zinco), pois suas temperaturas de derretimento são bem diferentes. Porém, devem ser levados em conta outros fatores como os efeitos causados na superfície do material e controle do crescimento dos grãos. Algumas ligas de alumínio como a 7075-T651 possui duas fases de solução: a de alumínio e cobre Al_2CuMg , onde o alumínio pode ser substituído pelo cobre e zinco $CuZn_2$, que apresenta uma dissolução mais lenta. Porém deve ser observado, pois concentrações nessa fase podem causar a fusão e não o equilíbrio¹⁸. Caso ocorra um aquecimento brusco com temperaturas na faixa de 485 °C e 490°C, a mistura das ligas pode não obter o resultado esperado. Outros cuidados importantes são: primeiro, controlar a temperatura para não ultrapassar o recomendado e causar oxidação do material, segundo observar as condições de higiene e limpeza. Isso se deve ao fato de o forno não poder conter enxofre na sua atmosfera, caso isso aconteça pode causar uma contaminação do material¹⁸.

O resfriamento brusco é outra etapa protocolada e crítica do tratamento térmico de solubilização. É essencial manter a temperatura ambiente e a solução sólida obtida com a temperatura elevada¹⁹. Outro fator importante do resfriamento rápido é que ele permite a temperatura natural com as mesmas taxas de concentração de lacunas, sendo fundamental para agilizar o processo de junção dos átomos de soluto, que ocorre seguidamente em outro tratamento térmico chamado de envelhecimento¹⁹.

O tratamento térmico de envelhecimento também conhecido como precipitação, é conhecido de duas maneiras: o natural, onde o resfriamento ocorre de forma lenta com a temperatura ambiente, e o artificial, com temperaturas elevadas; aplicado na maioria dos casos em ligas de alumínio onde a margem da temperatura ambiente com a de solubilização varia entre 15% a 20%. Durante o processo de envelhecimento, as amostras sofrem um resfriamento para a formação de precipitados finos e dispersos que bloqueiam o movimento entre as discordâncias durante a deformação, de modo que tenham que cisalhar entre si ou circundar as partículas com precipitados, fazendo com que ocorra um aumento na tenacidade da liga¹⁹. Para o surgimento de precipitados é necessário que aconteça a etapa de nucleação, seguidamente do crescimento de partículas geradas no soluto. Esse aumento é resultante da difusão de átomos do componente endurecedor que estão em formação sólida. O desenvolvimento da precipitação ocorre apenas após iniciar a etapa de nucleação, onde a quantidade de precipitados aumenta de acordo com o passar do tempo, conforme é mostrada no gráfico 2.¹⁹

Gráfico 02: Quantidade de precipitado em relação ao tempo



Fonte: Autor

2.3. Ensaio de dureza

Quando falamos em resistência dos materiais, o teste de dureza do objeto de estudo é determinado pela sua capacidade de resistir à uma deformação; seja ela plástica, de cortes, de flexão, exposição à um produto abrasivo ou como método comparativo entre dois materiais. No caso desta pesquisa, foi realizado a comparação entre corpos de prova do alumínio aeronáutico 7075-T650 e o alumínio naval 5052F.²⁰ A dureza é ditada por definições precisas em termos de unidades fundamentais de massa, comprimento e tempo. Um valor da propriedade de dureza é a resultante de um procedimento específico de medição. Os métodos mais comuns são: de Mohs (risco) e penetração, (Brinell, Rockwell, Vickers e Knoop)²¹ são alguns métodos utilizados para testes de dureza em mecânica.²²

O ensaio de dureza Rockwell tem como objetivo penetrar o material que está sofrendo o teste com uma ponta em formato de cone de diamante ou um endentador de esfera de aço endurecido. O endentador aplica uma força contra a superfície do corpo de prova com uma pré-carga chamada de F_0 , a força aplicada varia de acordo com cada material normalmente se aplica 10kgf. Quando se atinge o equilíbrio, um visor indicativo da máquina que segue os movimentos do endentador revela às variações da profundidade de penetração e logo após ele retorna para a posição zero. Ainda com uma pré-carga sendo aplicada, uma segunda carga é realizada na ponta de teste resultando em um aumento na penetração. Novamente após o equilíbrio a carga é removida, mantendo-se a pré-carga, essa remoção da força aplicada (carga) resulta em uma recuperação parcial, reduzindo a profundidade da penetração. O aumento permanente na profundidade da penetração resultante da aplicação e remoção da carga é usado para calcular o valor da dureza Rockwell.²²

2.4. Ensaio de Charpy

O ensaio de Charpy consiste em determinar a energia de impacto absorvida por um corpo de prova com dimensões de 10x10x55 mm, entalhado em forma "U" ou "V" com profundidade entre 2 à 5mm, bi apoiado, sujeito a um golpe de um martelo pendular. Desta forma, é possível prever em quais condições um rompimento ou fratura ocorrerá²³. O entalhe produz um estado triplo de tensões, suficiente para provocar a ruptura de caráter frágil²⁴, mas que, infelizmente não é possível medir satisfatoriamente os componentes das tensões existentes por diversos fatores como o tipo de metal usado ou conforme a estrutura interna que este mesmo material apresenta como característica²⁵. A figura 4, mostra um martelo pendular usado para este ensaio.

Figura 4: Pêndulo para realizar o ensaio de Charpy-V



Fonte: [30]

2.5. Ensaio Metalográfico

Quando se fala em controle de qualidade em metalurgia refere-se a sua estrutura ou dimensão. Sendo que as dimensões físicas do produto são chamadas de metrologia e a estrutura refere-se à composição deste em diversos aspectos: metalográfico, químico, físico e especial ²⁵. Desta forma, ao realizar um ensaio metalográfico objetiva-se determinar suas propriedades físico químicas, e relacionar seu processo de produção com a viabilidade de aplicação em determinadas situações ²⁶. O ensaio metalográfico divide-se em Macrográfico ou Micrográfico. Ao realizar a macrografia é importante ressaltar que a superfície utilizada deverá estar completamente livre de imperfeições, polida e exposta a um reagente adequado. Pode ser realizada a olho nu ou com ampliação de no máximo 5 a 64X. Assim sendo, é possível observar os aspectos conjunturais do produto no que se refere a homogeneidade, impurezas, tratamentos térmicos utilizados dentre outros. Já os ensaios micrográficos são realizados exclusivamente com microscópios metalográficos com aproximação de 50 as 2500X¹². Estes microscópios são capazes de identificar minúsculas partículas na composição do produto como sua granulação, natureza e forma ¹². Em ambos os métodos o material anteriormente e polido e atacado por um reagente químico para melhor visualização de sua estrutura¹².

3. Metodologia

Para a concretização do experimento, inicialmente foram preparadas 10 amostras das ligas 7075-T651 e 5052F; a fim de realizar a análise e comparação das propriedades de: dureza, tenacidade e microscopia, antes e após o tratamento de solubilização e envelhecimento. Ensaios estes primordiais para obtenção de dados comparativos antes e após tratamento térmico. Segue-se abaixo o detalhamento dos procedimentos executados em cada ensaio.

3.1. Realização do ensaio de Charpy

O ensaio de Charpy foi realizado nos corpos de prova dos alumínio 5052F e 7075- T651, sem tratamento térmico para obtenção de dados e utilizou-se um martelo pendular. Martelo este da marca Panambra e capacidade de impacto de 150 a 300J. A figura 5 representa o modelo de corpos de prova utilizados com dimensões 10x10x50 cm.

Figura 5: Representação dos corpos de prova para ensaio de Charpy



Fonte: Autor

3.2. Ensaio de metalografia

Para preparação do corpo de prova para o ensaio metalográfico, inicialmente foi realizado o polimento das amostras com lixas de diversas gramaturas, seguindo as orientações da norma ABNT – 8108, obtendo ao final do processo uma aparência limpa, lisa e espelhada²⁹. Então, com o corpo de prova já devidamente preparado, realizou-se um “ataque” com o reativo universal para micrografia de ligas de alumínio, denominada Lixívia de solda, composto por: 10g hidróxido de sódio e 90 ml água destilada²⁹. O equipamento utilizado e ilustrado na figura 6.

Figura 6: Telescópio utilizado para ensaio Metalográfico



Fonte: Autor

3.3. Ensaio de dureza Rockwell

O ensaio de Dureza Rockwell, foi realizado conforme a normativa da ABNT NBR NM ISO 6508:2008 para ensaios em ligas aluminosas. Sendo assim, fora aplicada uma pré-carga no corpo de prova,

utilizando o equipamento Durômetro da marca Digimess 400.007, com capacidade de medição de dureza entre: 200-250 HB²². A imagem a seguir representa o durômetro utilizado.

Figura 7: Durômetro para ensaio de dureza



Fonte: Autor

3.4. Solubilização e envelhecimento

Após a obtenção dos dados coletados nos ensaios: metalográfico, Charpy e de dureza; deu-se início a execução dos tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento na liga 7075-T651. Houve uma variação proposital em relação ao tempo de precipitação dos corpos de prova para verificar o comportamento mecânico e estrutural do material, objetivando uma comparação com a liga 5052F, que, por pertencer a classe de ligas fundidas, não pode sofrer tratamento térmico. Vale ressaltar que as ligas de natureza 5x só podem ser endurecidas com encruamento¹⁵.

Na etapa de solubilização, elevou-se se a temperatura do alumínio 7075-T651 à 480°C, utilizando um forno tipo mufla da marca Jung modelo 70309613, com o objetivo de dissolver a solução sólida do zinco (Zn) no alumínio (Al), presente no campo monofásico (que é a solução sólida no alumínio). Desta forma, fora determinado um tempo de espera para que toda fase sólida do zinco (Zn) estivesse dissolvida. Em seguida, o corpo de prova sofreu a têmpera, onde ocorreu um resfriamento brusco a base d'água com o objetivo de manter a solução sólida supersaturada, precisamente após o resfriamento¹⁸. Na figura 8 estão representados os corpos de prova para solubilização.

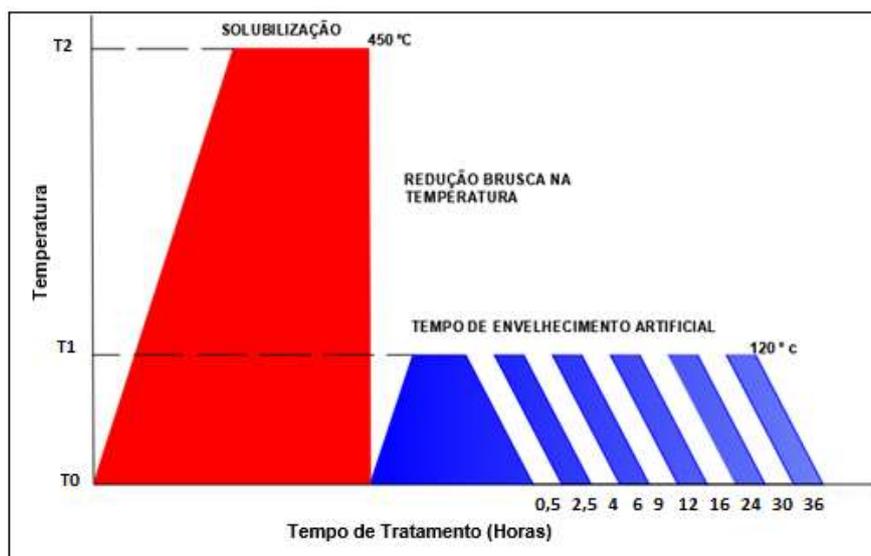
Figura 8: Corpos de prova para solubilização



Fonte: Autor

Findo o processo de solubilização, iniciou-se o envelhecimento artificial com temperatura de 120 °C com intuito de formar a fase precipitada repetidamente na região bifásica $\alpha + \beta$ (é nesta região que as taxas de difusão são mais aplicáveis). Com o tempo de precipitação apropriado, a amostra foi resfriada de forma natural. É importante destacar que o tempo de envelhecimento artificial sofreu variação temporal de: 0,5, 2,5, 4, 6, 9, 12, 16, 24, 30 e 36 horas, conforme gráfico abaixo¹⁹.

Gráfico 03: Tempo de envelhecimento dos corpos de prova



Fonte: Autor

Já a liga de alumínio 5052F foi apenas estabilizada. Processo este que ocorre uma elevação da sua temperatura a 150 °C para a recuperação das propriedades mecânicas perdidas no processo de fabricação. Após estes procedimentos, foram repetidos os ensaios de Charpy, metalográfico e de dureza Rockell. A figura 9 ilustra os corpos de prova recebendo o tratamento térmico.

Figura 9: Estabilização do alumínio 5052

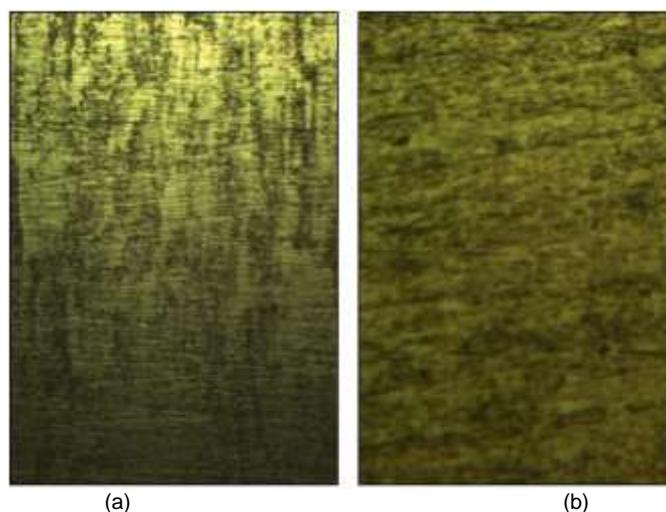


Fonte: Autor

4. Resultados e Discussão

Com a intenção de analisar e comparar os efeitos do tratamento de solubilização e envelhecimento em duas ligas aluminosas, foram realizados os ensaios de metalografia, dureza e Charpy nos corpos de prova sem tratamento para a obtenção dos dados iniciais. A figura 10 representa a comparação metalográfica das ligas 7075-T651 e 5052F respectivamente.

Figura 10: Metalografia dos alumínios 7075-T651 (a) e 5052F (b) sem tratamento térmico



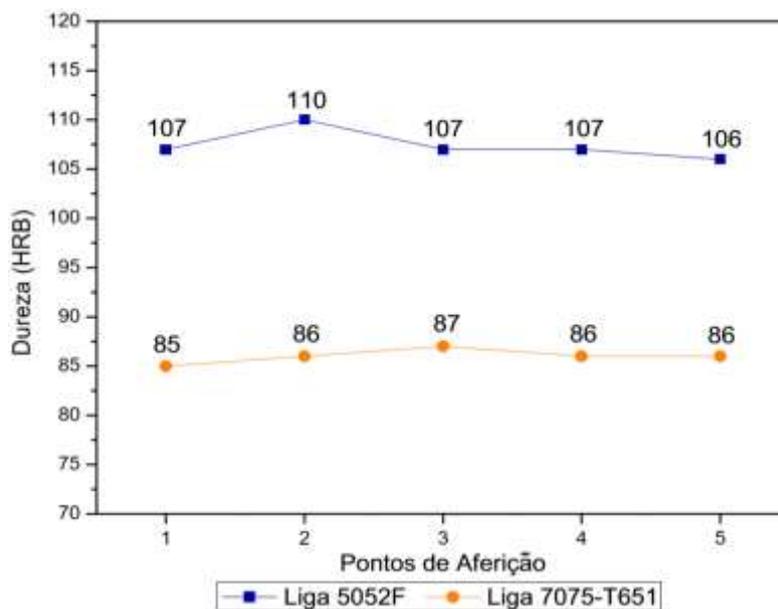
(a)

(b)

Fonte: Autor

Os corpos de prova também foram submetidos aos ensaios de dureza Rockwell inicial em cinco pontos. Nesta etapa identificou-se que, a liga 5052F, composta em sua maioria de alumínio (al) e Magnésio (mg), apresenta dureza superior a 7075-T651, que apresenta em sua composição os elementos químicos: alumínio (al) e Zinco (Zn). Conforme o gráfico 4 abaixo:

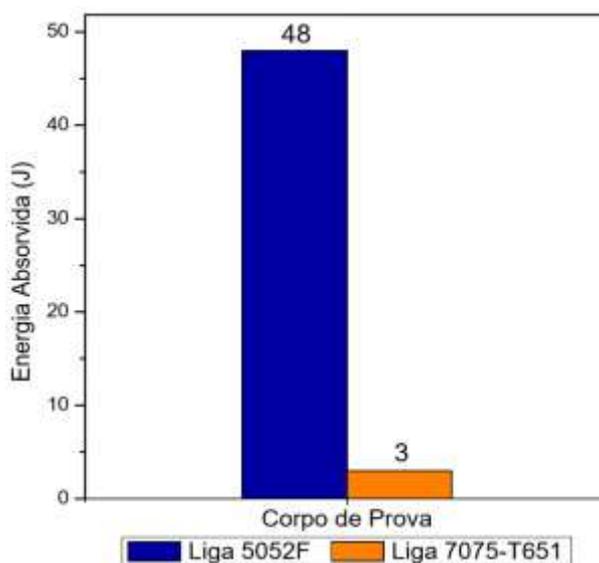
Gráfico 04: Dureza inicial dos alumínios 7075-T651 e 5052F



Fonte: Autor

Após a realização do ensaio de Charpy (aplicando a força de impacto necessária para a ruptura do corpo de prova), os valores superiores de dureza da liga 5052F em comparação a 7075-T651 obtidas no ensaio anterior se repetiram, conforme o gráfico 5.

Gráfico 05: Força de impacto de ruptura das ligas 7075-T651 e 5052F

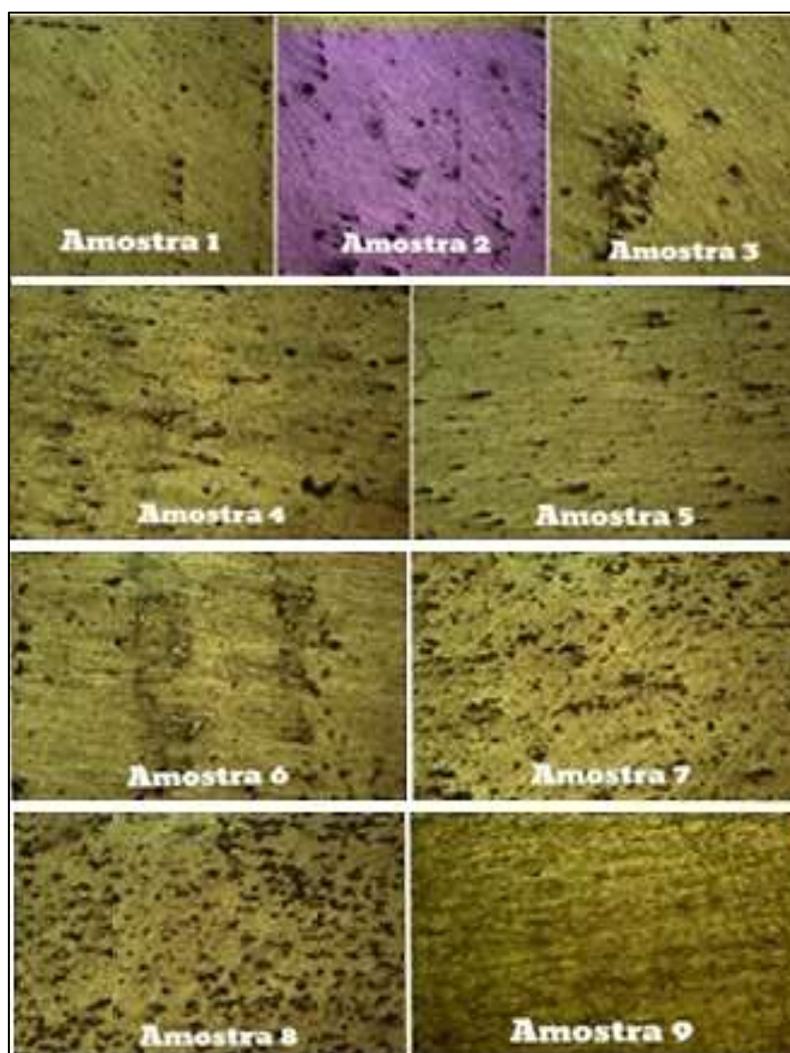


Fonte: Autor

No processo de envelhecimento artificial da liga de alumínio 7075-T651, os corpos de prova foram retirados do forno a cada intervalo de tempo conforme já descrito na figura 13. Na etapa de nucleação, ocorreu o crescimento de partículas geradas no soluto, que resulta na difusão de átomos do componente endurecedor

que estão em formação sólida. A precipitação ocorre apenas após iniciar a etapa de nucleação, onde a quantidade de precipitados aumenta de acordo com o passar do tempo. Observou-se que de 4 horas em 4 horas a amostra demonstrou um fenômeno distinto, finalizando exatamente na amostra de número 8 equivalentes a 30 horas de tratamento. A partir daí o material apresentou características metalográficas semelhantes ao inicial. Tais fenômenos são representadas na figura 11.

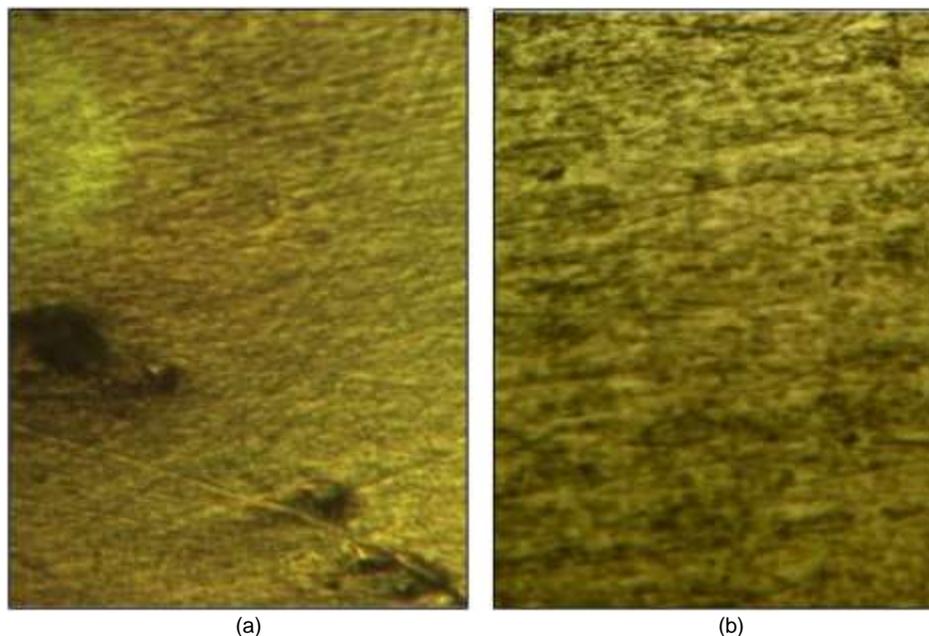
Figura 11: Metalografia dos alumínio 7075 após tratamento



Fonte: Autor

Após tratamento de estabilização da liga 5052F e da solubilização e envelhecimento artificial da liga 7075-T651 e, decorridas 36 horas, constatou-se a formação de precipitados dispersos na cor preta que bloqueiam o movimento entre as discordâncias durante a deformação, de modo que tenham que cisalhar entre si ou circundar as partículas com precipitados, fazendo com que ocorra um aumento na dureza da liga ¹⁹. Tal fenômeno está representado na figura 12 abaixo:

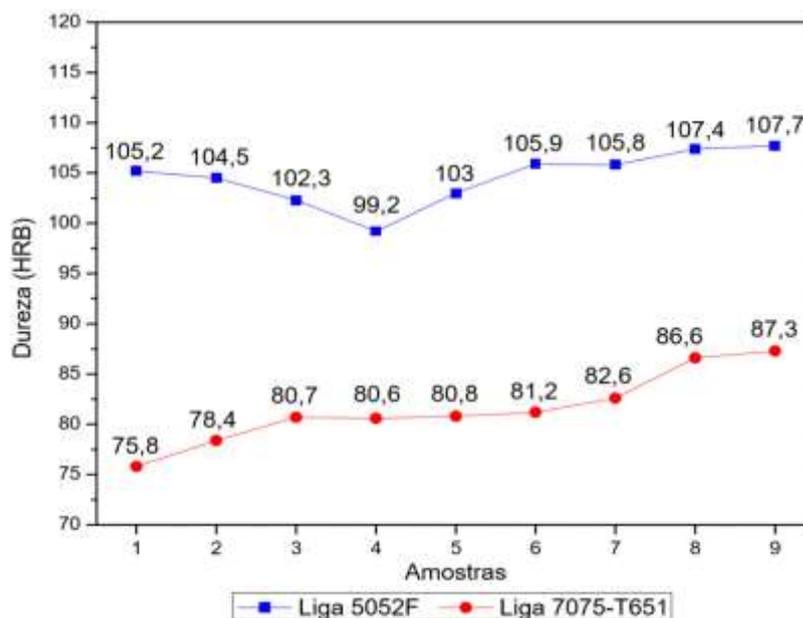
Figura 12: Metalografia comparativa dos alumínios 5052F (a) e 7075-T651 (b) após tratamento



Fonte: Autor

Quando fora aplicado o ensaio de dureza Rockwell para medição da variação e eficácia do tratamento térmico, observou-se que os corpos de prova da liga 7075-T651 (retirados com menor intervalo de tempo), sofreram uma queda em termos de dureza, mas em compensação, ele se tornou mais dúctil. O gráfico a seguir representa a comparação de valor de dureza da liga 5052F estabilizada e da 7075-T651 solubilizada e envelhecida.

Gráfico 06: Dureza dos corpos de prova após tratamento

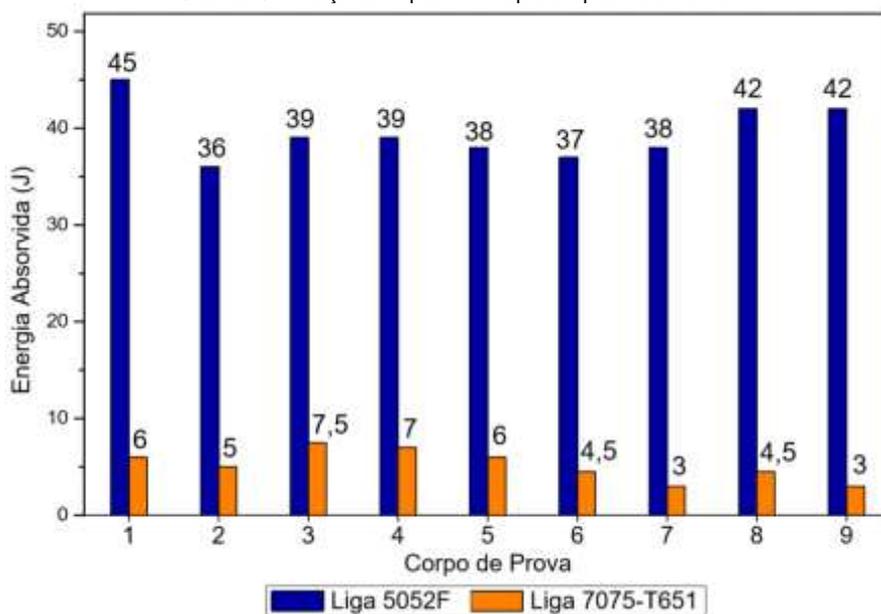


Fonte: Autor

Para fins comparativos de energia absorvida em cada liga após tratamento térmico, o ensaio de Charpy fora repetido em nove amostras de cada material, lembrando que cada amostra da liga 7075-T651 fora

retirada do tratamento de envelhecimento com tempo de tratamento pré-determinado¹⁹. O gráfico 7 mostra a comparação de resistência de impacto das duas classes aluminosas em estudo.

Gráfico 07: Força de impacto de ruptura após tratamento



Fonte: Autor

As amostras da liga 5052F manifestou uma ligeira redução de absorção ao impacto após a estabilização, no entanto, ainda bastante superior a liga 7075-T651. As amostras de 1 a 5 retiradas com intervalo de tempo de até 12 horas do alumínio 7075-T651, atingiram menores índices de dureza Rockwell. Em contrapartida a absorção de impacto melhorou razoavelmente, demonstrando alteração na curva de tensão/deformação, expandindo a zona plástica e ampliando seu limite de ruptura. De 6 a 9 os corpos de prova apresentaram valores de dureza e resistência ao impacto ligeiramente semelhantes a corpo de prova inicial, sem tratamento.

5. Conclusão

Analisando e comparando os resultados obtidos, as seguintes conclusões podem ser delineadas: no teste de dureza nos dois objetos de estudo, ou seja, as ligas 5052F e 7075-T651; a liga 5052F apresenta dureza e resistência ao impacto bastante superior a liga 7075-T651. A liga 5052F após estabilização, apresentou pequena variação na dureza, não comprometendo o material utilizado no processo inicial da pesquisa. Esse resultado é corroborado após a solubilização e envelhecimento nos corpos de prova do alumínio 7075-T651 que apresentaram dureza máxima de 87,3 Hrb. Os valores mais significativos de dureza e resistência nesta liga apareceram em 12 horas de tratamento e em temperatura de 120 C°, onde foram identificados através dos ensaios micrográficos, uma maior formação de precipitados e obtidas maiores taxas de absorção de impacto.

As amostras do alumínio 7075-T651 que foram retiradas do tratamento em 12 horas, atingiram menores índices de dureza Rockwell. No entanto, houve melhora na absorção do impacto. Neste intervalo, o alumínio demonstrou alteração na curva de deformação, expandindo a zona plástica e ampliando seu limite de ruptura se tornando mais dúctil.

Os corpos de prova de 6 a 9, apresentaram valores de dureza e resistência ao impacto ligeiramente semelhantes ao corpo de prova inicial, sem tratamento. Os resultados de resistência à fratura, revelaram que não houve grandes influências nas amostras com tempo de tratamento de: 6, 24, 30 e 36 horas. A amostra de número 9 que recebeu tratamento durante 36 horas, apresentou resultados parecidos com a amostra sem tratamento.

Não houve alteração relevante nas amostras finais após os tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento. O resultado mais significativo foi no alumínio 7075-T651 que passa por uma ligeira ductibilidade em um determinado tempo, mas volta ao seu estado inicial em 36 horas, revelando uma característica que o 5052F não possui, pois, o alumínio 5052F possui uma tenacidade bem alta e quase nenhuma variação

em suas propriedades mecânicas de dureza e resistência a impacto. A liga 5052F, também não sofre nenhuma alteração significativa exposta a altas temperaturas.

Portanto, compreende-se que, o fato do tratamento do alumínio 5052F ser por deformação plástica através de um processo tensional, bem como possuir o elemento magnésio em sua composição, transforma seu nível de ductibilidade extremamente elevado. Isso confere a ele maior resistência mecânica à corrosão e soldabilidade. Materiais resistentes à altas temperaturas são também resistentes à pressão da água dos oceanos, característica fundamental que, aliada à sua baixa densidade, traz a indústria naval uma excelente opção na fabricação de pequenas e grandes embarcações.

Já as ligas de alumínio e zinco como a 7075-T651, após tratamento térmico, precisam possuir: dureza, maleabilidade, ductibilidade, elasticidade, contração e expansão. A indústria aeronáutica nos últimos 50 anos vem aperfeiçoando este material pelos benefícios enormes na fabricação de aviões. As aeronaves precisam de um elemento resistente a corrosão por causa do ácido existente na água da chuva acumulada nas nuvens, à impactos caso haja algum acidente em terra ou ar, e denso; principalmente nas asas e aerofólios que contrabalanceiam a força da gravidade. Outro fator importante é a capacidade de contração e expansão quando exigido, por causa da pressão atmosférica e compressão do ar no interior das aeronaves.

6. Referências

- [1] ALUMINIO, Abal Associação Brasileira de. **História de Alumínio**. 2017. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/aluminio/historia.asp>>. Acesso em: 24 ago. 2019.
- [2] MATTOS, Wellington da Silva. **Análise de corrosão e comportamento mecânico de ligas de alumínio aeronáutico 7075-T6 após tratamento térmico usando a técnica uphill**. 2018. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- [3] SERRANO, Alexandre Costa. **Estudo da fadiga em liga de alumínio aeronáutico 7475-T761**. 2013.
- [4] XAVIER, Clésio Lourenço. Padrões de especialização e saldos comerciais no Brasil. **Ensaio FEE**, v. 22, n. 2, p. 122-147, 2001.
- [5] MIRA, Gonçalo Miguel Beirão de et al. **Efeito do “micro-shot-peening” na propagação de fendas por fadiga na liga aeronáutica Al 7475-T7351**. 2015. Dissertação de Mestrado.
- [6] BRAGA, Ana Paola Villalva. **Análise de ligas de alumínio aeronáuticas conformadas por jateamento com granalhas-caracterização e previsão de deformação**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- [7] CAVALCANTE, Felipe Fernandes. **Comportamento mecânico e tenacidade à fratura de ligas de alumínio 2024 e 7075 submetidas a diferentes tempos de envelhecimento**. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- [8] ASM. Aluminim 5052. 2019. Disponível em: <<http://www.ASMmatweb.com>>. Acesso em: 12 set. 2019.
- [9] ASM. Aluminim 7075. 2019. Disponível em: <<http://www.ASMmatweb.com>>. Acesso em: 12 set. 2019.
- [10] DINSDALE, K. et al. Development of mechanical properties in Al, Li, Zn, Mg, Cu alloys. **Materials Science and Engineering: A**, v. 104, p. 75-84, 1988.
- [11] ALMEIDA, G. B.; AMBROZIO, F.; COELHO, R. E. Caracterização de Ligas de Alumínio Produzidas por Metalurgia do Pó. **Revista Matéria**, v. 9, n. 4, p. 325-333, 2004.
- [12] ROHDE, Regis Almir. **Metalografia preparação de amostras**. Laboratório de ensaios mecânicos. Universidade Regional Integrada do alto Uruguai e Missões, 3ª Edição, Rio Grande do Sul, 2010.
- [13] SONG, Guan Ling; ATRENS, Andrej. Corrosion mechanisms of magnesium alloys. **Advanced engineering materials**. v. 1, n. 1, p. 11-33, 1999.
- [14] PEREIRA, M. C. et al. Efeito do tratamento térmico na corrosão das ligas de alumínio 2024 e 7050 em meio salino. **Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales**, v. 20, n. 1, p. 63-66, 2000.

- [15] TSAO, Chi-Yuan; SU, Yen-Hao; CHIANG, Chun-Hsien. **Aluminum alloy with improved mechanical properties at high temperatures**. U.S. Patent n. 7,255,756, 14 ago. 2007.
- [16] ARIZMENDI-SALGADO, V. A. et al. Effect of Heat Treatment on the Corrosion Behavior of Welded 7075 T6 Aluminum Alloy Without Filler Material. **Int. J. Electrochem. Sci**, v. 14, p. 8243-8255, 2019.
- [17] CHARITIDIS, Costas et al. Friction Stir Welding between 6082 and 7075 Aluminum Alloys Thermal Treated for Automotive Applications. **Materials Performance and Characterization**, v. 8, n. 4, 2019.
- [18] GÖKOZAN, H. et al. Analysis of artificial aging with induction and energy costs of 6082 Al and 7075 Al materials. **Rev. Metal**, v. 55, n. 1, p. e137, 2019.
- [19] TAVARES, P. A. et al. **Influência do Tempo de Envelhecimento na Dureza da liga AA 7075-T6**. II SINACEN, p. 54.
- [20] CALLISTER W.D. **“Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução”**. LTC Editoras, 2012.
- [21] HERRMANN, K. (Ed.). (2011). **Hardness testing: principles and applications**. ASM International.
- [22] FIGUEIRA FILHO, Domingos. **TA. Dureza de corpos sinterizados**. 2013.
- [23] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6157: materiais metálicos-determinação da resistência ao impacto em corpos de prova entalhados simplesmente apoiados: método de ensaio**. ABNT, 1980.
- [24] Pinto, André Luis. **"Avaliação do Comportamento Mecânico Tenacidade a Fratura da Liga de Alumínio 7075-T651."** CIPEEX 1 (2015).
- [25] SOUZA, S. A. de. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**. Edgard Blucher, 5.ed., São Paulo, 1982.
- [26] Site: <https://www.docsity.com/pt/relatorio-ensaio-de-impacto-Charpy/4839978/>. Acesso em: 26/09/2019
- [27] <http://portuguese.aluminumalloyplate.com/sale-10372059-2324-t39-aerospace-aluminum-alloys-a2024-large-size-aircraft-grade-aluminum-thin-sheet-t3.htm>. Acesso em: 26 de outubro de 2019
- [28] COLPAERT; Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 3ª Edição, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo – 1974.
- [29] <http://panantec.com.br/jinan/pen/pen.htm>. Acessado em 13 de outubro de 2019.