



Estudo do refinamento do grão da liga Ti6Al4V após tratamento térmico de envelhecimento, recozimento e têmpera*

Liduína Soares de Carvalho Mendes¹

RESUMO

O tratamento térmico de ligas de titânio, como a Ti-6Al-4V, é essencial para ajustar suas propriedades mecânicas e microestruturais. Desta forma os tratamentos térmicos são fundamentais para melhorar as propriedades das ligas de titânio. O presente trabalho tratou de investigar e caracterizar o efeito dos tratamentos térmicos de envelhecimento, recozimento e têmpera no refinamento do grão da liga Ti6Al4V. Através de tratamento térmico de envelhecimento, recozimento e têmpera foram analisadas a microestrutura e dureza de 7 amostras. As amostras analisadas foram preparadas para a análise de micrografia e microdureza através de técnica metalográfica após tratamento térmico. Suas microestruturas e microdurezas foram analisadas a partir de análise de microscopia ótica e microdurômetro Vickers. Esta pesquisa constatou uma transição de fase ocorrida acima da temperatura β -transus (1050°C) que resultou em duas microestruturas: martensita e widmanstätten, com resfriamento brusco e resfriamento lento respectivamente. Mais 3 amostras foram aquecidas abaixo da temperatura β -transus (550°C , 650°C e 750°C) e resfriadas em temperatura ambiente após tratamento de solubilização, que resultou na microestrutura bimodal. Ocorreu um aumento considerável da microdureza em relação a amostra base, ocorrendo uma diminuição apenas na estrutura bimodal a partir de 650°C devido ao superenvelhecimento. Os resultados para a microestrutura variaram conforme tratamento térmico. Puderam ser avaliadas diferentes estruturas, obtendo-se as estruturas tipo widmanstätten, martensita e bimodal. Constatou-se que a modificação na microestrutura da liga Ti-6Al-4V influencia na microdureza de forma específica para cada tratamento realizado.

Palavras-chave: Titânio, Microestrutura, Tratamento térmico.

ABSTRACT

Heat treatment of titanium alloys, such as Ti-6Al-4V, is essential to adjust their mechanical and microstructural properties. Thus, heat treatments are essential to improve the properties of titanium alloys. This work aimed to investigate and characterize the effect of aging, annealing and tempering heat treatments on the grain refinement of Ti6Al4V alloy. Through aging, annealing and tempering heat treatment, the microstructure and hardness of 7 samples were analyzed. The analyzed samples were prepared for micrograph and microhardness analysis through metallographic technique after heat treatment. Their microstructures and microhardness were analyzed through optical microscopy and Vickers microhardness test. This research found a phase transition occurred above the β -transus temperature (1050°C) that resulted in two

* Submetido em 19/03/2025 – Aceito em: 22/04/2025

¹ Liduína Soares de Carvalho Mendes 1, Brasil – lid.mendes1@hotmail.com

microstructures: martensite and widmanstätten, with sudden cooling and slow cooling respectively. Three more samples were heated below the β -transus temperature (550°C, 650°C and 750°C) and cooled to room temperature after solution treatment, which resulted in a bimodal microstructure. There was a considerable increase in microhardness in relation to the base sample, with a decrease only in the bimodal structure after 650°C due to overaging. The results for the microstructure varied according to the heat treatment. Different structures could be evaluated, obtaining the widmanstätten, martensite and bimodal structures. It was found that the modification in the microstructure of the Ti-6Al-4V alloy influences the microhardness in a specific way for each treatment performed.

Keywords: Titanium, Microstructure, Heat treatment.

1 INTRODUÇÃO

O titânio é um elemento químico de símbolo Ti e número atômico 22. Este metal é classificado como de transição e conhecido por sua alta resistência, baixa densidade, e excelente resistência à corrosão, tanto em meios marinhos quanto em ambientes agressivos industriais. Descoberto em 1791 por William Gregor, o titânio é o nono elemento mais abundante na crosta terrestre, representando cerca de 0,6% em massa (Donachie, 2000; Leyens e Peters, 2003). É um dos mais importantes elementos metálicos existentes, sendo de extrema importância para o desenvolvimento industrial e tecnológico.

A produção de titânio envolve a extração do mineral rutilo (TiO_2) ou ilmenita (FeTiO_3), seguido por um processo de redução, geralmente pelo método Kroll, que converte o dióxido de titânio em titânio metálico (Kroll, 1940). Segundo o US Geological Survey (2021), a produção mundial de esponja de titânio foi de aproximadamente 210 mil toneladas em 2020, com a China, Japão, Rússia e Cazaquistão sendo os principais produtores.

O titânio é amplamente utilizado em diversas indústrias, na indústria aeroespacial, é valorizado por sua combinação de leveza e resistência, sendo utilizado em componentes estruturais de aeronaves e motores (Leyens e Peters, 2003). No setor biomédico, o titânio é o material preferido para implantes dentários e ortopédicos devido à sua biocompatibilidade e resistência à corrosão (Geetha *et al.*, 2009). A sua excelente resistência à corrosão se dá por conta da formação de uma camada de óxido passiva na sua superfície, que o protege de ataques de ácidos e outros agentes corrosivos (Geetha *et al.*, 2009).

Além do titânio puro, suas ligas também têm destaque, em diversas aplicações, tais ligas são desenvolvidas para melhorar ainda mais as propriedades do metal puro, combinando resistência mecânica, resistência à corrosão e ductilidade, as ligas de titânio incluem Ti-3Al-2.5V, utilizada em aplicações aeronáuticas, e Ti-Ni, conhecida por suas propriedades de memória de forma, e, entre todas as ligas de titânio usadas industrialmente, e de acordo com Sabban (2018), a liga Ti-6Al-4V é uma das mais utilizadas em decorrência da sua excelente combinação de força e dureza.

A liga de Ti6Al4V, composta por 6% de alumínio e 4% de vanádio, é a mais comum e amplamente utilizada devido à sua combinação equilibrada de propriedades mecânicas e resistência a ambientes corrosivos (Lutjering e Williams, 2007). Estas ligas são especialmente valorizadas por suas aplicações, em decorrência de sua relação resistência-peso, na indústria aeroespacial são usadas em componentes de motores e fuselagens de aeronaves devido à sua resistência à fadiga e à corrosão em altas temperaturas (Leyens e Peters, 2003). Suas aplicações abrangem diversas indústrias, destacando-se principalmente nas áreas aeroespacial, biomédica, automotiva e na engenharia marinha.

2 MOTIVAÇÃO

A liga Ti-6Al-4V, classificada como uma liga de titânio $\alpha+\beta$, inclui alumínio e vanádio em sua composição. O alumínio promove a estabilização da fase α , enquanto o vanádio favorece a estabilização da fase β . Esta combinação torna a liga altamente sensível aos tratamentos térmicos, possibilitando uma ampla gama de propriedades mecânicas ajustáveis (Leyens e Peters, 2003). Os tratamentos térmicos, como recozimento, têmpera e envelhecimento, provocam mudanças na microestrutura do material, permitindo a otimização das propriedades mecânicas para aplicações específicas. Essas mudanças incluem a modificação do tamanho de grão, a distribuição de fases e a precipitação de compostos secundários, resultando em melhorias significativas na resistência à tração, dureza e resistência à fadiga (Lütjering e Williams, 2007; Ahmed e Rack, 1998).

Segundo Lütjering e Williams (2007), o tratamento térmico de ligas de titânio, como a Ti-6Al-4V, é essencial para ajustar suas propriedades mecânicas e microestruturais. O recozimento promove uma microestrutura homogênea e refinada, reduzindo tensões residuais e melhorando a ductilidade. A têmpera, seguida de envelhecimento, resulta em uma combinação otimizada de resistência à tração e tenacidade devido à formação de precipitados finos e estáveis nas fases α e β (Lütjering e Williams, 2007).

Já Kauppila *et al.*, (2019), afirmam que as transformações de fase durante o resfriamento controlado de ligas $\alpha+\beta$, como a Ti-6Al-4V, são cruciais para o refinamento de grãos. Ainda de acordo com os pesquisadores, o controle preciso da temperatura e da taxa de resfriamento durante o tratamento térmico permite a manipulação da morfologia e distribuição das fases α e β , resultando em melhorias substanciais na resistência mecânica e na estabilidade térmica da liga.

No que diz respeito ao envelhecimento, que também é um tratamento térmico aplicado a ligas de titânio para precipitar compostos secundários que fortalecem a matriz do material, para a liga Ti-6Al-4V, de acordo com Casadebaigt *et al.* (2020), o envelhecimento após a têmpera pode aumentar significativamente a resistência à tração e a dureza, enquanto mantém uma boa tenacidade e resistência à fadiga.

Desta forma os tratamentos térmicos são fundamentais para melhorar as propriedades das ligas de titânio, e no que se refere a liga Ti-6Al-4V, após tratamento térmico adequado, esta apresenta, de acordo com Cordeiro *et al.*, (2020); Ho *et al.*, (2019), uma microestrutura que favorece a biocompatibilidade e a integração óssea, essenciais para aplicações em implantes ortopédicos e dentários. O presente trabalho tratou de investigar e caracterizar o efeito dos tratamentos térmicos de envelhecimento, recozimento e têmpera no refinamento da liga Ti-6Al-4V.

3 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é investigar e caracterizar o efeito dos tratamentos térmicos de envelhecimento, recozimento e têmpera no refinamento do grão da liga Ti6Al4V, visando otimizar suas propriedades mecânicas e compreender os mecanismos de transformação microestrutural associados a cada processo térmico.. Para atingir esse propósito, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma análise detalhada da microestrutura inicial da liga Ti6Al4V antes de qualquer tratamento térmico, utilizando técnicas de microscopia óptica e eletrônica para identificar a distribuição e o tamanho dos grãos e fases presentes;
- Implementar uma série de tratamentos térmicos de envelhecimento, recozimento e têmpera em amostras da liga Ti6Al4V, variando parâmetros como temperatura, tempo de manutenção e taxa de resfriamento;
- Medir a propriedade mecânica de dureza das amostras tratadas, e correlacionar esses resultados com as mudanças observadas na microestrutura;
- Estudar os mecanismos de transformação de fase que ocorrem durante os tratamentos térmicos, como a nucleação e crescimento de grãos e a formação de precipitados, para entender como esses processos influenciam o refinamento do grão e as propriedades finais da liga;
- Comparar a eficácia relativa dos diferentes tratamentos térmicos (envelhecimento, recozimento e têmpera) em termos de refinamento de grãos e melhoria das propriedades mecânicas, identificando quais métodos são mais adequados para aplicações específica.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O titânio é o nono elemento químico mais abundante e o quarto metal estrutural mais abundante na crosta terrestre depois do alumínio, ferro e magnésio, por esses motivos não é considerado uma substância rara. Porém, raramente é encontrado em altas concentrações e nunca em estado puro, o que torna seu processo difícil e consequentemente um metal caro. Geralmente ocorre em minerais contendo ilmenita (FeTiO_3), encontradas nas montanhas Ilmen da Rússia, ou rutilo (TiO_2), nas areias das praias da Austrália, Índia e México. Além desses locais, outros depósitos minerais viáveis incluem locais nos Estados Unidos, Canadá, África do Sul, Serra Leoa, Ucrânia, Noruega e Malásia (Layens e Peters, 2003).

Juntamente com suas ligas formam a terceira matéria prima mais usada no setor aeroespacial, por exemplo. Cerca de 75% da esponja de titânio de alta qualidade é usado na fabricação de componentes de aeronaves como: motores, pás, trem de pouso, fixadores e vigas de asa, etc. Também é bastante utilizado na indústria automotiva para aplicação em bielas, válvulas de motores, escapamentos, molas de suspensão, entre outros. Além disso, a crescente demanda por veículos utilitários desportivos e veículos leves, e o apoio governamental à produção e venda de veículos elétricos também devem estimular o mercado de ligas de titânio.

Este mercado é segmentado por indústria de usuário final (aeroespacial, automotiva e construção naval, química, energia e dessalinização e outras indústrias de usuário final) e geograficamente (Ásia-Pacífico, América do Norte, Europa, América do Sul e Oriente Médio e África) (Mordon Intelligence, 2023).

O titânio a exemplo de outros metais, como: Fe, Co, Zr, Sn, Ce e Hf, pode se transformar em várias estruturas cristalinas, sendo que cada estrutura permanece estável para determinadas faixas de temperatura. A transformação de uma estrutura em outra quando é completa é chamada de transformação alotrópica e a temperatura de transformação é chamada de temperatura β -transus (Layens e Peters, 2003).

Na temperatura de 882 °C (β -transus) ocorre uma transformação de fase alotrópica da sua estrutura, quando uma estrutura cúbica de corpo centrado ou mais conhecida como fase β , seja um titânio puro ou ligado, que é encontrada em altas temperaturas (a não ser que o titânio esteja ligado a outros elementos estabilizadores que o faça se manter na estrutura cúbica mesmo em temperaturas baixas), pode transforma-se em uma estrutura hexagonal de corpo centrado, ou fase α , que passa a existir apenas em baixas temperaturas, podendo ser um titânio puro ou ligado.

A temperatura de transformação da fase alotrópica depende da pureza do metal, já que a exata temperatura é fortemente influenciada por elementos intersticiais e substitucionais. As duas estruturas cristalinas do titânio (α e β) são de extrema importância para a grande variedade de propriedades alcançadas pelas ligas de titânio; e são a base para as quatro mais comumente aceitas classes de ligas de titânio: α , quase α , $\alpha+\beta$ e β . (Donagie, 2000; Lutjerin e Willians, 2007).

As ligas de titânio são consideradas versáteis, pois podem exibir uma ampla variedade de microestruturas, isso ocorre porque o titânio e suas ligas possuem uma grande variedade de transformação de fase dependendo da química da liga, processamento e tratamento térmico. Algumas dessas transformações estão relacionadas com as transformações alotrópicas de α para β , enquanto outras são reações de precipitação que envolve a formação de fases metaestáveis de transição e equilíbrio que ocorrem durante a decomposição das fases α ou β -metaestáveis. As β -metaestáveis geralmente ocorrem mais em situações altamente ligadas, e as microestruturas resultantes são muito complexas em tais ligas. Além das várias transformações microestruturais que ocorrem devido às fases de transformação mais variações estruturais podem surgir devido mudanças

morfológicas de fases constituinte ocasionadas por processos metalúrgicos, como recristalização, esferoidização etc. (Joshi, 2006).

A liga Ti-6Al-4V pertencente aos tipos de liga $\alpha+\beta$ e é a mais utilizada dentre essas ligas. As ligas $\alpha+\beta$ são mais fortes que as ligas α ou as ligas β . Da mesma forma que as α , a $\alpha+\beta$ também possui alumínio como elemento principal em altas quantidades, porém a finalidade é estabilizar a fase α (Donagie, 2000; Joshi, 2006; Gazi et al., 2003). É classificada como liga $\alpha+\beta$ por ser adicionado ao titânio os elementos de alumínio com teor de 6% e vanádio com teor de 4%. Os elementos de alumínio que é um α -estabilizador favorecem a resistência a fluência à medida que melhora as propriedades de resistência a corrosão. Já o vanádio, por sua vez é um elemento β -estabilizador o que possibilita fortalecimento da dureza por meio de tratamento térmico (Layens e Peters, 2003; Moisyev, 2006)

Entre as ligas $\alpha+\beta$, Ti-6Al-4V é considerada a liga de titânio mais popular, sendo que mais de 50% de todas as ligas em uso hoje são desta composição. É uma das primeiras ligas de titânio desenvolvida no início dos anos 1950 nos Estados Unidos no Instituto de Tecnologia de Illinois. Inicialmente foi concebida para ser empregada na indústria da aeronáutica, vindo a torna-se um material de referência, tornando-se o material a base de titânio mais utilizado na fabricação de dispositivos de implante dentário e ortopédicos. As duas principais razões para o sucesso do Ti-6Al-4V é o bom equilíbrio de suas propriedades e o fato de ser a liga de titânio mais intensamente desenvolvida e testada, o que é uma grande vantagem para o setor industrial em especial a indústria aeroespacial que é o maior usuário de Ti-6Al-4V (Layens e Peters, 2003; Long e Rack, 1998).

O emprego das ligas metálicas nos vários setores da engenharia e da indústria é baseado principalmente nas suas propriedades mecânicas; ou seja, na sua capacidade de suportar as cargas impostas pelos processos a que são submetidas. Além dessas propriedades, outras importantes características devem ser consideradas, tais como resistência a corrosão, resistência ao calor, propriedade elétrica e magnética etc. Essas características e propriedades dependem grandemente da estrutura cristalina ou granular e a ligação íntima relacionadas com sua composição química e condições de fabricação. Desse modo, o controle da estrutura metálica passa a ser um fator decisivo para a correta seleção e aplicações dos materiais metálicos (Chiaverini, 2012).

Para o controle e modificações de suas propriedades os materiais metálicos têm como principal recurso os tratamentos térmicos que quando aplicados aos materiais transformam as fases (transformação alotrópicas) e/ou sistemas com solubilidade dos elementos em função da temperatura. Essas transformações ocorrem porque com a aplicação de ciclos de aquecimento e resfriamento controlados faz com que os materiais tenham a sua estrutura e propriedades alteradas, e conseqüentemente seu comportamento adequado a diferentes situações (Abbaschian e Reed-hill, 2009).

O tratamento térmico ainda é considerado o mais seguro e eficiente, logo, o mais utilizado para controlar a estrutura dos metais; uma vez que, o tratamento térmico pode fixar a composição química do material e determinar definitivamente a estrutura desejada. Quanto maior a complexidade das ligas utilizadas e mais críticas as condições de serviços mais necessárias é o tratamento térmico. Metais e ligas não-ferrosas como cobre, alumínio, níquel e o próprio titânio; são submetidos a tratamentos térmicos para atingir propriedades que atendam às necessidades relativas à sua aplicação. Portanto, a execução correta do tratamento térmico é de suma importância para que os resultados sejam alcançados e se tenha maior confiabilidade nas propriedades dos materiais a serem utilizados (Chiaverini, 2012).

5 METODOLOGIA

Para este estudo foi utilizado um cilindro de 10 mm de diâmetro e 103 mm de comprimento de liga Ti6Al4V. Primeiramente foi realizada uma análise química com o objetivo de comprovar que o material está em conformidade com a norma ASTM F136. A análise foi realizada por meio do espectrômetro modelo Epsilon3-XL da marca PANalytical pertencente ao laboratório LABMAT-IFPI.

Após a análise da composição química iniciou-se o preparo das amostras para a realização da micrografia e microdureza. Foram cortadas 7 peças a partir do cilindro de titânio utilizando a cortadora de precisão modelo CPT-25 da marca TECLAGO pertencente ao Laboratório de Mecânica do LABMAT-IFPI. Dessas amostras uma foi utilizada como amostra base para identificação de microestrutura e dureza da barra conforme foi recebida.

Para o tratamento térmico foi utilizado o forno programável JUNG LT6.3013 do laboratório de análises térmicas do LABMAT-IFPI, com atmosfera inerte de gás de argônio para evitar a formação acelerada de óxidos e nitretos indesejáveis. O primeiro tratamento térmico foi realizado em duas etapas. Para a primeira etapa 4 amostras foram solubilizadas a 950°C por 1h e depois resfriadas em água. Dessas 4 amostras uma foi separada para análise de fase intermediária entre amostra base e as amostras envelhecidas. Outras três amostras foram envelhecidas durante 2h em temperaturas diferentes de 550°C, 650°C e 750°C para obtenção da fase bimodal. O segundo tratamento térmico tinha como objetivo obter a microestrutura Widmanstätten. Para isso, uma amostra foi aquecida a 1050°C por 30 min e depois resfriada por 6°/min ao forno. O terceiro tratamento consistiu em submeter uma amostra a uma têmpera a 1050°C e depois resfriada em água. As amostras receberam nomenclatura conforme especificado na Tabela 1:

Tabela 1- Nomenclatura das amostras e tratamentos térmicos

Nomenclatura das Amostras	Tratamento
AB	Amostra retirada do cilindro como recebida
ASL	Aquecida a 950°C/1h e resfriada em água.
A550	1ª Etapa: Aquecida a 950°C/1h e resfriada em água 2ª Etapa: Aquecida a 550°C/2h e resfriada temperatura ambiente.
A650	1ª Etapa: Aquecida a 950°C/1h e resfriada em água 2ª Etapa: Aquecida a 650°C/2h e resfriada temperatura ambiente.
A750	1ª Etapa: Aquecida a 950°C/1h e resfriada em água 2ª Etapa: Aquecida a 750°C/2h e resfriada temperatura ambiente.
AW	Aquecimento a 1050°C/30 min; Resfriamento 6 °C/min ao forno.
AT	Aquecimento a 1050 °C/1h; Resfriamento em água.

Fonte: Dados da pesquisa, 2024

Após o tratamento térmico todas as amostras foram preparadas para análise de microestrutura e dureza segundo procedimento de metalografia. O processo de metalografia consistiu em quatro etapas: embutimento da amostra, lixamento, polimento e ataque químico. O embutimento foi realizado com resina e polimerizante, numa proporção de duas partes de resina para cada parte de polimerizante. Depois de embutidas as amostras foram lixadas na politriz/lixadeira. Para o lixamento foram utilizadas lixas de carbetto de silício de granulometria de 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh. As peças foram lixadas sucessivamente, diminuindo a granulometria das lixas, mudando de direção (90°) a cada troca de lixa, sendo que a troca de lixa era feita depois os traços da lixa anterior fossem eliminados.

Para o polimento foi utilizada a mesma politriz/lixadeira também com o pano de polimento de (em duas etapas) e alumina suspensa. O polimento foi feito em duas etapas, a primeira usou-se 10gr nº1 alumina diluída em 50ml de água, com velocidade do disco de 300 rpm durante aproximadamente 15 min. Para a segunda etapa utilizou-se abrasivo composto de 10gr de alumina nº 3 diluído com 1,5ml de ácido nítrico e mais 1,5ml de ácido fluorídrico. O objetivo da adição de ácido fluorídrico é a obtenção de uma superfície menos distorcida, tornando essa etapa menos demorada.

O ataque químico foi feito por imersão e o tempo de ataque variaram entre 10 e 20 segundos. Para tanto, foi utilizado o reagente químico composto por 85% H₂O (água destilada), 10% HF (ácido fluorídrico) e 5% de HNO₃ (ácido nítrico). O ácido fluorídrico é o reagente mais utilizado para ligas de titânio, porém, tem a tendência de produzir manchas, por esse motivo a adição de ácido nítrico

serviu para remover manchas e promover uma superfície mais brilhante. O ataque químico tem como finalidade revelar a microestrutura, já que pequenos sulcos são formados em torno dos contornos de grãos em consequência do ataque químico. Isso ocorre porque os átomos localizados na região de contorno dos grãos apresentam maior reatividade do que aqueles localizados no interior dos grãos, por isso se dissolvem em uma taxa maior (Callister, 2016).

É importante ressaltar que por se tratar de uma microestrutura de uma liga bifásica a ser examinada foi selecionado um reagente que produza uma textura diferente para cada fase, de tal modo que as diferentes fases puderam ser distinguidas umas das outras (ASTM E407-7, 1999). Durante o lixamento das amostras foi utilizado um microscópio metalográfico da marca Olympus para a observação das amostras, assim certificando-se que cada etapa da preparação eliminou a influência da etapa anterior na microestrutura do material. Todas as etapas da técnica metalográfica, assim como os equipamentos estão localizados no Laboratório de Modificações de Materiais do LabMAT-IFPI.

Após a superfície do material se submetida à técnica de metalografia com o ataque químico a microestrutura pode ser revelada. Os sulcos formados aos longos dos contornos de grãos devido à reação ao ataque químico refletem a luz em ângulos diferentes, assim, foi possível a identificação das microestruturas quando observadas sob o microscópio (Callister, 2016). Para esta etapa foi utilizado o microscópio da marca Olympus, modelo CX31, situado no Laboratório de Microscopia Óptica localizado no LabMAT-IFPI.

6 ANÁLISE DE DADOS E DISCUSSÕES

A análise de fluorescência de raios-X (XRF) confirma as especificações padrão da liga Ti-6Al-4V como estabelecido pelas normas ASTM F136, conforme podemos constatar através da Tabela 2:

Tabela 2- Composição da química da liga Ti6Al4V comparada com a norma ASTM F136

	N	C	H	Fe	O	Al	V	Ti
ASTM F136	0,05	0,08	0,012	0,25	0,13	5,5-6,50	3,5-4,5	-
Barra	-	-	-	0,28	-	5,74	4,48	89,48

Fonte: Dados da pesquisa, 2024.

A alta porcentagem de titânio é a base das propriedades mecânicas e de resistência à corrosão da liga. O titânio, com sua estrutura hexagonal compacta (HCP) em temperatura ambiente, confere

excelente resistência específica e biocompatibilidade (Geetha *et al.*, 2009).

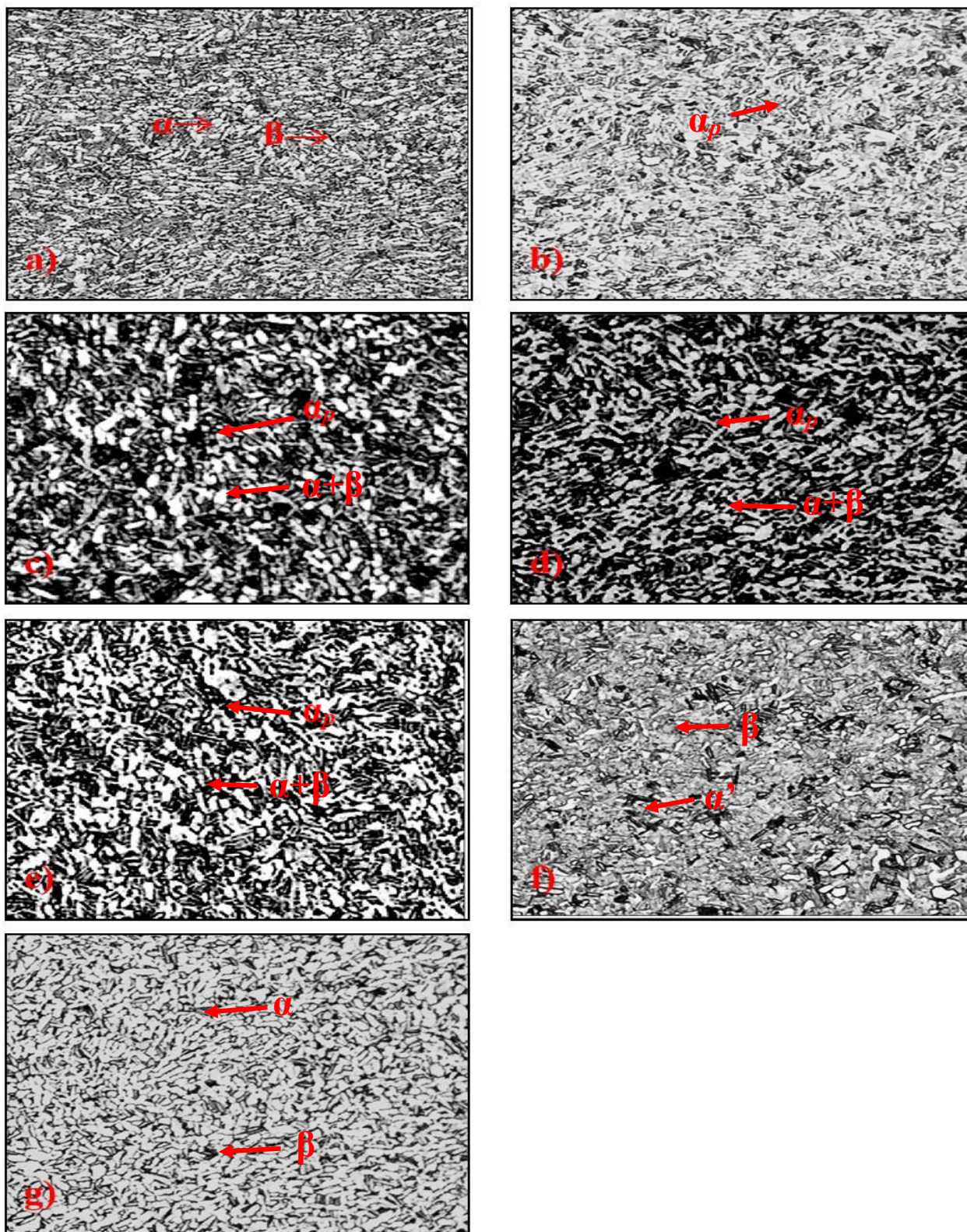
O alumínio é adicionado à liga para estabilizar a fase α (alfa), que é responsável por melhorar a resistência à tração e reduzir a densidade da liga. O alumínio também contribui para a resistência à corrosão e a manutenção de propriedades mecânicas a altas temperaturas (Lutjering e Williams, 2007).

O vanádio, por outro lado, estabiliza a fase β (beta), que é uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC). A presença da fase β confere à liga uma combinação de ductilidade e resistência, além de melhorar a resposta ao tratamento térmico, como envelhecimento e têmpera, que podem refinar a microestrutura e aumentar a resistência mecânica (Ahmed e Rack, 1998).

Os elementos em traços, como ferro, oxigênio, nitrogênio e carbono, embora presentes em pequenas quantidades, também desempenham papéis cruciais. O ferro pode melhorar a resistência mecânica, mas em excesso pode prejudicar a ductilidade (Donachie, 2000). O oxigênio, nitrogênio e carbono são intersticiais que podem aumentar a dureza e a resistência ao desgaste, mas também podem tornar a liga mais quebradiça se não forem controlados dentro de limites especificados (Lutjering e Williams, 2007).

A Figura 1 (a), (b), (c), (d), (e), (f) e (g) demonstra as imagens do microscópio óptico, obtidos para diferentes condições que foram submetidas às amostras.

Figura 1(a). (b), (c), (d), (e), (f), (g)- Imagens M.O liga Ti-6Al-4V com tratamento térmico



Fonte: Dados da pesquisa, 2024

A Figura 1(a), apresenta a microestrutura da amostra como recebida que apresenta a fase $\alpha+\beta$, onde a fase β se encontra nos contornos de grão α . A Figura 1(b), representa a microestrutura

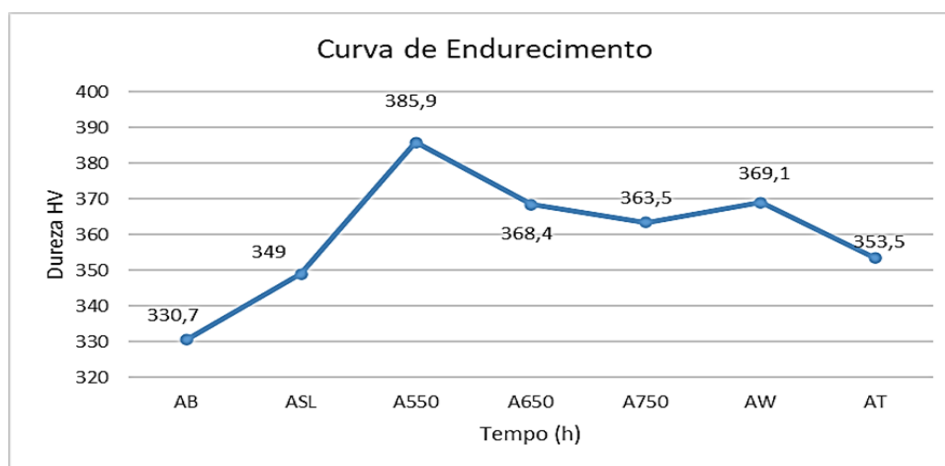
após tratamento térmico de solubilização onde ocorre a formação de grãos equiaxial de alfa primário α_p em uma matriz de martensita α' devido ao aquecimento ocorrer abaixo da temperatura β -transus seguido de resfriamento em água (Lütjering e Williams, 2007).

A Figura 1(c), (d), (e), apresenta a microestrutura bimodal resultante do tratamento térmico de envelhecimento. A estrutura bimodal é formada por α_p (alpha primário) equiaxial com decomposição da fase martensita α' em uma matriz lamelar $\alpha+\beta$ (Donachie, 2000; Leyens e Peters, 2003).

A Figura 1(f) mostra a microestrutura proveniente da solubilização acima de 950° e posteriormente a têmpera resultante de resfriamento brusco em água. Devido ao resfriamento rápido e próximo da temperatura β transus que é de 995° é possível observar a transformação da fase β em martensita α' com a presença de α_p primário equiaxial. A fase α' ocorre no interior dos grãos da fase β primária devido a presença do elemento β -estabilizador desta liga ficar situado antes da composição crítica para a formação da fase martensítica α'' (Abbas et al., 2017). Na Figura 1(g) mostra a microestrutura Widmanstätten que consiste em uma estrutura fina acicular. Esta microestrutura foi obtida a partir de do aquecimento a 1050° e seguido de resfriamento lento ($6^\circ/\text{min}$ ao forno). Em um resfriamento mais lento, β tende a se transformar por nucleação e ter um crescimento para a fase Widmanstätten α . Na estrutura Widmanstätten ocorre uma mudança da morfologia da fase α que consiste em uma colônia de grãos alinhados de forma semelhante para um arranjo de cestaria. Essa mudança ocorre de acordo com a taxa de resfriamento. À medida que a taxa de resfriamento é aumentada a estrutura lamelar torna-se mais fina. No caso de resfriamento mais lento é possível perceber a presença da fase α nos contornos de grão β (Joshi, 2006).

A dureza da amostra base é de 330,7 HV. Os resultados obtidos com os tratamentos térmicos nas amostras AB, ASL, A550, A650, A750, AW e AT são representados na Figura 1:

Figura 1 - Microdureza Vickers das amostras AB, ASL, A550, A650, A750, AW e AT



Fonte: Dados da pesquisa, 2024

Após a solubilização é realizado o tratamento de envelhecimento nas amostras A550, A650

e A750 onde observa-se que ocorre um aumento de dureza em comparação a amostra solubilizada e amostra base. Este aumento justifica-se pela formação da fase α_2 onde ocorre a formação de precipitados coerentes Ti₃Al, já que a formação dos precipitados coerentes acontece na temperatura solvus que é em torno de 550°C na matriz α . A formação deste precipitado na fase α_2 ocasiona a formação de uma barreira que dificulta o deslizamento das bandas cristalinas causando um aumento na dureza do material (Lütjering, 1998). Além da formação dos precipitados coerentes acontece a formação da microestrutura bimodal que é resultante da decomposição da martensita α' que produz uma mistura fina de α e β com a fase α formada em placas em uma matriz β que restringe o deslocamento dos planos cristalinos (Donachie, 2000). Pode-se observar também que houve uma diminuição na dureza das amostras A650 e A750 em relação a A550. Esse decréscimo na dureza ocorre devido ao fato de que em temperaturas acima de 600°C ocorre o fenômeno de super envelhecimento o que resulta em alívio de tensão (Lütjering, 1998).

A amostra AW apresenta uma dureza maior sobretudo na fase α devido a pequena escala de lamelas e a distribuição homogênea das fases. A fase β é mais dúctil e tem uma dureza menor comparada com a fase α (Boyer e Rosenberg, 2001; Kishitake et al., 1998). A amostra AT apresenta um maior valor em relação a AB, isso ocorre devido a microestrutura martensítica formada no tratamento de têmpera proporcionar distorções na rede cristalina que impedem o movimento de discordâncias o que aumenta o valor da dureza (Arruda, 2019). A ser aquecida a elevada temperatura e sofrer resfriamento brusco a liga mantém à temperatura ambiente defeitos em valores estabilizados na alta temperatura. Esses defeitos criam tensões na rede cristalina que tem efeito de aumentar moderadamente a dureza da liga (Pessanha, 2020).

7 CONCLUSÃO

Os resultados para a microestrutura variaram conforme tratamento térmico. No recozimento ocorre uma mudança na morfologia da fase α ocasionando a microestrutura lamelar formado por grãos alinhados em forma de cestaria. Para esse tipo de estrutura os grãos se tornam mais finos à medida que a taxa de resfriamento aumenta, o que indica que a taxa de resfriamento é um fator determinante para a formação da microestrutura Widmanstätten. No tratamento de envelhecimento, a estrutura bimodal se encontra em uma matriz lamelar $\alpha+\beta$ com fase α_p com fase martensítica α' em decomposição. A formação dessa microestrutura é devido ao resfriamento rápido na fase de solubilização que ocorreu próximo a temperatura de transformação alotrópica (β -transus).

Também constatou que entre a temperaturas de 550°C, 650°C e 750°C não houve diferença significativa entre as microestruturas obtidas, visto que, ao mesmo tempo (2h) foi mantido para as três temperaturas, considerou-se que a temperatura não exerce grande influência para a obtenção de estruturas bimodais. Na têmpera, a formação da martensita ocorre devido ao resfriamento rápido e acima da temperatura β -transus, no caso é 995°C. A exemplo da microestrutura widmanstätten, a

forma de resfriamento influenciou no tamanho dos grãos, de maneira que para a martensita os grãos apresentam em forma mais finos em forma de agulhas devido a uma maior taxa de resfriamento que a aplicada na Widmanstätten.

Constatou-se que a modificação na microestrutura da liga Ti-6Al-4V influencia na microdureza de forma específica para cada tratamento realizado. No recozimento a microdureza é maior na fase α se comparada com a fase β , pois possui uma estrutura mais compacta que dificulta o movimento de discordância. O aumento da dureza para as amostras envelhecidas em relação a amostra SI e a base pode ter ocorrido pela formação de precipitados coerentes Ti₃Al, já que em torno de 550°C é a temperatura solvus em que ocorre a formação desses precipitados. Além disso, contribui também para o aumento de dureza a formação da martensita α' . Dessa forma, é possível que os dois fenômenos ocorram simultaneamente. Na têmpera ocorre uma maior saturação dos elementos da liga na concentração que era estável à temperatura da têmpera. Em razão disso existe maior densidade de defeitos no estado temperado que justifica a diferença do valor de dureza em relação a amostra AB.

REFERÊNCIAS

ABBAS, Abdelrahman et al. Microstructure and Hardness of Subzero Quenched and Heat Treated Ti-6Al-4V Alloy. Proceedings of the 3rd Pan American Materials Congress, p.379-391, 2017. Springer International Publishing.

AHMED, T.; RACK, H. J. Phase transformations during cooling in alpha + beta titanium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 243(1-2), 206-211. (1998).

ARRUDA, M. S. T. Análise microestrutural e de microdureza da liga Ti-6Al-4V ELI em diferentes tratamentos térmicos. 2019, 49 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado) – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2019.

BOYER, R.; ROSENBERG, H. S. Atlas of Fatigue Curves. ASM International, 2001.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D.G. Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução. 9. ed. LTC __ Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 2016.

CASADEBAIGT, A. *et al.* Effect of heat treatments on the microstructure and mechanical properties of additively manufactured Ti-6Al-4V parts. *Materials Science and Engineering: A*, 784, 139283. (2020).

CHIAVERINI, Vicente. Tratamento térmico das ligas metálicas. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.

CORDEIRO, C. A. Introduction to Crystallography and Crystal Defects. Wiley, 2020.

DONACHIE, M. J. Titanium: A Technical Guide. ASM International. (2000).

- GEETHA, M. *et al* Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants – A review. *Progress in Materials Science*, 54(3), 397-425. (2009).
- HO, D. T. *Crystallography and Structure of Materials*. Springer, 2019.
- JOSHI, V.A. *Titanium alloys: an atlas of structures and fracture features*. New York: Taylor & Francis Group, 2006.
- KAUPPILA, J. *et al*. Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V fabricated by laser powder bed fusion and the effect of heat treatments. *Additive Manufacturing*, 29, 100796. (2019).
- KISHITAKE, K.; HAYASHI, K.; UMEMOTO, M. Effect of Aging Treatment on Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 1998.
- LEYENS, C.; PETERS, M. *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*. Wiley-VCH. (2003).
- LONG, M.; RACK, H. J.. Titanium alloys in total replacement – a materials science perspective. *Biomaterials*, v.19, p. 1621-1639, 1998.
- LÜTJERING, G. Influence of processing on microstructure and mechanical properties of ($\alpha+\beta$) titanium alloys. *Materials Science and Engineering*. 1998; 243: 32-45.
- LUTJERING, G., WILLIAMS, J. C. *Titanium*. Springer. (2007).
- MOISYEV, Valentin N.. *Titanium Alloys: Russian Aircraft and Aerospace Application*. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2006.
- PESSANHA, E. C. Análise de estrutura, estabilidade e de propriedades físicas e mecânicas das ligas Ti-6Al-4V e AISI 4130 submetidas à recozimento e têmpera. 2020, 158 p. Dissertação (Mestrado de Engenharia e Ciências dos Materiais) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, 2020.
- QAZI, J.I. *et al*. Kinetics of martensite decomposition in Ti-6Al-4V-xH alloys. *Materials Science and Engineering: A*, v. 359, n. 1-2, p. 137-149, 2003.
- SABBAN, R. *et al*. Globularization using Heat Treatment in Additively Manufactured Ti-6Al-4V for High Strength and Toughness, *Acta Materialia* (2018), doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.09.064>