

AVALIAÇÃO DA MICROESTRUTURA DA LIGA DE TITÂNIO Ti6Al4V APÓS TRATAMENTO TÉRMICO DE ENVELHECIMENTO.

Ghisana Fedrigo¹, Mario Wolfart Junior²

¹Instituto Federal Catarinense – IFC Luzerna/ ghisanaf@gmail.com

²Instituto Federal Catarinense – IFC Luzerna/ mario.wolfart@luzerna.ifc.edu.br

Resumo: A liga Ti6Al4V é amplamente utilizada nas indústrias aeroespaciais e de construção naval, campos de energia e engenharia biomédica devido às suas propriedades atraentes, como: baixa densidade em comparação com as ligas de aço, baixo módulo de elasticidade, comportamento não magnético, maior resistência à corrosão, excelente biocompatibilidade e excelente propriedades mecânicas. As propriedades mecânicas desta liga podem ser modificadas através de tratamentos térmicos, já que é uma liga $\alpha+\beta$, tendo como resultado a mudança microestrutural. O objetivo deste estudo é obter a microestrutura bimodal, resultado de tratamentos térmicos e a comparação de durezas e microestrutura entre a liga Ti6Al4V como recebida e amostras da mesma após os processos de solubilização e envelhecimento. Esta microestrutura pode ser obtida através da solubilização à 950°C, abaixo da β transus, com o resfriamento em água, seguido do envelhecimento artificial, no qual possibilita a precipitação de Ti_3Al na matriz α . Com os dados da literatura, foram determinados os parâmetros do tratamento térmico para obtenção da microestrutura bimodal. O ensaio é realizado utilizando seis amostras: a amostra da liga como recebida (Base), solubilizada (S1) e as envelhecidas (EN2, EN3, EN4 e EN5). A solubilização tem por objetivo aumentar a dureza das amostras e preparar parte delas para o processo de envelhecimento e, posteriormente, para as análises de dureza. O processo de envelhecimento, por sua vez, realizado somente nas amostras EN2, EN3, EN4 e EN5, em intervalos de tempo diferentes, possibilita a precipitação de $TiAl_3$ na matriz α . Por fim, a microdureza Vickers foi medida nas amostras Base, S1, EN2, EN3, EN4 e EN5 e os dados foram analisados em um gráfico de dureza versus tempo de envelhecimento. Pode-se observar que a maior dureza foi obtida com o processo de envelhecimento de 3h. Também não foram identificadas mudanças significativas entre as amostras envelhecidas, mas sim entre a amostra Base, a amostra S1 e as amostras envelhecidas.

Palavras-Chave: Ti6Al4V, Endurecimento, Microestrutura bimodal.

1. INTRODUÇÃO

Titânio e suas ligas, tem sido empregada em aplicações funcionais e estruturais como na indústria aeroespacial, automotivas e na indústria biomédica, em razão das suas propriedades, tais como: alta resistência a corrosão, baixa densidade em comparação as ligas de aço, alta resistência mecânica, biocompatibilidade e seu comportamento a fadiga (AşđK; BOR, 2015). Por exemplo, na indústria aeronáutica a implementação de mais componentes de ligas de titânio está intimamente ligada a necessidade de redução de peso da aeronave, possibilitando menor consumo de combustível e maior autonomia de voo (COSTA, 2009). A liga Ti6Al4V é aplicada, por exemplo, em componentes de turbinas, partes estruturais, trens de pouso e outras partes de aeronaves (INAGAKI, 2014). Entre as ligas de titânio existentes, a liga Ti6Al4V é a mais popular, possuindo cerca de 50% do mercado de titânio nos Estados Unidos (MORITA; TANAKA; NINOMIYA, 2016).

Sabendo que o tipo da microestrutura é um fator importante para determinar a resistência a fadiga, pode-se obter um aumento da vida em fadiga da liga Ti6Al4V através de tratamentos térmicos.

O tratamento térmico desta liga, que é uma liga $\alpha+\beta$, pode ser feito acima ou abaixo da temperatura β -transus, sendo que esta é definida como a mínima temperatura em que o material é 100% β . Para liga Ti6Al4V, a β -transus é 995°C (DONACHIE, 2000).

O tratamento térmico de solubilização, feito abaixo da β -transus desta liga, seguido do resfriamento em água, permite a formação da microestrutura com grãos equiaxial de alfa primário α_p em uma matriz de martensita α' (LÜTJERING; WILLIAMS, 2007). Após o tratamento de solubilização, é realizado o tratamento térmico de envelhecimento. Segundo Donachie (2000), o envelhecimento após a solubilização resulta na decomposição da martensita α' , produzindo uma mistura fina das fases α e β , e fazendo com que a fase α seja formada em placas em uma matriz β . Assim, restringe-se o deslocamento dos planos cristalinos. Esta microestrutura, denominada bimodal, é caracterizada por propriedades mecânicas elevadas e boa resistência à fadiga (LEYENS e PETERS, 2003).

Durante o tratamento térmico de envelhecimento, acontece a formação dos precipitados coerentes Ti_3Al , que, segundo Lütjering (1998), ocorre em torno de 550°C. Por exemplo, a partir de 500°C inicia-se a precipitação Ti_3Al , enquanto que acima de 600°C irá somente ocorrer tratamento de alívio de tensão. Este precipitado é denominado também como fase α_2 , que é uma barreira que dificulta os deslizamentos das bandas cristalinas, e ocasiona um aumento na dureza do material e, conseqüentemente, no aumento da resistência mecânica.

O objetivo deste estudo é obter a microestrutura bimodal, resultado de tratamentos térmicos e a comparação de durezas e microestrutura entre a liga Ti6Al4V como recebida e amostras desta liga mesma após os processos de solubilização e envelhecimento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado para o presente estudo foi uma barra de diâmetro de 11,11 mm da liga Ti6Al4V cuja composição química desta é fornecida na Tabela 2. A análise química foi realizada pelo espectrômetro Buker Elemental do laboratório LAMEF -UFRGS.

Para a realização das análises deste estudo foram utilizadas 6 amostras da liga Ti6Al4V, conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1 – Identificação das amostras

Nomenclatura das amostras	Descrição
Base	Amostra retirada da barra como recebida
S1	Amostra solubilizada à 950°C
EN2	Amostra envelhecida à 550°C por 2h
EN3	Amostra envelhecida à 550°C por 3h
EN4	Amostra envelhecida à 550°C por 4h
EN5	Amostra envelhecida à 550°C por 5h

Fonte: Elaborada pelos autores

A amostra Base foi utilizada para identificação da microestrutura e dureza da liga da barra conforme recebida. Este procedimento é realizado com o objetivo de obter dados iniciais para comparação dos resultados após os procedimentos de tratamento térmico. A amostra S1, por sua vez, passou por um tratamento térmico de solubilização com o objetivo de servir como um dado de análise intermediário entre o valor de dureza da amostra Base e as amostras envelhecidas. Por fim, as amostras EN2, EN3, EN4 e EN5 passaram por processos de tratamento térmico de solubilização e envelhecimento, em tempos diferentes, a fim de verificar o aumento da dureza e a mudança da microestrutura ocasionados pelo processo de envelhecimento posterior ao de solubilização.

As amostras S1, EN2, EN3, EN4 e EN5 foram tratadas termicamente com o processo de solubilização. Esse processo consiste em manter as amostras na temperatura de 950°C por 1h e, posteriormente resfriá-las em água. Em seguida, foi realizado o tratamento térmico de envelhecimento nas amostras EN2, EN3, EN4 e EN5, que consiste em mantê-las em temperatura de 550°C durante 2h, 3h, 4h e 5h, respectivamente, resfriando-as em temperatura ambiente ao término. O equipamento utilizado para os tratamentos térmicos foi o forno Jung e um sistema de aquisição de dados com termopar tipo K para certificar a temperatura real das peças.

Após o resfriamento das amostras envelhecidas, todas as seis amostras foram preparadas para análise de microdureza e micrografia segundo procedimento de preparo padrão de amostras: lixamento das superfícies de análise com lixas de granulometrias 150, 220, 400, 600 e 1200 mesh, e polimento com pasta de diamante de 3 e 1 μm .

A microdureza foi realizada com um indentador Vickers, com a carga de 500g ($HV_{0,5}$), no microdurometro Vickers EQMV-2000Z. A média das durezas foi determinada através de 5 indentações para cada corpo de prova.

A análise micrográfica foi realizada para verificar a microestrutura de cada amostra. Para isso, estas foram atacadas quimicamente com o reagente Kroll (2ml HF, 6ml HNO₃, 92 ml H₂O) a fim de revelar a microestrutura. O microscópio ótico utilizado foi o OPTIKA B1000MET.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta a composição química da liga Ti6Al4V, no qual comprova que a liga é referente a norma ASTM F136.

Tabela 2- Composição química da liga Ti6Al4V selecionada para presente investigação (wt%).

	N	C	H	Fe	O	Al	V	Ti
Barra	0,005	0,017	0,002	0,101	<0,050	6,296	4,077	89,41
ASTM F136	0,05	0,08	0,012	0,25	0,13	5,5-6,50	3,5-4,5	-

Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 1 mostra a microestrutura da liga Ti6Al4V em diferentes condições. Como pode ser visto, na Figura 1.a), a microestrutura amostra Base consiste em $\alpha+\beta$, com a fase β nos contornos dos grãos α , resultante de um tratamento térmico de recozimento.

A Figura 1.b) mostra a microestrutura obtida da solubilização à 950°C seguido da têmpera em água, resultando na transformação da fase β em martensita α' com uma mistura de $\alpha\prime$ primário equiaxial, similar ao resultado encontrado por Donachie [6] e Pimke [7]. A formação da martensita é devido ao resfriamento rápido e próximo da temperatura de transformação alotrópica, no caso a β *transus* que é de 995°C.

As Figuras 1.c), 1.d), 1.e) e 1.f) são denominadas bimodal pois sua microestrutura resultante é característica do tratamento de envelhecimento a 550°C, na qual a martensita α' decompõe-se em uma matriz lamelar $\alpha +\beta$ com alfa primário equiaxial $\alpha\prime$ (LEYENS, 2003). Não foram observadas mudanças microestruturais através da microscopia ótica entre as amostras envelhecidas.

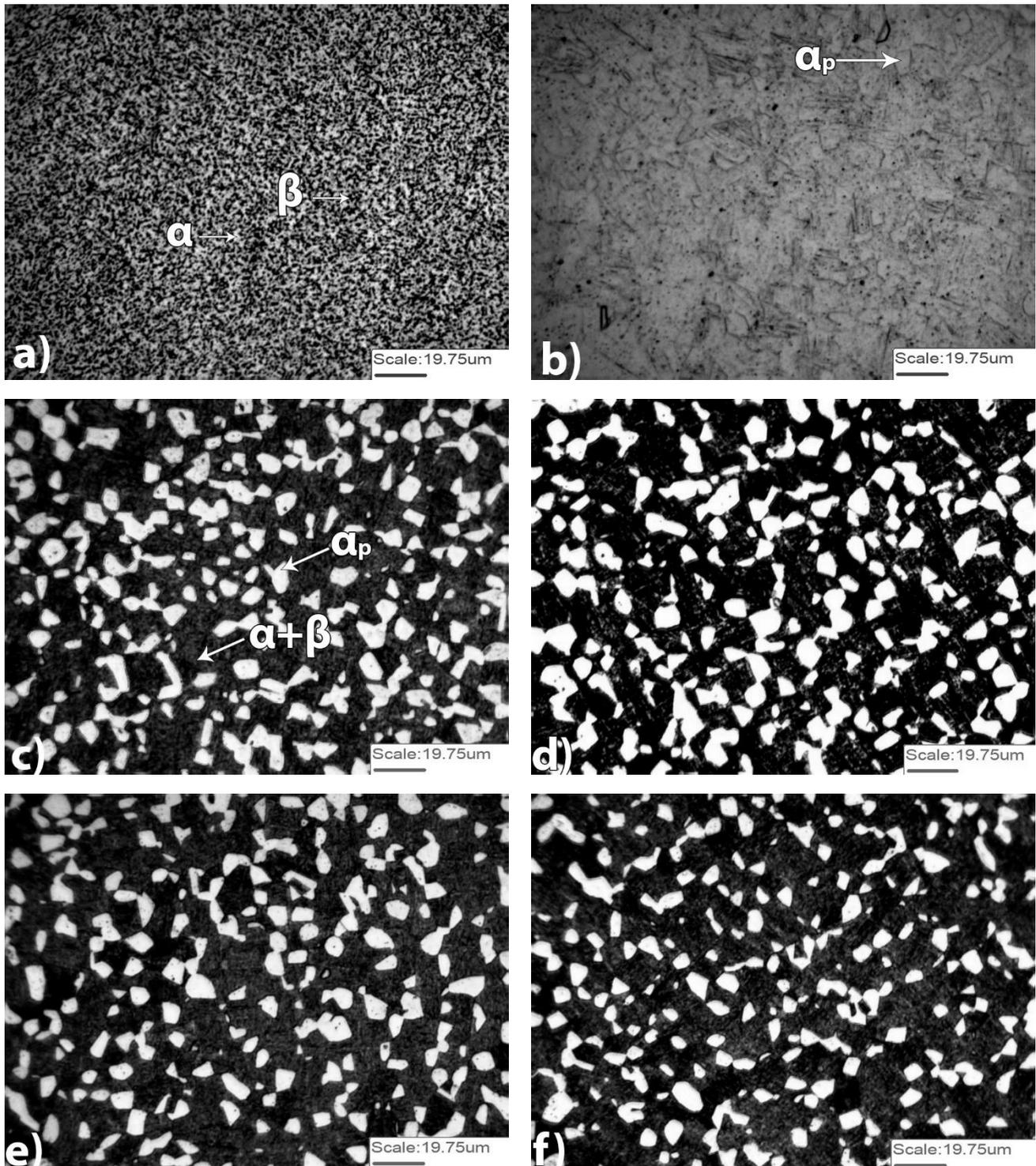


Figura 1 – Microestrutura das amostras da liga de titânio Ti6Al4V a) Base b) S1 c) EN2 d) EN3 e) EN4 f) EN5. (Elaborado pelos autores.)

A dureza da amostra Base é de 346 HV. O efeito do tempo no tratamento térmico de envelhecimento das amostras S1, EN2, EN3, EN4 e EN5 são apresentados, respectivamente, nos tempos 0h, 2h, 3h, 4h e 5h do gráfico da Figura 2.

A partir do tempo 0h, a dureza medida nas amostras aumentaram até atingir o tempo de 3h, que apresentou o pico máximo de dureza de 447 HV. Após 3h é possível observar que ocorreu a queda da dureza que vai de 447 HV a 415 HV e 420 HV (4 e 5 horas) o que mostra que ocorreu um superenvelhecimento acima de 3 horas de tratamento.

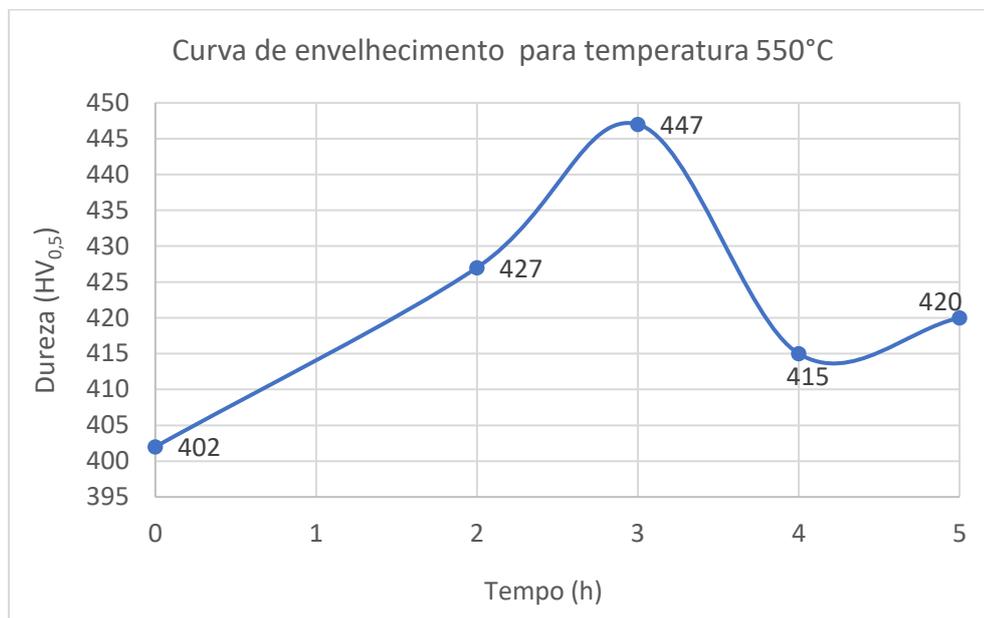


Figura 2 - Curva de envelhecimento da liga de titânio Ti6Al4V para a temperatura de 550°C.
(Elaborado pelos autores).

A comparação das durezas das amostras como recebida, solubilizada e da amostra envelhecida pode ser vista na Figura 3.

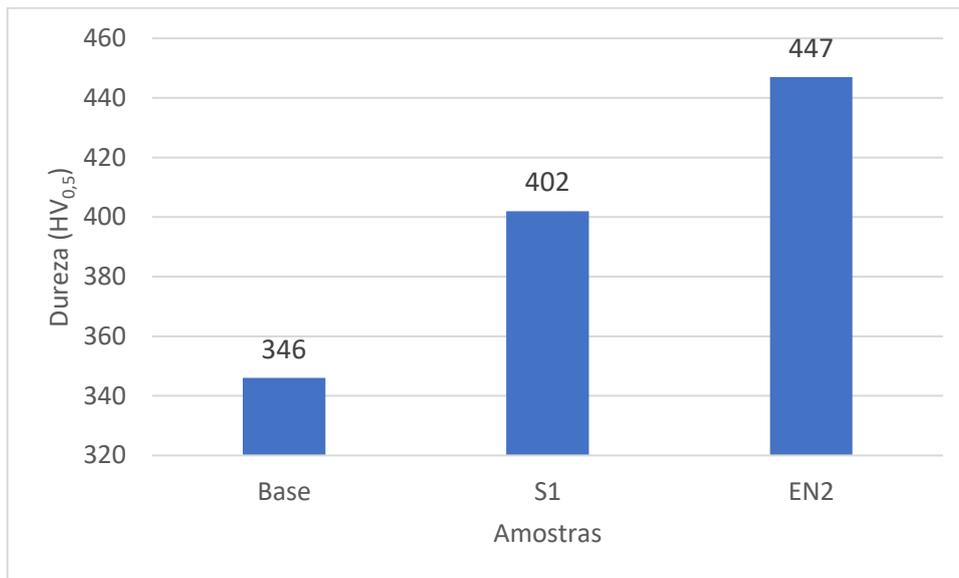


Figura 3- Comparação da microdureza vickers na amostra da como recebida, solubilizada e envelhecida à 550°C por 3h. (Elaborado pelos autores).

O aumento da dureza para as amostras envelhecidas, em relação a amostra S1 e a Base, pode ser justificado pela formação de precipitados coerentes Ti_3Al , denominado α_2 . Segundo Lütjering (1998), a temperatura solvus para os precipitados coerentes é em torno de 550°C na matriz α . Para o envelhecimento a 550°C após o tempo de 3h ocorre o crescimento excessivo dos precipitados e, conseqüentemente, a perda da coerência destes na matriz ocasionando a redução da dureza. Outro fato que contribui para o aumento da dureza, segundo Morita et al. (2005) é decorrente da formação da martensita α' na têmpera em água. Sendo assim, acredita-se que os dois fenômenos ocorrem simultaneamente, a precipitação de Ti_3Al e a decomposição da martensita α' .

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através das análises microestrutural e de microdureza de todas as amostras da liga de titânio Ti6Al4V, foram investigados os efeitos dos tratamentos térmicos na microestrutura e propriedades mecânicas. Baseada nas análises, as seguintes conclusões podem ser esquematizadas:

- A microestrutura resultante do tratamento térmico de envelhecimento é a bimodal, composta de α_p (alfa primaria) e decompondo a martensita α' nas fases $\alpha+\beta$.
- O tratamento térmico de envelhecimento à 550°C aumentou a dureza da amostra de Ti6Al4V, atingindo o pico de dureza para o tempo de 3h. Este aumento de dureza pode ser

resultado da decomposição da martensita α' nas fases $\alpha+\beta$ e também da formação de precipitados Ti₃Al, denominados de fase α_2 .

- O decréscimo da dureza a partir do tempo de envelhecimento de 3h é devido ao fenômeno de superenvelhecimento,
- A pesquisa mostra que é possível aumentar em torno de 23% a dureza da amostra EN3 (447 HV) em relação a amostra Base, de 346 (346 HV).

AGRADECIMENTOS

Ao LABEMM – Laboratório de ensaios mecânicos e metalúrgicos e ao IFC Campus Luzerna pelo apoio técnico, infraestrutura e interesse neste estudo.

Ao LAMEF – Laboratório de metalurgia física pertencente a UFRGS pela análise química da liga Ti6Al4V.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **F136**: Standard Specification for Wrought Titanium-6Aluminum-4Vanadium ELI (Extra Low Interstitial) Alloy for Surgical Implant Applications (UNS R56401). West Conshohocken: ASTM International, 2008. 4 p.

AşđK, E. Erkan; BOR, Şakir. Fatigue behavior of Ti–6Al–4V foams processed by magnesium space holder technique. **Materials Science And Engineering: A**, [s.l.], v. 621, p.157-165, jan. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2014.10.068>.

COSTA, Midori Yoshikawa Pitanga. **FADIGA EM TITÂNIO AERONÁUTICO REVESTIDO POR PVD**. 2009. 125 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

DONACHIE, Matthew J.. **Titanium: A Technical Guide**. 2. ed. Materials Park, Ohio: Asm International, 2000. 381 p.

INAGAKI, I. et. al. **Application and Features of Titanium for the Aerospace Industry**. NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL TECHNICAL REPORT No. 106 JULY 2014. Disponível em: <<http://www.nssmc.com/en/tech/report/nssmc/pdf/106-05.pdf>>. Acesso em 28 de fevereiro de 2017

LEYENS, Christoph; PETERS, Manfred. **Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications**. Weinheim: Wiley-vch, 2003. 532 p.

LÜTJERING, G.. Influence of processing on microstructure and mechanical properties of ($\alpha+\beta$) titanium alloys. **Materials Science And Engineering: A**, [s.l.], v. 243, n. 1-2, p.32-45, mar. 1998. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0921-5093\(97\)00778-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0921-5093(97)00778-8).

LÜTJERING, Gerd; WILLIAMS, James C.. **Titanium**. 2. ed. Heidelberg: Springer, 2007. 442 p.

MORITA, Tatsuro et al. **Strengthening of Ti-6Al-4V Alloy by Short-Time Duplex Heat Treatment**. Materials Transactions, [s.l.], v. 46, n. 7, p.1681-1686, 2005. Japan Institute of Metals. <http://dx.doi.org/10.2320/matertrans.46.1681>.

MORITA, Tatsuro; TANAKA, Satoshi; NINOMIYA, Susumu. **Improvement in fatigue strength of notched Ti-6Al-4V alloy by short-time heat treatment**. Materials Science And Engineering: A, [s.l.], v. 669, p.127-133, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2016.05.071>.