

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E MICROESTRUTURAL DA LIGA Ti-6Al-4V TRATADA TERMICAMENTE

T. Sugahara^{1,2*}; C. Moura Neto²; D.A.P. Reis²; F. Piorino Neto³

¹ USP, Escola de Engenharia de Lorena, 12.602-810, Lorena, SP

² ITA, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50, 12.228-900, São José dos Campos, SP

³ IAE/CTA, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50, 12.228-900, São José dos Campos, SP

Palavras-chave: fluência, Ti-6Al-4V, caracterização microestrutural, tratamentos térmicos.

RESUMO

Titânio e suas ligas são excelentes para aplicações como componentes estruturais submetidos em altas temperaturas devido sua alta resistência, baixa massa específica, boa resistência à corrosão e estabilidade metalúrgica. Uma parte substancial da pesquisa em fluência tem sido dedicada à liga Ti-6Al-4V devido a sua importância industrial e tecnológica. Este trabalho tem como objetivo caracterizar microestruturalmente a liga Ti-6Al-4V após ensaio de fluência via microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura. Foi utilizada a liga Ti-6Al-4V na forma de barras cilíndricas, na condição forjada e recozida a 190 °C durante 6 horas e resfriada ao ar. A liga Ti-6Al-4V após tratamento térmico para avaliação do tipo de microestrutura no material foi submetida a ensaios de fluência ao ar na condição de 250 MPa para a temperatura de 600 °C. A preparação das amostras para análise via microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura seguiu os padrões usuais de metalografia. A liga com estrutura de Widmanstätten apresentou uma maior resistência à fluência e à oxidação, com um maior tempo de vida em fluência.

ABSTRACT

Titanium and its alloys are excellent for applications such as structural components subjected to high temperatures because of its high strength, low density, good corrosion resistance and metallurgical stability. A substantial part of the research on creep has been dedicated to the alloy Ti-6Al-4V due to its industrial and technological importance. This paper aims to characterize microstructural alloy Ti-6Al-4V after creep testing by optical microscopy and scanning electron microscopy. The alloy Ti-6Al-4V was used in the form of cylindrical bars, and provided forged annealed to 190 °C for 6 hours and cooled in air. The alloy Ti-6Al-4V after heat treatment to evaluate the type of microstructure in the material was tested in creep at 250 MPa and 600 °C. The preparation of samples for analysis by optical microscopy and scanning electron microscopy followed the usual methods of metallography. The alloy structured as Widmanstätten shows a great resistance to creep and oxidation, with a longer service life in creep.

1. INTRODUÇÃO

As ligas de titânio são utilizadas em vários setores industriais devido as suas excelentes propriedades como alta tensão específica, boa resistência à corrosão, baixa densidade e boa resistência à oxidação em temperaturas menores do que 600 °C. Essas propriedades são fatores decisivos para seu uso particularmente em indústrias aeroespaciais [1].

Dentre as ligas de titânio a Ti-6Al-4V é a mais importante, pois possui propriedades que se destacam como boa trabalhabilidade e usinabilidade [2]. Porém, a afinidade com o oxigênio é um dos fatores que limitam sua aplicação como componente de materiais estruturais em altas temperaturas. A alta solubilidade sólida do oxigênio no titânio resulta na perda de material e na formação de uma camada frágil e de alta dureza durante a exposição ao ar em temperaturas elevadas [3].

A indústria aeroespacial absorve cerca de 75% da produção mundial de titânio, sendo a liga Ti-6Al-4V uma das ligas mais versáteis. Uma das características que mais tem contribuído para o crescimento do seu uso para fins estruturais refere-se ao seu alto ponto de fusão. Sua utilização concentra-se em componentes aeroespaciais, onde a resistência à fluência, fadiga e degradação são consideradas essenciais [4].

Denomina-se tratamento térmico a operação de se aquecer um material a uma dada temperatura e resfriá-lo após certo tempo, em condições determinadas com a finalidade de conferir-lhe propriedades especiais [5].

As ligas de titânio são tratadas termicamente para diminuir a tensão residual gerada no processo de fabricação (alívio de tensões); para produzir uma combinação ótima de ductilidade e estabilidade estrutural (recozimento); aumento de resistência (envelhecimento) e para otimizar propriedades especiais como tenacidade à fratura, resistência à fadiga e resistência à fluência. A resposta das ligas de titânio ao tratamento térmico depende da composição da liga e dos efeitos dos elementos de liga na transformação α - β do titânio [6].

As propriedades em fluência são importantes no projeto de componentes que estão sujeitos a elevadas tensões e temperaturas por períodos prolongados. Afim de usar materiais para componentes em alta temperatura é essencial avaliar o comportamento em fluência do material como função do tempo. Isto inclui ensaios de fluência e/ou ensaios de ruptura por fluência. Ensaios de fluência medem a quantidade de deformação como função do tempo, enquanto o ensaio de

* tarcela.s@bol.com.br

ruptura por fluência mede o tempo de fratura em uma dada temperatura e nível de tensão. Ambos os ensaios tem aplicação em engenharia dependendo do critério do projeto [7]. O objetivo deste trabalho é a caracterização microestrutural da liga Ti-6Al-4V após ensaio de fluência. A liga selecionada após tratamento térmico para avaliação do tipo de microestrutura no material foi submetida a ensaios de fluência ao ar em temperatura de 600 °C, na modalidade de carga constante, na condição de 250 MPa. Estudos completos de ensaio na fluência da liga refratária Ti-6Al-4V tratada termicamente são escassos na literatura. A caracterização microestrutural teve o objetivo de determinar as fases existentes, incluindo a caracterização e quantificação das inclusões presentes, além de permitir um conhecimento mais detalhado da influência da microestrutura na resistência à fluência ao ar da liga Ti-6Al-4V.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, foi utilizada a liga Ti-6Al-4V na forma de barras cilíndricas, adquiridas junto à Empresa Multialloy Eng. Mat. Ltda, na condição forjada e recozida a 190 °C durante 6 horas e resfriada ao ar. A configuração microestrutural resultante dos tratamentos térmicos e mecânicos corresponde à condição de maior aplicação na indústria aeronáutica. A caracterização quanto à composição química dos principais elementos (percentual em peso), atende aos requisitos da norma ASTM B265-89 [8].

2.1 Tratamento Térmico

Foram utilizados corpos-de-prova feitos da liga Ti-6Al-4V (Figura 1). Utilizou-se o forno refratário da marca Lindberg/Blue para o tratamento térmico das amostras, como mostrado na Figura 2. Foram necessários tubos de quartzo, uma trompa de vácuo para a retirada do ar dos tubos de quartzo no momento do encapsulamento. O gás argônio foi injetado nos tubos de quartzo para evitar a oxidação das amostras. Uma solução de decapagem de HF- 0,2 mL/HNO₃- 2 ml/H₂O – 30 mL foi utilizada para lavar os corpos-de-prova após sua retirada do forno. Foi utilizada água para o resfriamento brusco das amostras no tratamento. Foram realizados dois tratamentos térmicos diferentes variando-se as condições de temperatura, tempo de aquecimento e velocidade de resfriamento para obtenção de microestruturas diferentes.

2.1.1 Tratamento Térmico 1

O forno para o tratamento térmico não possuía sistema de vácuo; então, para garantir a não oxidação da liga foi necessário que ela estivesse encapsulada em atmosfera inerte em um tubo de quartzo resistente em altas temperaturas. Os corpos-de-prova foram envoltos no tubo de quartzo com o auxílio de um maçarico. O ar de dentro do tubo foi retirado com uma trompa de vácuo; após a retirada do ar foi injetado gás argônio dentro do tubo para proteção contra oxidação.

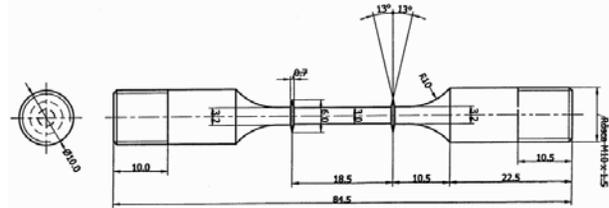


Figura 1 - Corpos-de-prova.



Figura 2 - Forno refratário Lindberg/Blue.

O forno Lindberg/Blue foi aquecido a 1050 °C e os corpos-de-prova foram colocados em seu interior e aquecidos por 30 minutos a fim de que se realizar as transformações necessárias na liga. Após o tempo estipulado os corpos-de-prova foram resfriados dentro do forno numa taxa de 6 °C/min até a temperatura ambiente. Os corpos-de-prova, já à temperatura ambiente, foram retirados do forno e quebrou-se o tubo de quartzo que os envolvia; então foi realizada a lavagem dos corpos-de-prova na solução de decapagem.

2.1.2 Tratamento Térmico 2

De maneira similar ao primeiro tratamento térmico, os corpos-de-prova foram encapsulados em tubo de quartzo e colocados em atmosfera inerte de argônio.

O forno Lindberg/Blue foi aquecido a 1050 °C e os corpos-de-prova foram colocados no forno e deixados por uma hora. Após o tempo determinado, os tubos de quartzo foram quebrados e os corpos-de-prova foram imediatamente jogados em água à temperatura ambiente. Esse processo de resfriamento brusco é denominado têmpera. Após essa etapa os corpos-de-prova foram lavados em solução de decapagem.

2.2 Ensaio de Fluência

Os corpos-de-prova foram confeccionados pela Fautec Fermentaria Automação e Usinagem Ltda., de acordo com as especificações, sistemas de garras e extensômetros disponíveis. Para realização dos ensaios de fluência foram utilizados os fornos pertencentes ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA/CTA, da marca MAYES. Nos fornos foram adaptados sistemas elétricos e controladores, desenvolvidos

pela BSW Tecnologia, Indústria e Comércio Ltda, segundo as exigências da norma ASTM E139/83, Figura 3 [8].



Figura 3 - Forno de fluência marca Mayes.

Foi utilizado o Software Antares desenvolvido em conjunto com a BSW Tecnologia, Indústria e Comércio Ltda., visando a coleta de dados relativos ao alongamento dos corpos-de-prova e as medidas de temperatura em períodos de tempo pré-determinados.

Para a obtenção das medidas de alongamento, foi utilizado um transdutor do tipo LVDT Schlumberger D 6,50. Para o controle de temperatura foi utilizado um termopar tipo Cromel-Alumel AWG24.

A realização dos ensaios de fluência se procedeu de acordo com a norma ASTM E139-06 [9]. No braço do forno foi colocada 10 % da carga total pretendida no ensaio, para ajuste do sistema, e após 1 hora foi colocada a carga total. Após o rompimento do corpo-de-prova, o programa foi finalizado e o forno desligado.

2.3 Preparação Metalográfica

A preparação das amostras para análise via microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura seguiu os padrões usuais de metalografia, ou seja, embutimento a quente (150 °C) sob pressão de 21 MPa, seguido do lixamento manual com lixas à base de SiC, na seqüência de 120, 240, 320 400, 600 e 1200. O polimento foi feito com uma solução de sílica coloidal (OP-S). As imagens no MEV foram obtidas no modo elétrons retro-espalhados, cujo principal mecanismo de contraste está relacionado às diferenças de número atômico médio entre as fases presentes. Através da análise via MEV foram estudadas as principais características das superfícies de fratura. Foi utilizado microscópio óptico Leica modelo DMRXP e microscópio eletrônico de varredura da marca LEO modelo 435 VPI.

3. RESULTADOS

3.1 Tratamento Térmico

Nos tratamentos térmicos realizados foram obtidas estruturas diferentes, devido às condições empregadas em cada um deles. A liga selecionada (Ti-6Al-4V recozida – Figura 4) foi submetida a duas diferentes condições de tratamentos térmicos para avaliação de diferentes tipos de microestrutura no material, visando a obtenção das estruturas de Widmanstätten, e Martensita.

A Tabela 1 mostra as condições de tratamento térmico e as respectivas microestruturas obtidas.

Tabela 1 - Relação entre condições de tratamento térmico e estrutura obtida.

Condições de tratamento térmico	Estrutura obtida
Aquecimento a 1050 °C por 30 min; Resfriamento 6 °C por minuto ao forno.	Widmanstätten
Aquecimento a 1050 °C por 1h; Resfriamento em água.	Martensita

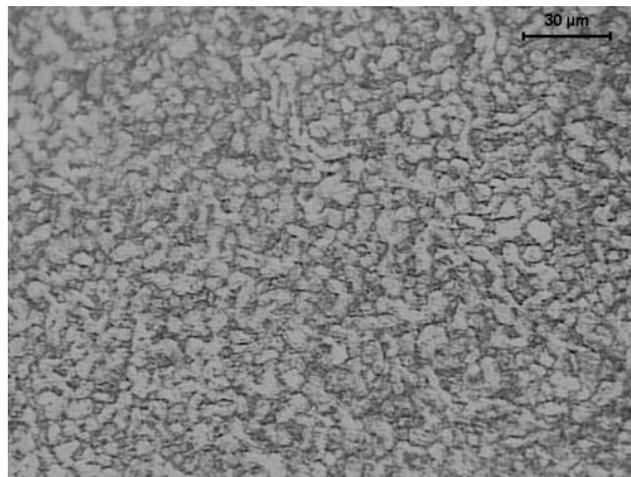


Figura 4 - Micrografia da liga Ti-6Al-4V como recebida.

Observam-se grãos α (HC) e regiões escuras que definem a presença da fase β (CCC) ao longo dos contornos de grão da liga Ti-6Al-4V como recebida por microscopia óptica. As Figuras 5 e 6 apresentam as estruturas obtidas nos tratamentos térmicos observadas via microscópio óptico.

Pode-se observar que a estrutura de Widmanstätten apresenta maior tamanho médio de grão, em torno de 395 μm , podendo ocasionar uma maior resistência à oxidação da liga, pois quanto maior o tamanho de grão menor será a energia de ativação presente no contorno de grão e com isso o material reagirá menos com o meio. A Tabela 2 apresenta os valores de microdureza obtidos para as estruturas obtidas nos tratamentos térmicos.

É possível que os menores valores de dureza, em valores absolutos, sejam resultado de camadas mais finas de oxidação em função de maior resistência ao processo e do tipo de óxido formado. O metal combina-se com oxigênio para formar uma longa série de óxidos, de TiO até Ti_7O_{12} [10]. Pela observação dos valores de microdureza

pode-se considerar a estrutura de Widmanstätten como a mais resistente à oxidação.



Figura 5 - Micrografia da liga Ti-6Al-4V com estrutura de Widmanstätten.



Figura 6 - Micrografia da liga Ti-6Al-4V com estrutura Martensita.

Tabela 2 – Medidas de microdureza para as estruturas obtidas por tratamento térmico.

Estrutura	Microdureza (HV)
Como recebida	362,2 ± 5,4
Widmanstätten	325,4 ± 6,4
Martensita	426,0 ± 4,9

3.2 Ensaio de Fluência

A Figura 7 apresenta as curvas de fluência da liga Ti-6Al-4V a 600 °C e 250 MPa, sem tratamento, com estrutura Martensita e com estrutura de Widmanstätten.

Pela observação das curvas de fluência apresentadas na Figura 7 nota-se que a liga com estrutura de Widmanstätten apresenta uma maior resistência à fluência e à oxidação, com um maior tempo de vida em fluência.

As Figuras 8 e 9 apresentam imagens da análise fractográfica da liga Ti-6Al-4V após ensaio de fluência a 600 °C e 250 MPa obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura.

Pelas imagens obtidas na análise fractográfica observa-se a presença de fenômenos de estrição e o desenvolvimento de microcavidades. Observa-se uma estrutura uniforme com *dimples* de formato equiaxial e pouca profundidade. Prevaecem nas duas estruturas os mecanismos de fratura dúctil.

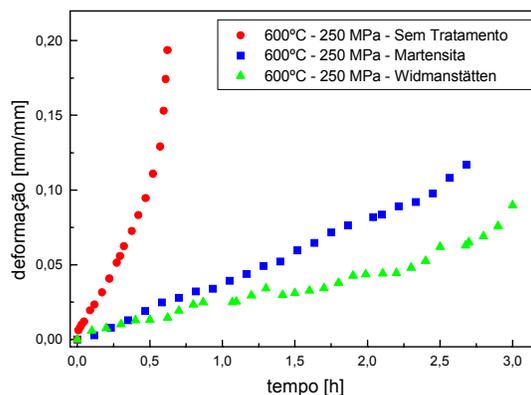


Figura 7 - Curvas de fluência da liga Ti-6Al-4V a 600°C e 250 MPa, sem tratamento, com estrutura Martensita e com estrutura de Widmanstätten.

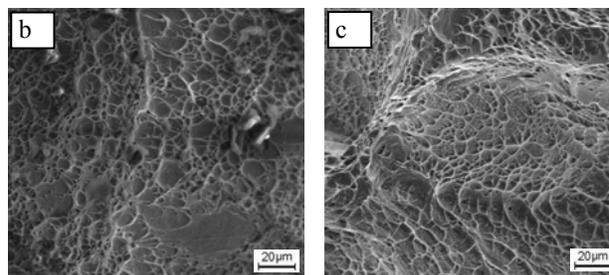
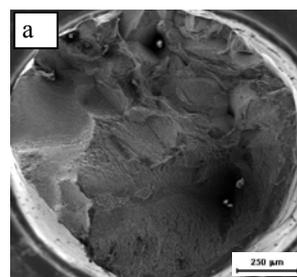


Figura 8 – Liga Ti-6Al-4V com estrutura Martensita após ensaio de fluência a 600 °C e 250 MPa: a) Aspecto geral da superfície de fratura; b) Micrografia da região lateral e c) Micrografia da região central.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho caracterizou-se microestruturalmente a liga Ti-6Al-4V após ensaio de fluência via microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura. A estrutura de Widmanstätten apresenta maior tamanho médio de grão, em torno de 395 µm, ocasionando uma maior resistência à oxidação da liga. Pela observação dos valores de microdureza pôde-se considerar a estrutura de Widmanstätten como a mais resistente à oxidação. Pelas imagens obtidas pela análise fractográfica evidenciou-se a presença de fenômenos de estrição e o desenvolvimento de microcavidades. Observa-se uma estrutura uniforme com *dimples* de formato equiaxial e pouca profundidade. Prevaecem nas duas estruturas os mecanismos de fratura dúctil. As curvas de fluência apre-

sentam a liga com estrutura de Widmanstätten com uma maior resistência à fluência e à oxidação, com um maior tempo de vida em fluência.

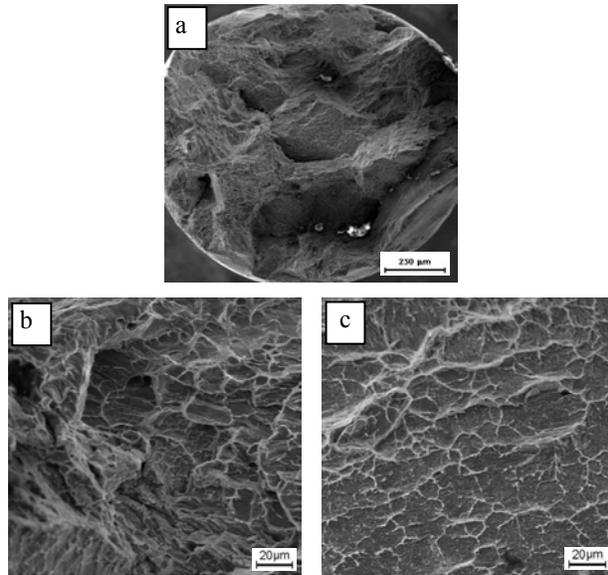


Figura 9 – Liga Ti-6Al-4V com estrutura Widmanstätten após ensaio de fluência a 600 °C e 250 MPa. a) Aspecto geral da superfície de fratura; b) Micrografia da região lateral e c) Micrografia da região central.

AGRADECIMENTOS

A EEL-USP / DEMAR, por permitir o uso de suas instalações. Ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica/ Divisão de Engenharia Mecânica, pela contribuição no desenvolvimento deste trabalho. Ao CNPq pela concessão da bolsa e suporte financeiro para realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

1. LEYENS, C.; PETERS, M., Titanium and Titanium Alloys, Fundamentals and Applications, Wiley VCH, New York (USA), 2003.
2. SAKAI, T.; OHASHI, M.; CHIBA, K.. *Acta Metallurgica* 36 (1988) 1781-1790.
3. WELSCH, G.; KAHVECI, A.I., In: GROBSTEIN, T.; DOYCHAK, J. (Eds), *Oxidation of High - Temperature Inter-metallics*, TMS, Warrendale, 1988.
4. NORRIS, G., *Metal Bulletin Monthly* 386 (1994) 36-39.
5. PEREIRA, R.L.; *Tratamentos Térmicos dos Metais*, 4ª. Ed., USP, São Carlos (SP), 1981.
6. GILBERT, R.; SHANNON, C.R., *Heat Treating of Titanium*, In: *ASM Metals Handbook*, V. 4, ASM International, Ohio (USA), 1991.
7. KUHN, H.; MEDLIN, D., *Mechanical Testing and Evaluation, Creep and Creep Rupture Testing*. In: *ASM Handbook*, V. 8, ASM International, Ohio (USA), 2000.
8. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS *Surface Engineering*, V.5, Philadelphia (USA), 1990.
9. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS *Surface Engineering*, V.5, Philadelphia (USA), 1995.
10. ABKOWITZ, S.; BURKE, J.J.; HILTZ JR., R.H., *Technology of Structural Titanium*, D.Van Nostrand Company, Princeton (USA), 1995