

## EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO NA FLUÊNCIA DA LIGA Ti-6Al-4V

L.M. Yogi<sup>1,2\*</sup>; T. Sugahara<sup>2</sup>; C. Moura Neto<sup>2</sup>; D.A.P. Reis<sup>2</sup>; F. Piorino Neto<sup>3</sup>; M.J.R. Barboza<sup>1</sup>

<sup>1</sup> USP, Escola de Engenharia de Lorena, 12.602-810, Lorena, SP, Brasil

<sup>2</sup>ITA/DCTA, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50, 12.228-900, São José dos Campos, SP, Brasil

<sup>3</sup>IAE/DCTA, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50, 12.228-900, São José dos Campos, SP, Brasil

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

### RESUMO

*A importância técnica do fenômeno de fluência tornou-se evidente a partir da metade do século XX, sendo reconhecida como um dos maiores problemas da área industrial, devido ao crescente nível de exigência das condições de operação empregadas em usinas de geração de energia, instalações químicas e em componentes estruturais desenvolvidos junto às indústrias aeroespaciais. Estudos têm sido realizados, independentes de objetivos comerciais, para o aprimoramento na obtenção de novas ligas e, principalmente, para a reavaliação de ligas comerciais já existentes, por meio da aquisição de dados em condições de maior severidade. O objetivo deste trabalho é a caracterização microestrutural, empregando a técnica de microscopia óptica, da liga Ti-6Al-4V após ensaio de fluência. A liga selecionada (Ti-6Al-4V) 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, a 319 MPa. Os resultados de fluência apresentam uma microestrutura mais grosseira nas estruturas de Widmanstätten e Martensita com a presença de grãos maiores e mais alongados e uma microestrutura mais fina com grãos menores na estrutura Bimodal.*

### ABSTRACT

*The technical importance of the creep phenomenon became apparent from the middle of the twentieth century, being recognized as one of the major problems of industrial area, due to the increasing level of requirement of the conditions of operations used in power plants, chemical installations and structural components developed in aircraft industries. Researches have been accomplished, independently of commercial goals, for the improvement in the acquisition of new alloys and, mainly, for the re-evaluation of commercial alloys already known, by the data acquisition in severe conditions. This paper aims the microstructural characterization of the alloy Ti-6Al-4V by optical microscopy after creep testing. The alloy Ti-6Al-4V after heat treatment to evaluate the type of microstructure in the material was tested in creep at 600 °C and 319 MPa. The alloy structured as Widmanstätten and Martensite shows rough microstructure with bigger and more elongated grains. The alloy structured as Bimodal show fine microstructure with minor grains.*

### 1. INTRODUÇÃO

A liga Ti-6Al-4V é a mais importante das ligas de titânio usadas em engenharia, combinando propriedades atrativas como trabalhabilidade e usinabilidade. Tem sido muito utilizada nas indústrias aeronáutica e aeroespacial, particularmente para aplicações que requerem resistência em altas temperaturas [1]. O alto ponto de fusão do titânio (1678°C) foi utilizado como uma forte indicação de que a liga poderia ter uma boa resistência ao fenômeno de fluência sob uma determinada faixa de temperatura. Atualmente, a liga Ti-6Al-4V ocupa uma importante posição com relação aos materiais utilizados na indústria aeroespacial, com 80 – 90% do titânio sendo usado para esse fim [2,3].

Outra característica interessante que faz o titânio se distinguir de outros metais leves é, por exemplo, que a 882°C sofre uma transformação alotrópica de uma fase com estrutura hexagonal compacta ( $\alpha$ ) para uma fase cúbica de corpo centrado ( $\beta$ ). Esta transformação proporciona a possibilidade de se obter ligas com microestruturas  $\alpha$ ,  $\beta$  ou mista  $\alpha/\beta$  por meio de diferentes composições e tratamentos térmicos. A exemplo de ligas  $\alpha/\beta$ , destaca-se a liga Ti-6Al-4V com grande importância comercial. A resistência limitada da liga  $\alpha$ , associada a dificuldade de conformação levou a uma investigação das ligas que contêm as fases  $\alpha$  e  $\beta$ . As ligas que contêm um ou mais elementos estabilizadores da fase  $\alpha$  e alguns elementos estabilizadores de  $\beta$  podem ser reforçadas utilizando-se tratamentos térmicos ou termomecânicos [2].

O titânio e suas ligas em altas temperaturas oxidam-se muito facilmente, causando uma dissolução intergranular de oxigênio acarretando em aumento da dureza e queda na resistência à fluência. Isto se torna um problema de grandes proporções, visto sua grande utilização na indústria aeroespacial [1]. A afinidade do titânio por oxigênio é um dos principais fatores que limitam a aplicação de suas ligas como materiais estruturais em altas temperaturas. A oxidação resulta na perda de material pelo crescimento na camada de óxido e endurecimento da liga pela dissolução de oxigênio [4]. A natureza da oxidação pode ter uma influência importante sobre as propriedades nas temperaturas de operação. Uma camada fina de óxido normalmente conduz a um aumento na resistência mecânica, mas a penetração intergranular do óxido geralmente implica em um decréscimo no tempo de ruptura por fluência e fratura intergranular. A vida em serviço de um material é bastante reduzida quando operar em atmosfera de combustão de gases quentes ou em meios corrosivos [5, 6]. Revestimentos de proteção que servem como

\* lucila\_yogi@yahoo.com.br

barreiras à ação de oxigênio seriam, em princípio, passíveis de serem usados em ligas de titânio por longo tempo em altas temperaturas. Todavia, problemas de aderência durante o ciclo térmico e a difusão dos elementos do recobrimento no substrato são as atuais dificuldades encontradas na pesquisa destes materiais [7].

Os tratamentos térmicos dos metais são possíveis e podem ser executados devido, principalmente, a dois fenômenos: recristalização do material e modificação das fases. Essa recristalização do material ocorre para os metais e ligas a diferentes temperaturas de acordo com certas regras. O material para recristalizar deve apresentar um mínimo de encruamento e ser aquecido a uma temperatura adequada. Alguns metais recristalizam à temperatura ambiente e outros, que apresentam mudança de fases, não necessitam encruamento para recristalizar [8]. Titânio e suas ligas são tratadas termicamente a fim de otimizar propriedades especiais, como resistência à fratura, resistência à fadiga, resistência à fluência à alta temperatura, além de aliviar tensões residuais produzidas durante a fabricação, otimizar a combinação de ductilidade, usinabilidade, e estabilidade dimensional e estrutural. A resposta do titânio e ligas de titânio ao tratamento térmico depende da composição do metal e os efeitos dos elementos de liga sobre a transformação  $\alpha$ - $\beta$  do titânio. Além disso, nem todos os ciclos de tratamento térmico são aplicáveis a todas as ligas de titânio, porque as várias ligas são projetadas para diferentes fins. A liga Ti-6Al-4V é projetada para alta resistência a baixas a moderadas temperaturas [9].

Recursos e esforços consideráveis foram gastos ao longo das últimas décadas no desenvolvimento de novos métodos de síntese de materiais, a fim de satisfazer a demanda por materiais resistentes a temperaturas mais elevadas. Experimentos de deformação por fluência e ruptura por fluência são usados para determinar a resistência e tempo de vida dos materiais sob condições quase-estático em temperaturas elevadas. Este teste envolve tipicamente impor tensão constante ou condições de deslocamento, assim como uma temperatura elevada. Além de simular serviços em condições ambientes, essas condições quase-estáticas normalmente induzem um comportamento físico que é bastante tratável de uma perspectiva teórica. Assim, tem havido um número considerável de avanços na teoria da fluência e ruptura por fluência que pode fornecer uma compreensão de base física dos mecanismos microestruturais que regem o comportamento observado. Na prática, uma compreensão da física do comportamento em fluência pode ser bastante útil para determinar como um material pode ser alterado microestruturalmente para obter melhor desempenho a temperaturas elevadas. Esse conhecimento também pode ser usado para melhorar os métodos de previsão do comportamento a alta temperatura a partir de extrapolações dos dados laboratoriais disponíveis [10 - 14].

Portanto, o estudo de fluência de ligas de titânio tratadas termicamente e com diferentes microestruturas obtidas após os tratamentos térmicos é um projeto inovador e representa um avanço tecnológico de grande magnitude, visto a necessidade de estudo de oxidação e resistência em materiais estruturais em temperaturas elevadas e condições de maior severidade. As informações geradas neste trabalho constituem

ferramentas valiosas para a compreensão dos mecanismos de fluência 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 correspondem à condição de maior aplicação na indústria aeronáutica. A caracterização quanto à composição química dos principais elementos (%) atende aos requisitos da norma ASTM B265-89 [14].

### 2.1 Tratamentos Térmicos

Foram utilizados corpos-de-prova feitos da liga Ti-6Al-4V como mostrados na Figura 1. Utilizou-se o forno refratário da marca Lindberg/Blue para o tratamento térmico das amostras (Figura 2).

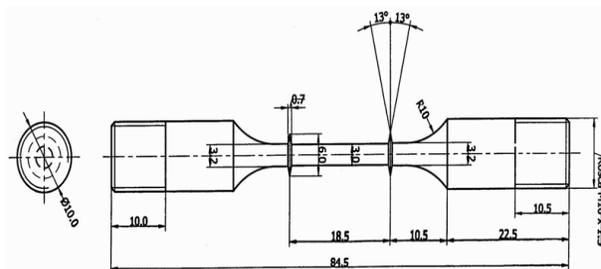


Figura 1 – Esquema dos corpos-de-prova (dimensões em milímetros).

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. Uma solução de decapagem de HF - 0,2 mL / HNO<sub>3</sub> - 2 mL / H<sub>2</sub>O - 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 três tratamentos térmicos diferentes, variando-se as condições de temperatura, tempo de aquecimento, condição e velocidade de resfriamento para obtenção de microestruturas diferentes.

#### 2.1.1 Tratamento Térmico 1

O forno 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 realizassem as transformações necessárias na liga. Após esse tempo, os corpos-de-prova foram resfriados den-

tro do forno numa taxa de  $6^{\circ}\text{C} / \text{min}$  até a temperatura ambiente. Foram, então, retirados do forno e o tubo de quartzo foi quebrado; então foi realizada a lavagem dos corpos-de-prova na solução de decapagem.



Figura 2 - Forno refratário Lindberg/Blue.

### 2.1.2 Tratamento Térmico 2

O forno foi aquecido a  $1050^{\circ}\text{C}$  e os corpos-de-prova foram colocados no forno e deixados por 1 hora. Após esse tempo, os tubos de quartzo foram quebrados e os corpos-de-prova foram imediatamente jogados em água à temperatura ambiente (processo de têmpera). Após essa etapa os corpos-de-prova foram lavados em solução de decapagem.

### 2.1.3 Tratamento Térmico 3

O tratamento térmico 3 foi realizado em duas etapas:

- A) 1ª etapa: O forno refratário foi aquecido a  $950^{\circ}\text{C}$ , os corpos-de-prova foram colocados no seu interior e deixados por 1 hora. Após esse tempo foram temperados em água à temperatura ambiente. Após o resfriamento o corpo-de-prova passou por um processo de decapagem.
- B) 2ª etapa: Após o processo de decapagem os corpos-de-prova foram novamente encapsulados em atmosfera inerte. O forno foi ajustado para  $600^{\circ}\text{C}$  e os corpos-de-prova foram novamente colocados dentro do forno e deixados por 24 horas. Após esse tempo foram retirados e resfriados ao ar até atingirem a temperatura ambiente.

## 2.2 Ensaios de Fluência

Os corpos-de-prova foram confeccionados pela Fautec Ferramentaria 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) [16].



Figura 3 - Forno de fluência marca Mayes.

Utiliza-se 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, é utilizado um transdutor do tipo LVDT Schlumberger D 6,50. Para o controle de temperatura é utilizado um termopar tipo Cromel-Alumel AWG24.

O forno foi instalado em uma posição adequada, de forma que o corpo-de-prova se mantivesse localizado na parte central de aquecimento. Acoplado ao controlador e a um indicador digital de temperatura instalado próximo à máquina de ensaio, foi utilizado um termopar numa posição próxima ao corpo-de-prova. O sinal do termopar é coletado por uma unidade de processamento pelo Software Antares, com os dados de temperatura e alongamento armazenados simultaneamente durante o ensaio de fluência.

O sinal de saída do LVDT é enviado a uma unidade de processamento, desenvolvida pela BSW Tecnologia, Indústria e Comércio Ltda., que converte os sinais em medidas de alongamento por períodos de tempo pré-definidos pelo operador e alimenta o Software Antares. Para a alimentação do software, é utilizada a curva de calibração obtida por um calibrador de extensômetros de alta resolução, para um transdutor do tipo LVDT Schlumberger D 6,50, à temperatura de aproximadamente  $35^{\circ}\text{C}$ .

A realização dos ensaios de fluência procede-se de acordo com a norma ASTM E139-06 [17]. O forno de fluência foi desmontado peça por peça, as rosças principalmente as mais oxidadas foram lixadas e engraxadas, a estrutura foi remontada com o corpo-de-prova, encaixado na estrutura conectado ao extensômetro e com os termopares fixados próximos ao corpo-de-prova. O LVDT foi conectado ao extensômetro, justou-se o centro do corpo-de-prova com o centro do forno, quando necessário o nível do forno foi ajustado, os tijolos refratários e manta de fibra de vidro foram colocados nas

extremidades superior e inferior do forno para impedir perda de calor.

Com o software inicializado o LVDT foi ajustado de maneira a registrar no software a deformação inicial desejada o início da faixa linear do LVDT. No braço do forno foram colocadas 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 a análise via microscopia óptica 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 sequência de 100, 400 e 600 mesh. O polimento foi feito com uma solução de sílica coloidal e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. (OP-S). O ataque químico foi feito em reagente Kroll- 5 mL de HNO<sub>3</sub>, 3 mL de HF e 100 mL de água destilada. Foi utilizado microscópio óptico Leica modelo DMRXP.

## 3. RESULTADOS

### 3.1 Tratamento Térmico

Nos tratamentos térmicos realizados foram obtidas estruturas diferentes, devido às condições empregadas em cada um deles.

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

As Figuras 4 a 6 apresentam as estruturas obtidas nos tratamentos térmicos observadas via microscopia óptica

### 3.2 Ensaio de Fluência

Foram realizados ensaios de fluência em amostras de estruturas de Widmanstätten, Martensita e Bimodal. As condições de ensaio foram de 600°C e 319 MPa.

A Figura 7 apresenta as respectivas curvas de fluência. Pode-se observar, por meio do comportamento das curvas (relação deformação/tempo), que as estruturas que mais resistiram ao fenômeno da fluência são as de Widmanstätten e Martensita; sendo a Bimodal a que apresenta menor resistência à fluência

**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
Etapa 1: Aquecimento a 950 °C por 1h; Resfriamento em água. Etapa 2: Aquecimento a 600°C por 24h; Resfriamento ao ar.	Bimodal



**Figura 4 - Micrografia da liga Ti-6Al-4V com estrutura tipo Widmanstätten.**



**Figura 5 - Micrografia da liga Ti-6Al-4V com estrutura Martensita.**

As Figuras 8 a 10 apresentam as estruturas de Widmanstätten, Martensita e Bimodal, em corte longitudinal e obtidas via microscopia óptica, após ensaio de fluência a 600°C e 319 MPa.



**Figura 6 – Micrografia da Liga Ti-6Al-4V com estrutura Bimodal.**

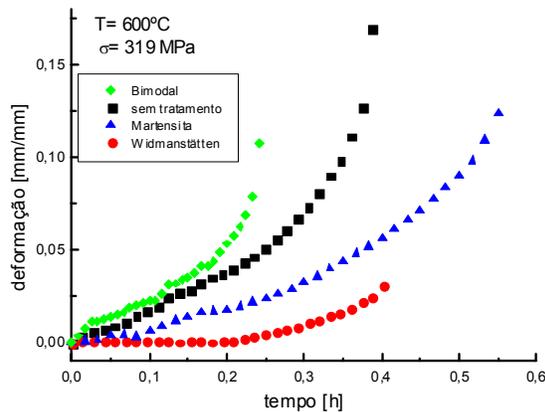


Figura 7 – Curvas de fluência em amostras sem tratamento, Widmanstätten, Martensita e Bimodal.

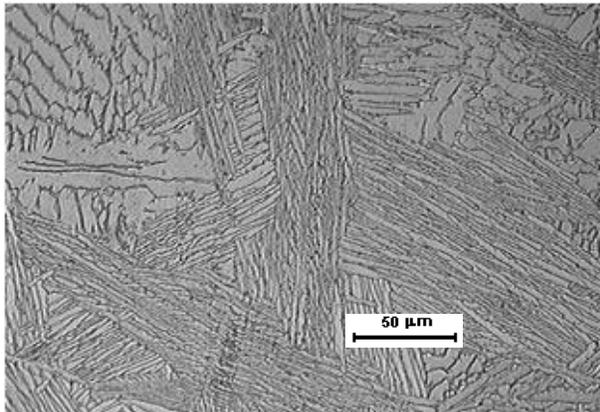


Figura 8 – Micrografia da liga Ti-6Al-4V com estrutura de Widmanstätten, após ensaio de fluência a 600°C e 319 MPa.

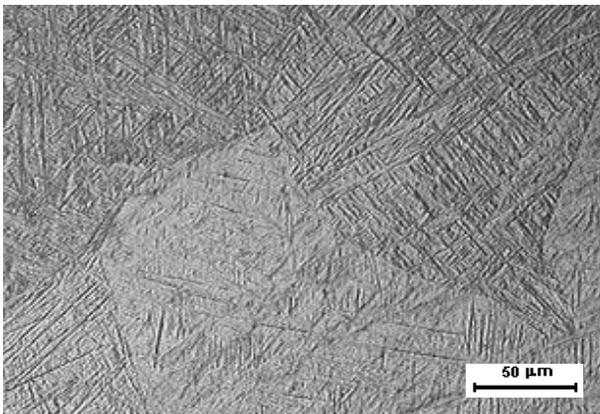


Figura 9 – Micrografia da liga Ti-6Al-4V com estrutura Martensita, após ensaio de fluência a 600°C e 319 MPa.

Observa-se uma microestrutura mais grosseira nas estruturas de Widmanstätten e Martensita, com a presença de grãos maiores e mais alongados. A estrutura Bimodal apresenta uma microestrutura mais fina com grãos menores. A estrutura de Widmanstätten apresenta maior tamanho médio de grão em torno de 395  $\mu\text{m}$ . A liga Ti-6Al-4V é formada

pela fase  $\alpha$  e  $\beta$ . Observam-se grãos  $\alpha$  (HC) e regiões escuras que definem a presença da fase  $\beta$  (CCC) ao longo dos contornos de grão.

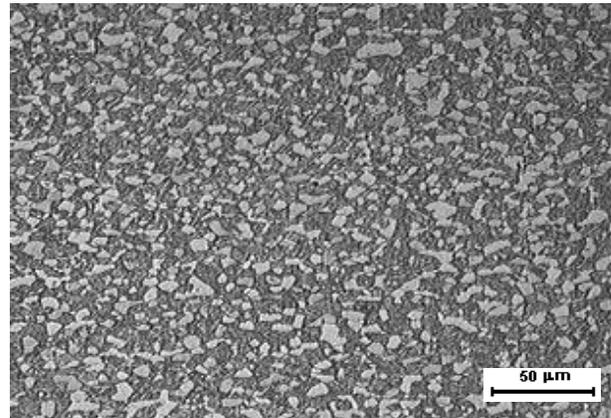


Figura 10 - Micrografia da liga Ti-6Al-4V com estrutura Bimodal, após ensaio de fluência a 600°C e 319 MPa.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho estuda-se a caracterização microestrutural da liga Ti-6Al-4V após ensaio de fluência via microscopia óptica. Constata-se que, conforme diferentes condições de tratamento, há variação das estruturas. São obtidas as estruturas desejadas (Widmanstätten, Martensita e Bimodal) por tratamento térmico.

Após o ensaio de fluência, observa-se uma microestrutura mais grosseira nas estruturas de Widmanstätten e Martensita, com a presença de grãos maiores e mais alongados. A estrutura Bimodal apresenta uma microestrutura mais fina com grãos menores. Com base nas curvas de fluência das diferentes estruturas ensaiadas verifica-se a tendência de uma maior resistência ao fenômeno da fluência para as estruturas de Widmanstätten e Martensita. Essa resistência pode estar associada, conforme comprovado pelas imagens de microscopia óptica, ao maior tamanho de grãos presentes nessas estruturas. Já a menor resistência à fluência verificada na estrutura Bimodal pode estar associada aos grãos menores.

#### AGRADECIMENTOS

À 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. SAKAI, T.; OHASHI, M.; CHIBA, K., *Acta Metallurgica* 36 (1988) 1781-1790.
2. PEREZ, E.A.C. *Influência da Microestrutura no Comportamento em Fluência da Liga Ti-6Al-4V*, Dissertação (Mestrado

- em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia Química de Lorena, Lorena (SP), 2004.
3. DESTEFANI, J.D. *Introduction to Titanium and Titanium Alloys*. In: *ASM Handbook - V. 2*, ASM International, Ohio (USA), 1990.
  4. WELSCH, G.; KAHVECI, A.I., In: GROBSTEIN, T.; DOYCHAK, J. (Eds), *Oxidation of High - Temperature Intermetallics*, TMS, Warrendale, 1988.
  5. REIS, D.A.P.; SILVA, C.R.M.; NONO, M.C.A.; BARBOZA, M.J.R.; PIORINO, F.; PEREZ, E.A.C.; SANTOS, D.R. *The Influence of High Temperature Exposure in Creep of the Ti-6Al-4V Alloy*. In: Anais do III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Belém (PA), 2004.
  6. REIS, D.A.P.; SILVA, C.R.M.; NONO, M.C.A.; BARBOZA, M.J.R.; PIORINO, F.; PEREZ, E.A.C., *Materials Science and Engineering A* 399 (2005) 276-280.
  7. KEARNS, M.W.; RESTALL, J.E., M.W. In: *Proceedings of the 6th World Conference on Titanium*, Cannes (França). 1988.
  8. PEREIRA, R.L.; *Tratamentos Térmicos dos Metais*, 4ª. Ed., USP, São Carlos (SP), 1981.
  9. GILBERT, R.; SHANNON, C.R., *Heat Treating of Titanium*, In: *ASM Metals Handbook*, V. 4. ASM International, Ohio (USA), 1991.
  10. EARTHMAN, J.C., *Creep and Stress-Relaxation Testing*. In: *ASM Metals Handbook*, V. 8, ASM International, Ohio (USA), 2000.
  11. BARBOZA, M.J.R. *Estudo e Modelagem sob Condições de Fluência da Liga Ti-6Al-4V*, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica e Aeronáutica), ITA, São José dos Campos (SP), 2001.
  12. SUGAHARA, T.; YOGI, L.M.; OLIVEIRA, G.L.F.; REIS, D.A.P.; SILVA, M.M.; MOURA NETO, C.; BARBOZA, M.J.R., *Avaliação do Tratamento Térmico na Fluência da Liga Ti-6Al-4V*. In: Anais do 64º Congresso da ABM, Belo Horizonte (MG), 2009.
  13. YOGI, L.M.; SUGAHARA, T.; REIS, D.A.P.; MOURA NETO, C.; BARBOZA, M.J.R.; PIORINO NETO, F., *Determinação do Mecanismo Atuante de Fluência na Liga Ti-6Al-4V com Estrutura de Widmanstätten*. In: Anais do XI Congresso dos Estudantes de Ciência e Engenharia de Materiais do Mercosul, Guaratinguetá (SP), 2009.
  14. REIS, D.A.P.; MOURA NETO, C.; BARBOZA, M.J.R.; PEREZ, E.A.C.; PIORINO NETO, F. ; HIRSCHMANN, A.C.O.; SUGAHARA, T. *The Effect of Widmanstätten and Equiaxed Microstructures of Ti-6Al-4V on the Oxidation Rate and Creep Behavior*. In: Proceedings of V International Materials Symposium, Lisboa (Portugal), 2009.
  15. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS *Surface Engineering*, V.5, Philadelphia (USA), 1996.
  16. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS *Surface Engineering*, V.5, Philadelphia (USA), 1995.
  17. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS *Surface Engineering*, V.5, Philadelphia (USA), 1990.