



# ESTUDO DA VIDA EM FLUÊNCIA NA LIGA Ti-6Al-4V TRATADA TERMICAMENTE <sup>1</sup>

Lucila Mayumi Yogi <sup>2</sup>

Tarcila Sugahara <sup>2</sup>

Danieli Aparecida Pereira Reis <sup>3</sup>

Carlos de Moura Neto <sup>4</sup>

Francisco Piorino Neto <sup>5</sup>

Miguel Justino Ribeiro Barboza <sup>6</sup>

## Resumo

Atualmente, materiais com comportamento adequado em temperaturas elevadas e ambientes agressivos tornaram-se uma necessidade técnica, científica e econômica. Dentro desse contexto, as ligas à base de titânio possuem aplicações em condições de serviço que requerem resistência em temperaturas elevadas, a exemplo de componentes de turbinas a gás. É importante entender os mecanismos de deformação em alta temperatura e a relação entre as variáveis do processamento, microestrutura e propriedades. Este trabalho tem como objetivo avaliar a vida em fluência a 600°C da liga Ti-6Al-4V tratada termicamente. A liga foi recebida na condição forjada e recozida a 190°C durante 6 horas e resfriada ao ar. As análises envolvem quatro condições estruturais: equiaxial, bimodal, martensita e de Widmanstätten. A liga com estrutura de Widmanstätten é a condição que apresenta maior tempo de vida em fluência, com uma menor taxa de deformação.

**Palavras-chave:** Titânio; Fluência; Tratamento térmico.

## STUDY OF CREEP LIFE OF Ti-6Al-4V ALLOY HEAT TREATED

### Abstract

Currently, materials with proper behavior at high temperatures and aggressive environments have become a technical necessity, scientific and economic. In this context, titanium alloys have applications in service conditions that require resistance to high temperatures, such as components of gas turbines. It is important to understand the mechanisms of strain at high temperature and the relationship among the variables of processing, microstructure and properties. This study aims to evaluate the creep life of Ti-6Al-4V alloy heat treated at 600°C. The alloy was received in the condition forged and annealed at 190°C for 6 hours and cooled in air. The analysis involves four structural conditions: equiaxed, bimodal, martensite and Widmanstätten. The alloy with Widmanstätten structure shows the longest life time in creep with a lower rate of deformation.

**Key words:** Titanium; Creep; Heat treatment.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Mestranda; Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA.

<sup>3</sup> Pós doutoranda- Sócia Titular da ABM; Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA.

<sup>4</sup> Professor Associado – Sócio Titular da ABM; Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA.

<sup>5</sup> Pesquisador; Instituto de Aeronáutica e Espaço – IAE/DCTA.

<sup>6</sup> Professor; Escola de Engenharia de Lorena – EEL/USP.

## 1 INTRODUÇÃO

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. A sua alta resistência à fluência é de grande importância para uso em motores.<sup>(1-4)</sup> As ligas de titânio para aplicações aeroespaciais contêm ambos os elementos estabilizadores das fases alfa e beta em várias proporções dependendo das aplicações e das combinações de propriedades mecânicas requisitadas. Essas ligas podem ser trabalhadas a fim de se controlar a microestrutura através de processamento, bem como variações de tratamento térmico e a otimização do comportamento mecânico.<sup>(5-9)</sup> Devido ao excelente histórico de sucesso nas aplicações da indústria aeroespacial, Ti-6Al-4V ocupa um importante papel na manufatura de componentes como discos e lâminas para turbinas de aeronaves e estruturas forjadas.<sup>(10,11)</sup> Entretanto, a afinidade pelo oxigênio é um dos principais fatores que limitam sua aplicação como material estrutural a elevadas temperaturas. A alta solubilidade sólida do oxigênio no titânio resulta em perda de material e na formação uma camada dura e frágil durante exposição ao ar em temperatura elevada.<sup>(12)</sup>

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, 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.

### 2.1 Tratamentos Térmicos

As amostras foram primeiramente tratadas termicamente no forno refratário da marca Lindberg/Blue, onde foram encapsuladas em tubo de quartzo e utilizado o gás argônio para evitar a oxidação. Após tratadas, utilizou-se de uma solução de decapagem (HF - 0,2 mL / HNO<sub>3</sub> – 2 mL/ H<sub>2</sub>O – 30 mL) para a limpeza.

#### 2.1.1 Tratamento térmico 1

O forno foi aquecido a 1.050°C e os corpos-de-prova foram colocados em seu interior e mantidos por 30 minutos. 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 submetidos à solução de decapagem.

#### 2.1.2 Tratamento térmico 2

O forno foi aquecido a 1.050°C e os corpos-de-prova foram colocados no forno e deixados por 1 hora. Após o tempo determinado, os corpos-de-prova foram resfriados em água à temperatura ambiente.

#### 2.1.3. Tratamento térmico 3

O tratamento térmico 3 foi realizado em duas etapas:

- **1ª etapa:** O forno refratário foi aquecido a 950°C, os corpos-de-prova foram colocados no seu interior e deixados por uma hora. Após esse tempo foram resfriados abruptamente em água em temperatura ambiente. Em seguida, o resfriamento o corpo-de-prova passou por um processo de decapagem.
- **2ª etapa:** Após o processo de decapagem os corpos-de-prova foram novamente encapsulados em atmosfera inerte. O forno foi ajustado para 600°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 Ensaio de Fluência

Para realização dos ensaios de fluência foram utilizados os fornos da marca MAYES. Foi utilizado o Software Antares visando à 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 seguiu o especificado na norma ASTM E 139-06.<sup>(13)</sup>

O sinal do termopar era coletado por uma unidade de processamento pelo Software Antares, com os dados de temperatura e alongamento armazenados simultaneamente durante o ensaio de fluência.

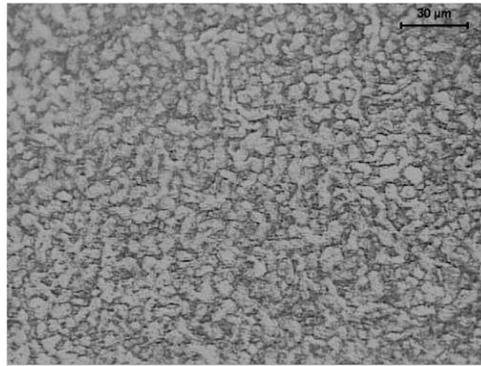
## 2.3 Preparação Metalográfica

A preparação das amostras para análise pelas técnicas de microscopia óptica e de microscopia eletrônica de varredura seguiu os padrões usuais. No embutimento quente (150°C) a pressão foi de 21 MPa, seguido do lixamento manual com lixas à base de SiC, na sequência de 320#, 400#, 600# e 1.200#. O polimento foi feito com uma solução de sílica coloidal (OP-S). Para o ataque químico utilizou-se o reagente Kroll. As imagens no MEV foram obtidas no modo elétrons retro-espalhados. Foram utilizados microscópio óptico Leica modelo DMRXP e microscópio eletrônico de varredura da marca LEO modelo 435 VPI.

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Tratamentos Térmicos

A Figura 1 apresenta uma micrografia da liga como recebida obtida por microscopia óptica.



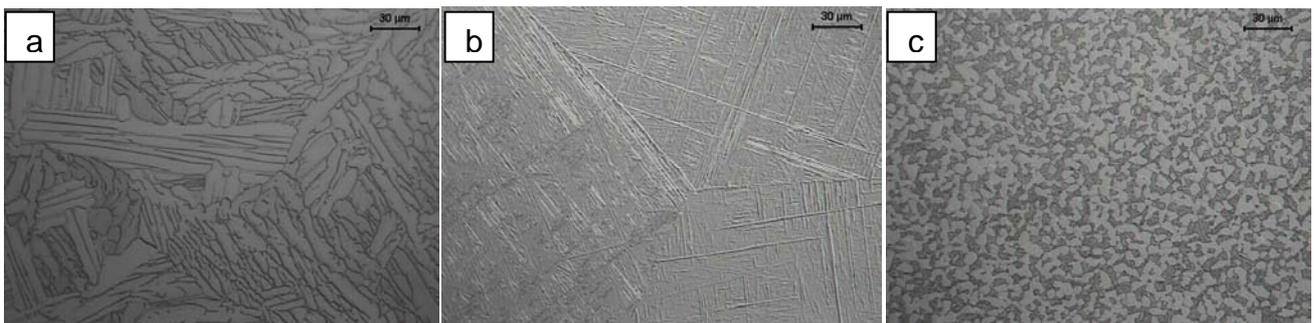
**Figura 1.** Micrografia da liga Ti-6Al-4V como recebida.

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.

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

Condições do tratamento térmico		Estrutura obtida
Tratamento 1	Aquecimento a 1050°C por 30 minutos; Resfriamento 6°C por minuto ao forno.	Widmanstätten
Tratamento 2	Aquecimento a 1050°C por 1 hora; Resfriamento em água.	Martensita
Tratamento 3	Etapa 1: Aquecimento a 950°C por 1 hora; Resfriamento em água. Etapa 2: Aquecimento a 600°C por 24 horas; Resfriamento ao ar.	Bimodal

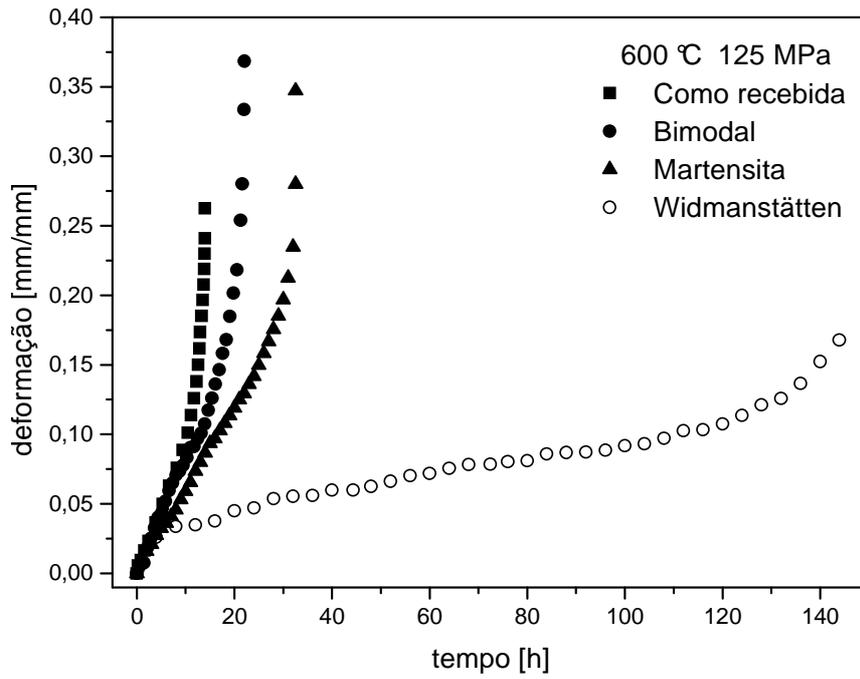
A Figura 2 apresenta as imagens obtidas via microscópio óptico das estruturas obtidas nos tratamentos térmicos.



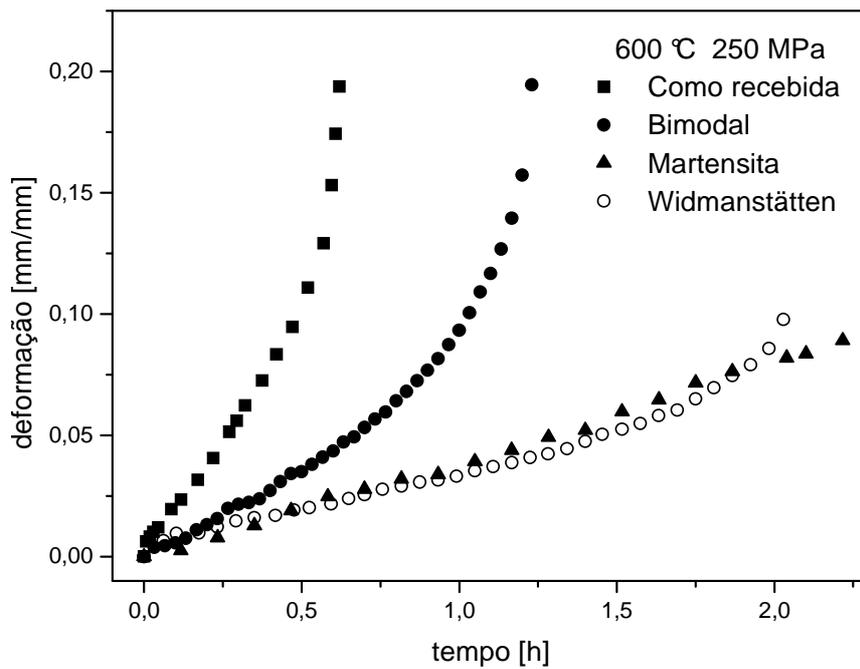
**Figura 2.** Estruturas obtidas pelos tratamentos térmicos: **a)** Widmanstätten; **b)** Martensita; e **c)** Bimodal.

### 3.2 Ensaio de Fluência

Foram realizados ensaios de fluência (ao ar) a 600°C nas tensões: 125 MPa, 250 MPa e 319 MPa. Com o intuito de facilitar o entendimento, as curvas apresentadas nas Figuras 3, 4 e 5, foram separadas por tensões.



**Figura 3.** Curvas de fluência da liga a 600°C e 125 MPa.



**Figura 4.** Curvas de fluência da liga a 600°C e 250 MPa.

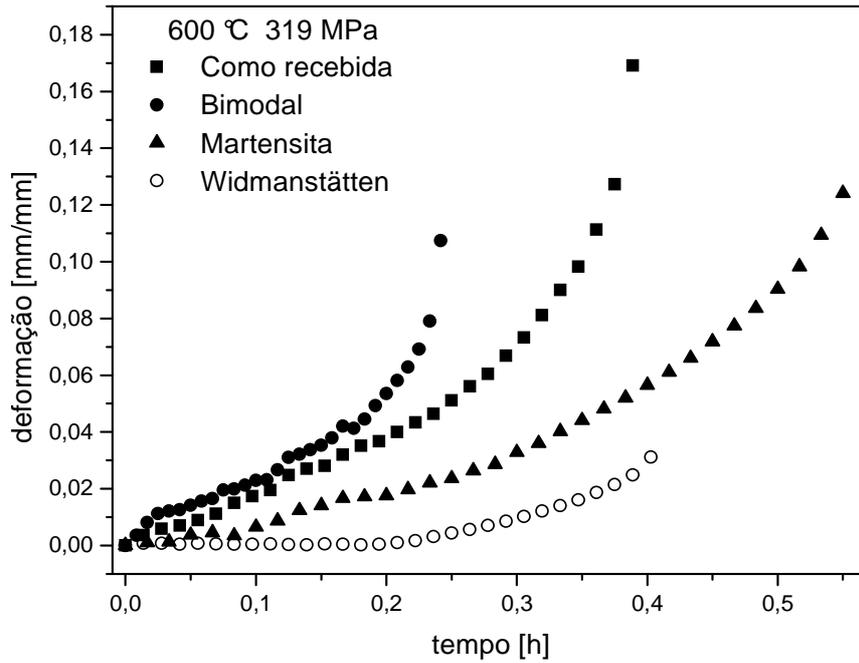


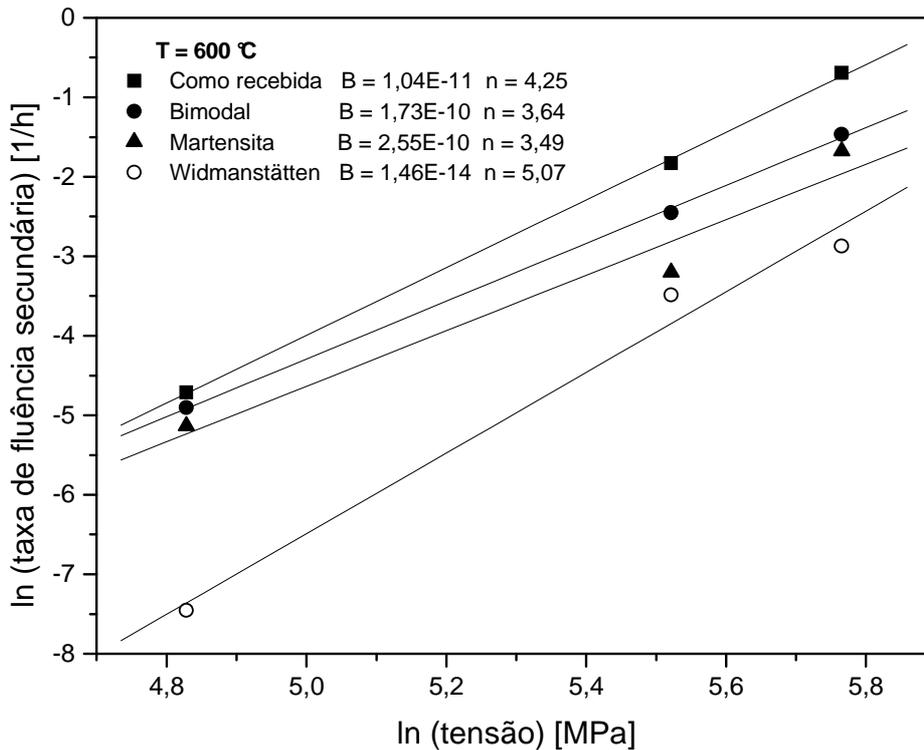
Figura 5. Curvas de fluência da liga a 600°C e 319 MPa.

A Tabela 2 apresenta os principais parâmetros experimentais obtidos por meio das curvas de fluência.

Tabela 2. Dados de fluência a 600°C

Tratamento	$\sigma$ (MPa)	$t_p$ (h)	$\dot{\epsilon}_s$ (1/h)	$t_f$ (h)	$\epsilon_f$ (mm/mm)
Como recebida	125	0,83	0,0090	14,00	0,2625
Bimodal		1,47	0,0074	22,07	0,3684
Martensita		2,00	0,0059	32,52	0,3471
Widmanstätten		32,00	0,0006	143,95	0,1679
Como recebida	250	0,03	0,1600	0,62	0,1938
Bimodal		0,10	0,0862	1,23	0,1945
Martensita		0,23	0,0406	2,68	0,1169
Widmanstätten		0,42	0,0303	2,03	0,0977
Como recebida	319	0,01	0,5000	0,17	0,1742
Bimodal		0,03	0,2306	0,19	0,0493
Martensita		0,07	0,1872	0,55	0,1241
Widmanstätten		0,03	0,0566	0,40	0,0311

A Figura 6 apresenta a dependência da tensão com a taxa de fluência secundária das quatro diferentes configurações de estrutura da liga.



**Figura 6.** Dependência da taxa de fluência secundária com a tensão aplicada ao ar e a 600°C.

#### 4 DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta uma micrografia da liga como recebida. Verifica-se uma microestrutura equiaxial, onde se podem observar grãos  $\alpha$  (HC) e regiões escuras que definem a presença da fase  $\beta$  (CCC) ao longo dos contornos de grão.

Na Figura 2 têm-se as estruturas obtidas nos tratamentos térmicos (Widmanstätten, Martensita e Bimodal). Pode-se observar que a estrutura de Widmanstätten apresenta grãos mais grosseiros se comparada com as demais estruturas. Quanto maior o tamanho do grão maior será resistência à fluência pois menor será a energia de ativação presente no contorno de grão e com isso o material reagirá menos com o meio.

As Figuras 3, 4 e 5 apresentam, respectivamente, as curvas de fluência dos ensaios realizados a 600°C e a 125 MPa, 250 MPa e 319 MPa. As curvas de fluência consistiram dos estágios primário, secundário e terciário bem definidos. A Tabela 2 apresenta a relação dos principais parâmetros experimentais obtidos a 600°C, a partir das curvas experimentais, em que  $\sigma$  e a tensão aplicada,  $\dot{\epsilon}_s$  corresponde à taxa de fluência estacionária, obtida a partir da inclinação da região linear na curva de fluência (estágio secundário). O valor de  $t_p$  corresponde ao tempo primário e é obtido no final do estágio primário e/ou início do estágio secundário. O valor  $t_f$  é o tempo final de fratura e  $\epsilon_f$  corresponde à deformação na fratura.

Pode-se observar que a liga com estrutura de Widmanstätten apresenta as menores taxas de fluência secundária, com duração de ensaios mais longos e menores deformações de fratura. As Figuras 3, 4 e 5 ilustram o comportamento de cada estrutura da liga e pode-se observar que a melhor resposta ao fenômeno da fluência é para a liga com estrutura de Widmanstätten.



Por meio de técnicas de regressão linear, os resultados podem ser descritos em termos da equação da lei de potencia em fluência, conhecido como lei de Norton:

$$\dot{\epsilon}_s = B\sigma^n$$

O coeficiente B e expoente de tensão n do material são normalmente determinados por meio de um número de ensaios de fluência com carga constante e temperaturas constantes, com o expoente de tensão representando o gradiente da relação  $\ln \dot{\epsilon}_s$  vs  $\ln \sigma$ . Os parâmetros dependem da temperatura, composição e microestrutura do material e também se estendem ao nível de tensão aplicada.<sup>(14-17)</sup>

Não há evidências experimentais de que a fluência em materiais metálicos seja controlada por um único processo em cada região. Ao contrário, todos os mecanismos previstos podem apresentar contribuições ao longo dos três estágios, mas não necessariamente na mesma proporção. Assim, o conceito de um mecanismo dominante pode ser caracterizado por diferentes valores de n ou  $Q_c$ . Com isso, a transição do expoente de tensão de  $n > 3$  para  $n \approx 1$  e geralmente considerada como um indicativo de mudança de um mecanismo de fluência por discordâncias para um processo difusional.<sup>(17,18)</sup>

Com isso, os valores para n apresentados na Figura 6 direcionam ao movimento de discordâncias como o mecanismo atuante de fluência. No entanto, não se pode afirmar isto sem um estudo prévio da energia de ativação  $Q_c$  da liga.

## 5 CONCLUSÃO

As propriedades de fluência da liga Ti-6Al-4V com estruturas equiaxial, Martensita, Bimodal e de Widmanstätten são investigadas a 600°C.

Os tratamentos térmicos realizados atingiram as estruturas pretendidas. Os ensaios de fluência foram realizados a 600°C a tensões de 125, 250 e 319 MPa. Nota-se uma maior resistência à fluência da liga com estrutura de Widmanstätten, apresentando as menores taxa de fluência secundária, maiores tempos de vida em fluência e menores deformações de fratura. Este resultado pode ser relacionado ao maior tamanho de grão apresentado da estrutura de Widmanstätten.

Os expoentes de tensão obtidos variam na faixa de 3,49 e 5,07. Esses resultados apresentam uma tendência de que o mecanismo atuante de fluência nas estruturas estudadas da liga Ti-6Al-4V seja por discordâncias.

## Agradecimentos

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de Lorena (DEMAR-EEL/USP) pelos tratamentos térmicos.

Ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica, pela cessão da infraestrutura técnica de laboratórios.

## REFERÊNCIAS

- 1 NORRIS, G. Feeling the heat. *Metal Bulletin Monthly*, v. 386, p.36-39, 1994.
- 2 EVANS, R. W.; Wilshire, B., *Introduction to Creep*. London: The Institute of Metals, pp. 115, 1993.
- 3 R.R. Boyer, *Mater. Sci. Eng. A* 213 (1996) 103.

- 4 D.A.P. Reis, C.R.M. Silva, M.C.A. Nono, M.J.R. Barboza, F. Piorino Neto, E.A.C. Perez, Mater. Sci. Eng. A 399 (2005) 276 – 280.
- 5 D. Eylon, S. Fujishiro, P.J. Postans, F.H. Froes, J. Met. 36 (1984) 55– 62.
- 6 M. Es-Souni, Mater. Charact. 46 (2001) 365–379.
- 7 R.I. Jaffee, G. Luetjering, T. Rust, in: H. Kimura, O. Izumi (Eds.), Titanium Science and Technology, vol. 1, Metall. Soc. AIME, Kyoto, 1980, pp. 477–488.
- 8 G. Lutjering, Mater. Sci. Eng. A 243 (1998) 32–45.
- 9 M.J.R. Barboza, E.A.C. Perez, M.M. Medeiros, D.A.P. Reis, M.C.A. Nono, F. Piorino Neto, C.R.M. Silva, Mater. Sci. Eng. A 428 (2006) 319 – 326.
- 10 R.C. Picu, A. Majorell, Mater. Sci. Eng. A 326 (2002) 306–316.
- 11 R.I. Jaffee, in: H. Kimura, O. Izumi (Eds.), Titanium Science and Technology, v. 1, Metall. Soc. AIME, Kyoto, 1980, pp. 53–74.
- 12 S. Abkowitz, J.J. Burke, R.H. Hiltz Jr., Technology of Structural Titanium, D. Van Nostrand Company, 1955, pp. 31– 32.
- 13 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, E 139-06, *Standard Test Methods for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture*, Philadelphia, 1990.
- 14 Brathe, L.; Josefson, L. Estimation of Norton Bailey Parameters from Creep Rupture Data. Metal & Science, v. 13, p. 660-664, 1979.
- 15 Frost, H.J.; Ashby, M.F. Deformation-mechanism maps. London: Pergamon Press, 1984. 141p.
- 16 Reis, D.A.P. Efeito do recobrimento cerâmico e da atmosfera de ensaio na fluência de liga metálica refratária de titânio. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.
- 17 Barboza M.J.R. Estudo e modelagem sob condições de fluência da liga Ti-6Al-4V. 2001. 196p. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) – Instituto Tecnológico da Aeronautica, Sao Jose dos Campos, 2001.
- 18 Callister, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução. Rio de Janeiro: LTC, 2002. cap.8, p. 157-161.