



AVALIAÇÃO DO RECOBRIMENTO CERÂMICO NA LIGA Ti-6Al-4V COM ESTRUTURA DE WIDMANSTÄTTEN¹

Luciana Aparecida Narciso da Silva Briguento²

Lucila Mayumi Yogi²

Tarcila Sugahara²

Danieli Aparecida Pereira Reis³

Carlos de Moura Neto⁴

Miguel Justino Ribeiro Barboza⁵

Resumo

Este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito do recobrimento cerâmico no comportamento em fluência na liga Ti-6Al-4V tratada termicamente com estrutura de Widmanstätten. Foi utilizada a liga Ti-6Al-4V na forma de barras cilíndricas, forjadas e recozidas a 190°C, durante 6 horas e resfriadas ao ar. A liga Ti-6Al-4V foi submetida a tratamento térmico na temperatura de 1.050°C por 30 minutos, com resfriamento ao forno até a temperatura de 700°C, mantendo-se nessa temperatura por 1 hora, seguido de resfriamento ao ar para obtenção da estrutura de Widmanstätten. Após tratamento térmico foi aplicado recobrimento cerâmico de CoNiCrAlY + ZrO₂ por aspersão térmica. A liga Ti-6Al-4V, após tratamento térmico e com recobrimento cerâmico, foi submetida a ensaios de fluência a 600°C nas condições de 250 MPa e 319 MPa, na modalidade de carga constante. A liga com estrutura de Widmanstätten com recobrimento cerâmico apresenta maior resistência à fluência.

Palavras-chave: Fluência; Ti-6Al-4V; Tratamento térmico; Recobrimento cerâmico.

EVALUATION OF CERAMIC COATING ON THE Ti-6Al-4V ALLOY WITH WIDMANSTÄTTEN STRUCTURE

Abstract

The aim of this paper is evaluate the effect of ceramic coating on creep behavior of Ti-6Al-4V alloy with Widmanstätten structure. It was used a Ti-6Al-4V alloy in cylindrical bars forms, forged and annealed at 190°C for 6 hours and cooled in air. The Ti-6Al-4V alloy was heat-treated at 1050°C for 30 minutes, cooled in furnace until 700°C and keeping in this temperature for 1 hour followed by air cooling in order to obtain Widmanstätten structure. After heat treatment it was applied ceramic coating of CoNiCrAlY + ZrO₂ by plasma spray. The Ti-6Al-4V alloy after heat treatment and with ceramic coating was submitted to creep tests at 600°C and stress conditions of 250 and 319 MPa at constant load. The alloy with Widmanstätten structure and ceramic coating shows higher creep resistance.

Key words: Creep; Ti-6Al-4V; Heat treatment; Ceramic coating.

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

² *Mestranda; Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA.*

³ *Pós doutoranda- Sócia Titular da ABM; Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA.*

⁴ *Professor Associado II – Sócio Titular da ABM; Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA.*

⁵ *Professor; Escola de Engenharia de Lorena – EEL/USP.*



1 INTRODUÇÃO

As ligas de titânio são utilizadas em vários setores industriais incluindo aeroespacial, automotivo, químico e biomédico devido à excelente combinação de suas propriedades mecânicas com sua baixa massa específica e boa resistência à oxidação em temperaturas menores que 600°C. Essas propriedades são importantes para seu uso, particularmente em indústrias aeroespaciais.^(1,2)

Dentre as ligas de titânio, a liga Ti-6Al-4V é a mais importante sendo amplamente utilizada em motores e estruturas aeronáuticas, pois possui propriedades que se destacam como boa trabalhabilidade e usinabilidade, além de apresentar alta resistência à fluência, que é de grande importância para acentuar a atuação em motores.^(3,4)

Com o propósito de se projetar novas ligas de titânio com melhores propriedades, é necessário o entendimento dos mecanismos associados à deformação, sob temperaturas elevadas, o que torna o estudo da resistência à fluência de fundamental importância.

Com o objetivo de se aumentar a resistência a fluência da liga Ti-6Al-4V, foram realizados tratamentos térmicos na liga estudada, pois essa operação é o método mais comum de se alterar microestruturas de materiais. O método em questão produz uma estrutura específica, alterando as características mecânicas e estruturais da liga, como aumento da dureza e da resistência mecânica, melhoria da ductilidade, da usinabilidade, da resistência ao desgaste, das propriedades de corte, da resistência à corrosão, da resistência ao calor, modificação das propriedades elétricas e magnéticas.^(4,5)

Uma estrutura que pode ser obtida por meio do tratamento térmico da liga Ti-6Al-4V é a estrutura chamada de Widmanstätten que apresenta um maior tamanho médio de grão quando comparada com o material não tratado. Quanto maior o tamanho de grão, menor será a energia de ativação presente no contorno e menos o material reagirá com o meio podendo ocasionar uma maior resistência à oxidação da liga.⁽⁶⁾

As ligas de titânio apresentam afinidade com o oxigênio como um dos principais fatores que limitam sua aplicação como componente de materiais estruturais em alta temperatura.^(1,7) Quando ligas de titânio são aquecidas a temperaturas de aproximadamente 800°C, oxigênio, hidrogênio e nitrogênio penetram nas ligas e aumentam a dureza e a fragilidade do material.⁽⁸⁾

Uma técnica para aumentar a vida útil ou a temperatura de trabalho é a utilização de recobrimentos especiais depositados por diversos processos. A eficiência desses recobrimentos é dependente dos materiais utilizados no revestimento e do processo utilizado para obtê-los. Esse tipo de recobrimento é chamado de barreira térmica (*Thermal Barrier Coating – TBC*), devido a sua função específica.⁽⁹⁾

Os recobrimentos são um recurso efetivo e de baixo custo para aumentar a temperatura de operação das ligas metálicas usadas em palhetas de turbina. Todavia, problemas de aderência durante o ciclo térmico e a difusão dos elementos do recobrimento no substrato são as atuais dificuldades encontradas na pesquisa desses materiais.⁽¹⁰⁾

Recentemente, os estudos realizados nessas pesquisas têm considerado o uso de recobrimento de barreira térmica nos componentes da seção quente das turbinas. Um sistema de recobrimento de camada dupla constituído de uma camada externa de



zircônia estabilizada pulverizado via plasma e uma camada de ligação interna de MCrAlY (onde M=Ni, Co, Fe ou uma combinação desses elementos) tem sido geralmente a configuração preferida.⁽⁸⁾

Resultados obtidos na literatura mostram que amostras recobertas têm maior resistência à fluência do que as não recobertas. Entretanto, os dados de fluência evidenciam que a eficiência do recobrimento melhora com o aumento da temperatura⁽⁸⁾.

O objetivo deste trabalho é avaliar o efeito do recobrimento cerâmico no comportamento em fluência na liga Ti-6Al-4V tratada termicamente com estrutura de Widmanstätten. Após tratamento térmico foi aplicado recobrimento cerâmico de CoNiCrAlY + ZrO₂ por aspersão térmica na liga de Ti-6Al-4V e então submetida a ensaios de fluência ao ar em temperatura de 600°C, na modalidade de carga constante, nas condições de 250 e 319 MPa.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, foi utilizada a liga Ti-6Al-4V na forma de barras cilíndricas, adquiridas da Empresa Multialloy Eng. Mat. Ltda., na condição forjada e recozida a 190°C durante 6 horas e resfriada ao ar. Esta configuração microestrutural da liga recebida corresponde à condição de maior aplicação na indústria aeronáutica. A caracterização quanto à composição química dos principais elementos (%p), atende aos requisitos da norma ASTM B265-89.⁽¹¹⁾

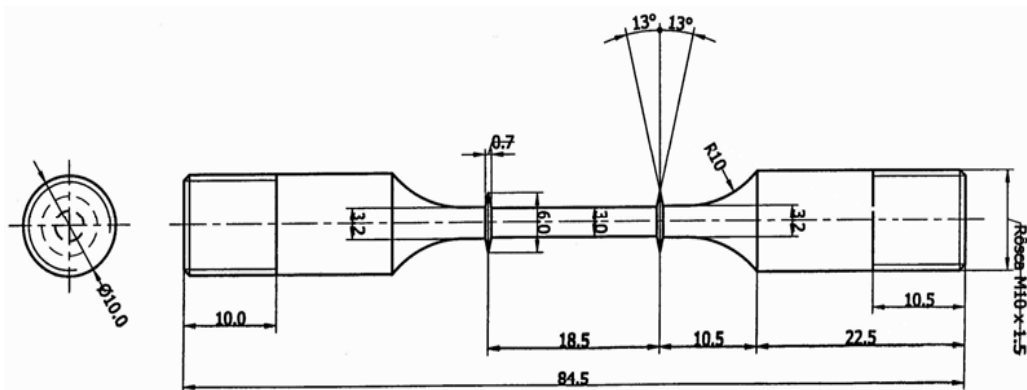


Figura 1. Esquema dos corpos-de-prova utilizados.⁽¹²⁾

2.1 Tratamentos Térmicos

A liga selecionada (Ti-6Al-4V recozida) foi submetida a tratamentos térmicos para obtenção da liga com estrutura de Widmanstätten.

O tratamento térmico consistiu no encapsulamento a vácuo dos corpos-de-prova em tubos de quartzo com diâmetro interno de 21 mm, colocados em um forno tubular Lindberg/blue-M modelo STF 54434C, sob atmosfera de argônio. Para a obtenção da estrutura de Widmanstätten as amostras foram submetidas à temperatura de 1.050°C por 30 minutos, com resfriamento ao forno até a temperatura de 700°C (6°C/min), mantendo-se esta temperatura por 1 hora seguido de resfriamento ao ar.

2.2 Recobrimento Cerâmico

A liga com estrutura de Widmanstätten foi recoberta com recobrimento cerâmico de CoNiCrAlY + ZrO₂ por aspersão térmica para ser submetida a ensaios de fluência. O recobrimento dos corpos-de-prova por aspersão térmica foi realizado na empresa Rolls-Royce do Brasil, em São Bernardo do Campo-SP.

Os corpos-de-prova de Ti-6Al-4V confeccionados para o ensaio de fluência foram preparados para metalização seguindo-se os procedimentos utilizados pela Rolls-Royce para recobrimento de palhetas de turbinas. Primeiramente, foi efetuado o desengraxamento utilizando-se acetona. O mascaramento foi feito utilizando-se fita de alta temperatura, própria ao processo de metalização. O jateamento da superfície foi feito com óxido de alumínio grana 60. Primeiramente, foi realizada a aplicação da camada metálica de CoNiCrAlY (Bond Coat Amdry 995C), com faixa de tamanho de partícula de -75 a +45 µm e camada média de 0,127 mm (0,005”) sob substrato de Ti-6Al-4V. Em seguida, foi feita a aplicação da camada cerâmica de zircônia estabilizada com 8%Y (%m) (top Coat Metco 204B NS) com faixa de tamanho de partícula de -75 a +45 µm e camada média de 0,635 mm (0,025”) sobre a camada metálica de CoNiCrAlY. Esse processo foi efetuado em equipamento de aspersão térmica Sulzer Metco Type 9 MB, com os parâmetros utilizados pela Rolls-Royce.

2.3 Ensaio de Fluência

Os ensaios de fluência foram realizados em fornos 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 E139-06.⁽¹³⁾

Foi utilizado o Software Antares para coleta de dados relativos ao alongamento dos corpos-de-prova e medidas de temperatura em períodos de tempo pré-determinados. Utilizou-se um transdutor do tipo LVDT Schlumberger D 6,50 para a obtenção das medidas de alongamento e um termopar tipo Cromel-Alumel AWG24 para o controle de temperatura.

3 RESULTADOS

3.1 Tratamento Térmico

No tratamento térmico realizado foi obtida a estrutura de Widmanstätten. As Figuras 2a e 2b apresentam imagens obtidas via microscópio óptico.

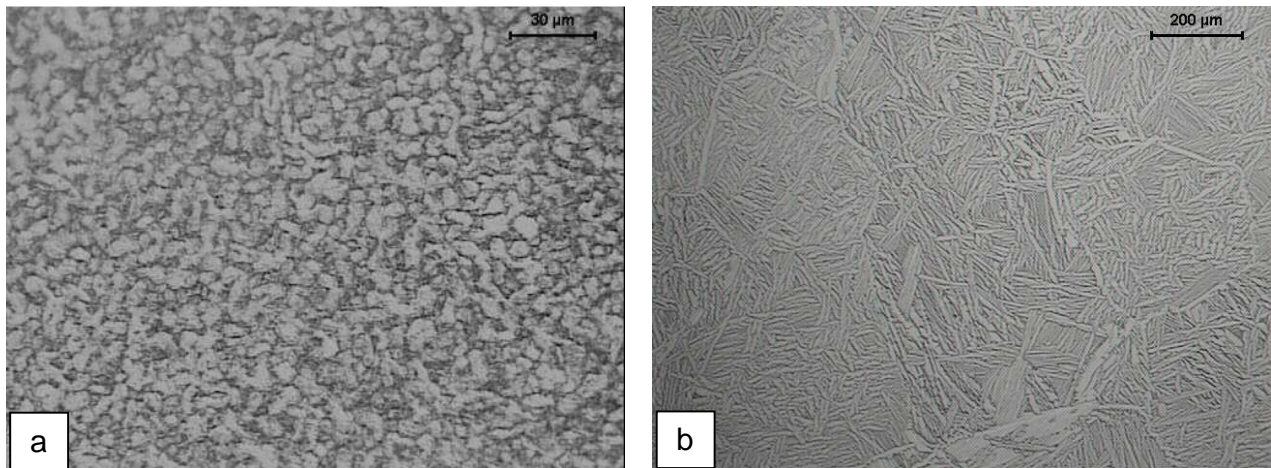


Figura 2 - Micrografia da liga Ti-6Al-4V: (a) como recebida, (b) estrutura de Widmanstätten.⁽⁶⁾

A Figura 3 apresenta um perfil microestrutural da camada cerâmica e metálica depositada na liga Ti-6Al-4V. O recobrimento apresenta trincas e poros, característicos do processo de aspersão térmica.

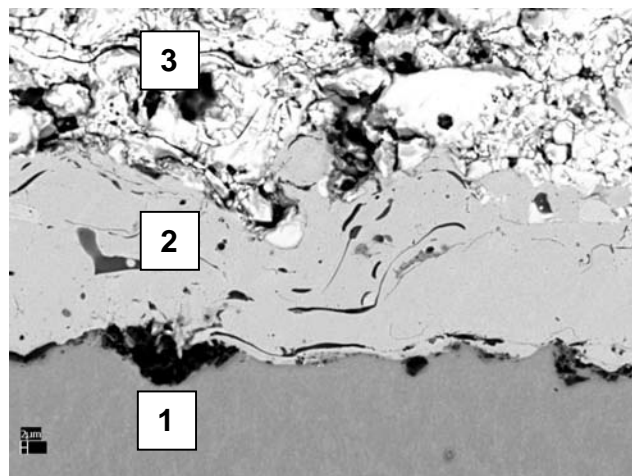


Figura 3. (1) Micrografia obtida via MEV da seção transversal do substrato; (2) recoberto com camada metálica de CoNiCrAlY; e (3) camada cerâmica de ZrO_2 .⁽⁴⁾

3.2 Ensaio de Fluência

A liga Ti-6Al-4V, após tratamento térmico e com recobrimento cerâmico, foi submetida a ensaios de fluência a 600°C nas condições de 250 MPa e 319 MPa, na modalidade de carga constante.

As Figuras 4 e 5 apresentam as curvas de fluência nas condições sem tratamento, com estrutura de Widmanstätten e com estrutura de Widmanstätten com recobrimento cerâmico, correspondentes à deformação verdadeira ϵ , como função do tempo.

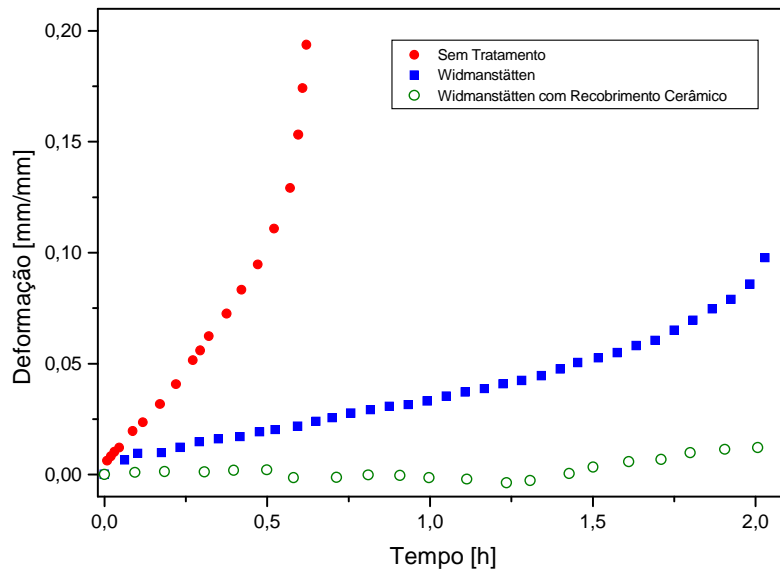


Figura 4- Curvas de fluência da liga Ti-6Al-4V a 600°C e 250 MPa: sem tratamento; com estrutura de Widmanstätten; com estrutura de Widmanstätten e recobrimento cerâmico.

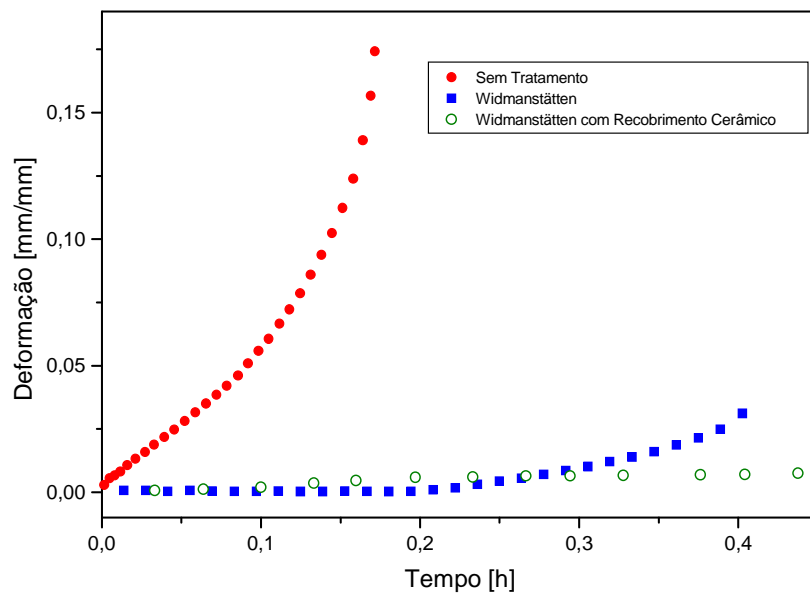


Figura 5- Curvas de fluência da liga Ti-6Al-4V a 600°C e 319 MPa: sem tratamento; com estrutura de Widmanstätten; com estrutura de Widmanstätten e recobrimento cerâmico.

A Tabela 1 apresenta a relação dos principais parâmetros experimentais obtidos a 600°C, a partir das curvas experimentais, em que σ é 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

relativo ao estágio primário, obtido ao final do estágio primário e/ou início do estágio secundário. O valor t_f é o tempo final de fratura e ε_f corresponde à deformação de fratura.

Tabela 1. Dados de fluência obtidos para temperatura de 600°C e nas condições de 250 MPa e 319 MPa

Tratamento	σ (MPa)	t_p (h)	$\dot{\varepsilon}_s$ (1/h)	t_f (h)	ε_f (mm/mm)
Sem tratamento	250	0,05	0,1978	0,62	0,1938
Widmanstätten	250	0,10	0,0306	2,03	0,0977
Sem tratamento	319	0,02	0,5530	0,17	0,1742
Widmanstätten	319	0,03	0,0566	0,40	0,0311

4 DISCUSSÕES

Após o tratamento térmico da liga Ti-6Al-4V foi obtida a estrutura de Widmanstätten que apresenta um maior tamanho médio de grão, em torno de 395 μm , quando comparada à estrutura equiaxial com tamanho médio de grão de aproximadamente 10 μm (Figura 2). Quanto maior o tamanho do grão, menor será a energia de ativação no contorno de grão e menor será a reação entre o material com o meio ambiente.

Como mostrado na Tabela 1, as taxas de fluência da microestrutura Widmanstätten são inferiores quando comparada com as da microestrutura equiaxial. Aparentemente, essa maior resistência à fluência da microestrutura Widmanstätten pode ser atribuída ao maior tamanho médio de grãos de 395 μm , que reduz o escorregamento do contorno de grão, as fontes de discordâncias e a taxa de difusão de oxigênio ao longo dos contornos de grão.

Os ensaios de fluência foram conduzidos até a ruptura do corpo-de-prova e a liga Ti-6Al-4V apresenta uma curva normal de fluência. Pela observação das curvas de fluência, apresentadas nas Figuras 4 e 5, e dos resultados apresentados na Tabela 1, nota-se que a liga com estrutura de Widmanstätten e Widmanstätten com recobrimento cerâmico a 600°C nas tensões de 250 Mpa e 319 MPa apresentam uma maior resistência à fluência, com valores maiores de t_p e redução da taxa de fluência estacionária.

A estrutura de Widmanstätten com recobrimento praticamente não apresenta deformação ao longo dos ensaios realizados. Essa condição mostra maior resistência devido ao recobrimento atuar como uma proteção contra a oxidação da liga.

Recobrimentos cerâmicos obtidos por aspersão térmica, com microestrutura porosa e natureza cerâmica, promovem bom isolamento térmico para o componente do metal principal. Com isso, estes recobrimentos podem ser submetidos a ciclos térmicos em altas temperaturas. A camada metálica de CoNiCrAlY foi aplicada para promover uma maior resistência e adesão entre o componente metálico e o recobrimento cerâmico. Além disso, esta camada de ligação promove resistência à oxidação para o componente do metal principal em altas temperaturas ⁽⁴⁾.

Os estudos na liga tratada e recoberta serão continuados para confirmação deste comportamento e determinação dos parâmetros de fluência da liga.

5 CONCLUSÃO

As curvas e os parâmetros obtidos de fluência conduzem à conclusão que a liga com estrutura de Widmanstätten e recobrimento cerâmico possui maior resistência à fluência.

A estrutura de Widmanstätten apresenta um maior tamanho de grão que, juntamente com o recobrimento cerâmico, atuam como uma barreira de proteção na oxidação e na fluência do material.

Agradecimentos

À Escola de Engenharia de Lorena EEL-USP/DEMAR, pela realização dos tratamentos térmicos.

À Empresa Rolls-Royce do Brasil (São Bernardo do Campo) pela deposição do recobrimento cerâmico no material.

Ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, pela cessão da sua infraestrutura.

REFERÊNCIAS

- 1 Guleryuz, H.; Cimenoglu, H. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 472, p. 241–246, 2009.
- 2 Leyens, C.; Peters, M. *Titanium and Titanium Alloys, Fundamentals and Applications*, p. 263, Wiley-VCH, Germany, 2003.
- 3 Sakai, T.; Ohashi, M.; Chiba, K., 1988, *Acta Metall.*, v. 36, pp.1781.
- 4 Reis, D. A. P. Efeito do recobrimento cerâmico e da atmosfera de ensaio na fluência de liga metálica refratária de titânio, Tese de Doutorado - INPE- São José dos Campos – SP - 2005.
- 5 Callister, W. D. Jr., *Materials Science and Engineering: an introduction*, 5. ed., Wiley & Sons, New York, 2000.
- 6 Sugahara, T.; Reis, D.A.P.; Moura Neto, C.; Barboza, M.J.R.; Perez, E.A.C.; Neto, F. P.; Hirschmann, A.C.O. *Materials Science Forum*, v. 636-637, p. 657-662, 2010.
- 7 Gurrappa, I.; Gogia, A.K. *Surface and Coatings Technology*, v. 139, p. 216-221, 2001.
- 8 Reis, D.A.P.; Neto, C. M.; Silva, C.R.M.; Barboza, M.J.R.; Neto, F.P. *Materials Science and Engineering A*, v. 486, p. 421–426, 2008.
- 9 Almeida, D. S. Estudo de revestimentos cerâmicos sobre substrato metálico, obtidos por deposição física de vapores por feixe de elétrons, para aplicação como barreira térmica, Tese de Doutorado -INPE- São José dos Campos – SP 2005.
- 10 Kearns, M. W.; Restall, J. E. *Sixth World Conf. on Titanium*, Cannes, paper SU8, p.396, Les Editions de Physique, Les Ulis, 1998.
- 11 American Society for Testing and Materials (ASTM). B-265-89. Standard specification for titanium and titanium alloy strip, sheet and plate. Philadelphia, 1990.
- 12 Sugahara, T.; Moura Neto, C.; Reis, D. A. P.; Neto, F. P. XIV ENCITA (14^o Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA), 2008.
- 13 American Society for Testing and Materials (ASTM). E-139-06. Standard Test Methods for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials. Philadelphia, 2006.