

Análise de fluência na liga Ti-6Al-4V com revestimento cerâmico

Heric Ramos Silva¹ Bianca Costa Rodrigues² Renata Jesuina Takahashi² Miguel Justino Ribeiro Barboza¹ Danieli Aparecida Pereira Reis^{2*} 

Resumo

A liga Ti-6Al-4V é muito utilizada no setor aeroespacial, porém sua baixa resistência à fluência em altas temperaturas limita seu uso em ambientes severos. Para superar esse problema, revestimentos cerâmicos do tipo barreira térmica (TBCs - *Thermal Barrier Coatings*) têm sido empregados visando aumentar a durabilidade sob condições térmicas severas. Desse modo, este estudo avaliou a aplicação de revestimentos cerâmicos, compostos por uma camada metálica de CoNiCrAlY e uma camada cerâmica de zircônia estabilizada com 8% de ítria, aplicados por aspersão térmica a plasma (*plasma spraying*), sobre o comportamento em fluência da liga Ti-6Al-4V. Para isso, conduziu-se ensaios de fluência em diferentes temperaturas e tensões constantes e, através de microscopia eletrônica de varredura (MEV), realizou-se a análise fractográfica. Os resultados mostraram que o TBC aumentou o tempo até a ruptura em até 86,5% (250 MPa) e 66,7% (319 MPa) e reduziu a taxa de deformação mínima em até 93,5% e 71,9%, respectivamente, na condição de 600 °C, indicando melhora significativa na resistência à fluência. Ademais, a análise fractográfica revelou fratura dúctil com microcavidades, sugerindo que o principal mecanismo de fluência fosse a movimentação de discordâncias, com valores de energia de ativação e expoente de tensão compatíveis com os da literatura. Conclui-se que os TBCs são eficazes na melhoria da resistência à fluência da liga Ti-6Al-4V.

Palavras-chave: Fluência; TBC; Aspersão térmica por plasma; Ti-6Al-4V.

Creep analysis of the Ti-6Al-4V alloy with ceramic coating

Abstract

The Ti-6Al-4V alloy is widely used in the aerospace industry; however, its low resistance to creep at high temperatures limits its use in severe environments. To overcome this issue, thermal barrier coatings (TBCs) have been employed to enhance durability under severe thermal conditions. Thus, this study evaluated the application of ceramic coatings, consisting of a CoNiCrAlY metallic layer and an 8% yttria-stabilized zirconia ceramic layer, applied by plasma spraying, on the creep behavior of the Ti-6Al-4V alloy. For this purpose, creep tests were conducted at different temperatures and constant stresses and, through scanning electron microscopy (SEM), fractographic analysis was performed. The results showed that the TBC increased the time to rupture by up to 86.5% (250 MPa) and 66.7% (319 MPa), and reduced the minimum strain rate by up to 93.5% and 71.9%, respectively, under the condition of 600 °C, indicating a significant improvement in creep resistance. Furthermore, the fractographic analysis revealed ductile fracture with microvoids, suggesting that the main creep mechanism was dislocation motion, with activation energy and stress exponent values consistent with those found in the literature. It is concluded that TBCs are effective in improving the creep resistance of the Ti-6Al-4V alloy.

Keywords: Creep, TBC; Plasma-sprayed coating; Ti-6Al-4V.

¹Escola de Engenharia de Lorena, DEMAR-EEL, Universidade de São Paulo, Lorena, SP, Brasil.

²Laboratório de Comportamento Mecânico de Metais, Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de São Paulo, São José dos Campos, SP, Brasil.

*Autor correspondente: danieli.reis@unifesp.br

E-mails: heric.silva@gmail.com; bianca.costa@unifesp.br; renata.takahashi@unifesp.br; miguelbarboza@usp.br



1 Introdução

A liga Ti-6Al-4V é muito utilizada nas indústrias aeronáutica e aeroespacial, especialmente em componentes como palhetas de turbinas a gás, devido à sua elevada resistência em temperaturas moderadamente elevadas [1-3]. Entretanto, sua aplicação em temperaturas superiores a 500 °C é limitada pela formação de óxidos superficiais e pela difusão de elementos intersticiais como oxigênio, nitrogênio e hidrogênio, que resultam em aumento da dureza e fragilização do material [4-6].

Visando possibilitar o uso da liga em temperaturas mais elevadas, recobrimentos cerâmicos conhecidos como barreiras térmicas (TBCs - *Thermal Barrier Coatings*), compostos tipicamente por uma camada metálica de MCrAlY (com M sendo Ni, Co Fe ou uma combinação desses elementos) e uma camada superior de zircônia parcialmente estabilizada com ítria, têm sido aplicados [7,8]. Ademais, quando estabilizada com 6 a 8% em peso de ítria, a zircônia apresenta maior estabilidade em ciclos térmicos acima de 1000 °C, sendo indicadas para aplicações mais severas, como turbinas de alta pressão [9]. Neste sistema, a camada metálica (*bond coat*) atua como ligação e proteção contra oxidação, enquanto a camada cerâmica (*top coat*) reduz a temperatura no substrato e absorve gradientes térmicos durante o serviço [9-11]. Por sua vez, a aplicação é geralmente realizada por aspersão térmica por plasma (*plasma spraying*) [7].

Já a fluência é um mecanismo de deformação permanente, lenta e contínua que ocorre sob tensão constante, sendo especialmente relevante em materiais metálicos expostos a temperaturas elevadas por longos períodos. Esse fenômeno é importante em temperaturas superiores a $0,4 T_f$ (temperatura de fusão absoluta), ocorrendo em função da própria temperatura, tensão, microestrutura e mobilidade das discordâncias. A curva típica de fluência é dividida em três estágios: primário, secundário e terciário. O estágio secundário, estágio em que a taxa de deformação é constante (denominada taxa mínima de fluência), constitui um dos principais parâmetros utilizados em projetos de engenharia [12-14].

Considerando a importância da fluência na durabilidade de componentes expostos a altas temperaturas, este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito de recobrimentos

cerâmicos na fluência da liga Ti-6Al-4V. Para isso, foram realizados ensaios de fluência e análises fractográficas a fim de compreender os mecanismos atuantes na deformação e verificar a influência do revestimento de barreira térmica no desempenho da liga em altas temperaturas.

2 Materiais e métodos

Os corpos de prova (CDPs) utilizados nos ensaios de fluência foram usinados pela Fautech Ferramentaria conforme as especificações e sistemas disponíveis de fixação e medição (Figura 1).

A liga Ti-6Al-4V utilizada no trabalho foi fornecida pela Multialloy Eng. Mat. Ltda, na condição forjada e recozida (190 °C por 6 h), com composição conforme ASTM B265-89: 89,16% Ti, 6,61% Al, e 4,23% V [15], determinada por espectroscopia de emissão ótica com plasma (ARL 3410).

Após usinagem, os CDPs foram recobertos por aspersão térmica por plasma (Sulzer Metco 9MB), realizada na Rolls-Royce do Brasil, localizada em São Bernardo do Campo - São Paulo. O recobrimento consistiu em:

- **Camada metálica** (CoNiCrAlY - *bond coat* Amdry 995C, com tamanho de partícula -75 a +45 µm e espessura média de 0,127 mm);
- **Camada cerâmica** (ZrO₂ com 8% Y₂O₃ - *top coat* Metco 204B NS, tamanho de partícula -75 a +45 µm e espessura média de 0,635 mm).

O processo incluiu desengraxamento com acetona e mascaramento com fita de alta temperatura, jateamento com Al₂O₃ (grana 60) e mascaramento térmico. As composições químicas dos pós utilizados estão descritas na Tabela 1.

2.1 Ensaio de fluência

Os ensaios de fluência seguiram a norma ASTM E139-06 [16] e foram realizados em fornos da marca Mayes, pertencentes ao ITA/CTA, com sistemas de controle e aquisição de dados (BSW Tecnologia). A deformação foi monitorada

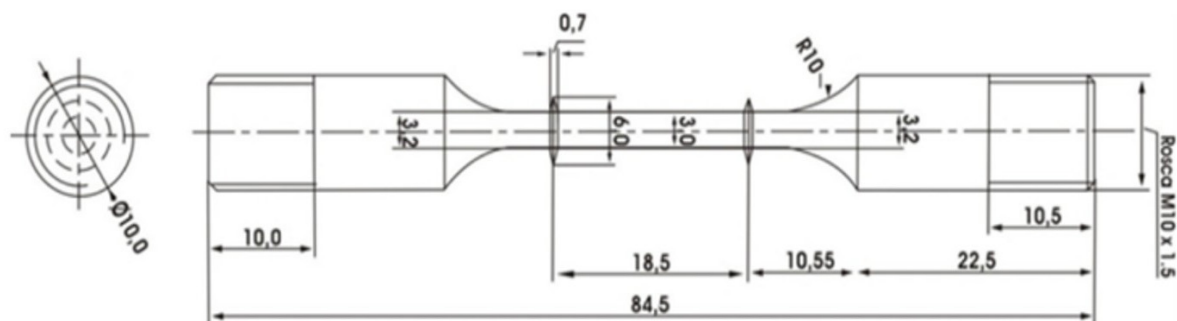


Figura 1. Configuração dos corpos de prova, com dimensões em mm.

com um transdutor LVDT Schlumberger D 6,50 (sensibilidade de 53,18 mV/V/mm), e a temperatura controlada por termopar tipo Cromel-Alumel AWG24. A coleta de dados de temperatura e alongamento foi realizada continuamente pelo *software* Antares, com registro automático em intervalos pré-definidos. A calibração do sistema foi realizada com extensômetro de alta precisão (Instron 2602-004), assegurando a exatidão e reprodutibilidade das medidas.

Antes da aplicação da carga, os CDPs foram posicionados na região central do forno, alinhados ao sistema de medição. O forno foi selado com mantas de fibra de vidro e tijolos refratários nas extremidades, para evitar perdas de calor. Inicialmente, foi aplicada 10% da carga total para ajuste e estabilização térmica do sistema, e após uma hora, a carga total de ensaio foi imposta.

Os ensaios de fluência foram realizados sob as seguintes condições:

- A 500 °C com tensões de 291, 465 e 520 MPa;
- A 600 °C com tensões de 250, 291 e 319 MPa;
- A 700 °C com tensões de 42, 56 e 291 MPa.

Para cada condição, foi utilizado um único corpo de prova, justificando-se essa abordagem pela alta confiabilidade do sistema experimental, devidamente calibrado e validado. Os ensaios foram conduzidos até a fratura dos CDPs, considerada como o critério de ruptura. A deformação total foi determinada

com base no valor final registrado pelo sistema no momento da fratura, com monitoramento contínuo de temperatura e alongamento por meio do *software*. Além do mais, para fins comparativos, parte dos resultados apresentados foi confrontada com dados obtidos por Reis [13] que avaliou outros parâmetros sobre o mesmo lote dos corpos de prova utilizados neste estudo, possibilitando a ampliação da análise do comportamento da liga Ti-6Al-4V.

2.2 Análise fractográfica

Após o ensaio mecânico de fluência, as superfícies de fratura dos CDPs foram observadas por meio de uma Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo VP 1450, fabricado pela Leo, disponibilizado pelo Laboratório de Microscopia Eletrônica (LME) do DEMAR - EEL - USP.

3 Resultados e discussão

3.1 Caracterização inicial pré-ensaio

Os corpos de prova utilizados neste estudo são do mesmo lote do trabalho de Reis [13], que caracterizou a microestrutura inicial das camadas do sistema TBC por microscopia eletrônica de varredura, evidenciando boa aderência e ausência de delaminações (Figura 2). As espessuras observadas foram de 0,122 mm para a camada metálica e 0,806 mm para a cerâmica.

Tabela 1. Composição química dos pós utilizados no recobrimento dos corpos de prova

Composição química (%p)	Co	Ni	Cr	Al	Y	-
<i>Bond coat</i>	Balanço	32,0	21,0	8,0	0,5	-
Composição química (%p)	Y ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	ZrO ₂
<i>Top coat</i>	8,0	1,0	0,20	0,20	0,20	Balanço

Fonte: Reis [13].

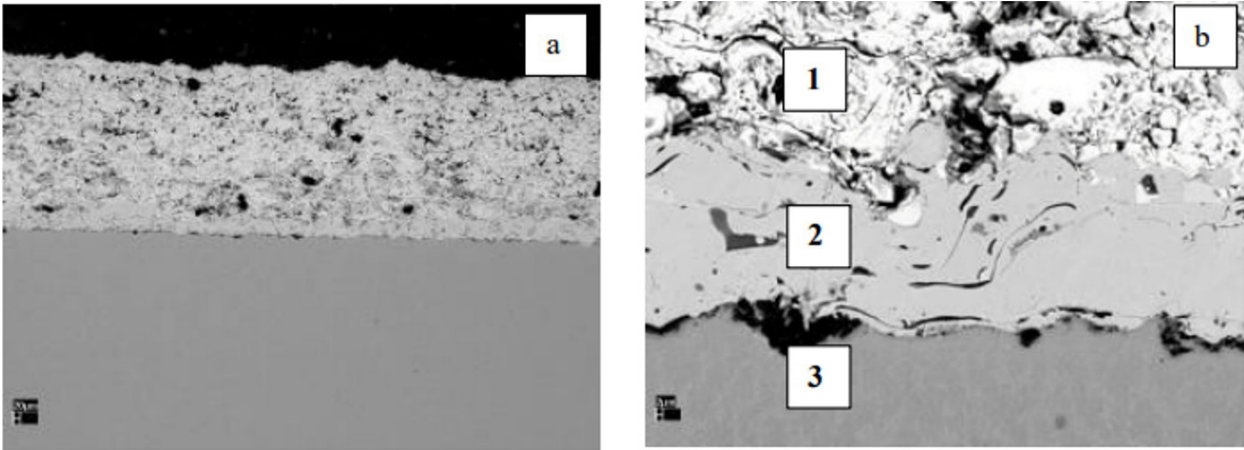


Figura 2. Micrografia por MEV da amostra com TBC: (a) camadas sobre o substrato de titânio; (b) visão ampliada destacando: 1) camada cerâmica, 2) camada metálica e 3) substrato de Ti-6Al-4V. **Fonte:** Reis [13].

Além disso, a liga Ti-6Al-4V, utilizada como substrato, foi caracterizada por microscopia óptica e apresentou microestrutura equiaxial na condição como recebida, composta por grãos α (HC) e regiões β (CCC) distribuídas nos contornos de grão [13].

3.2 Ensaio de fluência com e sem o recobrimento cerâmico

Os valores de limite de escoamento (σ_e), limite de resistência (σ_r), alongamento percentual (A_p) e redução percentual da área (ϕ) da liga Ti-6Al-4V, na condição como recebida, obtidos por meio dos ensaios de tração a quente, estão apresentados na Tabela 2.

A análise das curvas de deformação verdadeira em função do tempo (Figura 3) permitiu a extração dos principais parâmetros de fluência, apresentados na Tabela 3.

Observou-se que, com o aumento da temperatura de ensaio, houve redução nos tempos correspondentes aos estágios primário (t_p) e de ruptura (t_r). Além do mais, verificou-se que a taxa de fluência secundária foi influenciada pela temperatura, sendo particularmente elevada para a condição de 291 MPa a 700 °C. Este comportamento pode estar associado ao fato de a tensão aplicada ser significativamente superior aos limites de escoamento e de resistência da liga nessa temperatura. Verificou-se também que a deformação final na fratura foi significativa, indicando a ocorrência de fratura dúctil. Resultados semelhantes foram reportados por Barboza [14], que obteve valores de deformação na fratura entre 0,13005 e 0,15919 a 500 °C, e entre 0,1846 e 0,2667 a 600 °C.

Ademais, os parâmetros extraídos permitiram estimar o mecanismo de fluência atuante. A linearização da Lei de Norton (Equação 1) e da equação do tipo Arrhenius (Equação 2)

Tabela 2. Resultado do teste de tração a quente da liga de Ti-6Al-4V como recebida.

Temperatura (°C)	σ_e (MPa)	σ_r (MPa)	A_p (%)	ϕ (%)
500	521	638	30	73,6
600	377	407	46	85,7
700	73	193	58,3	88,2

Fonte: Reis [13].

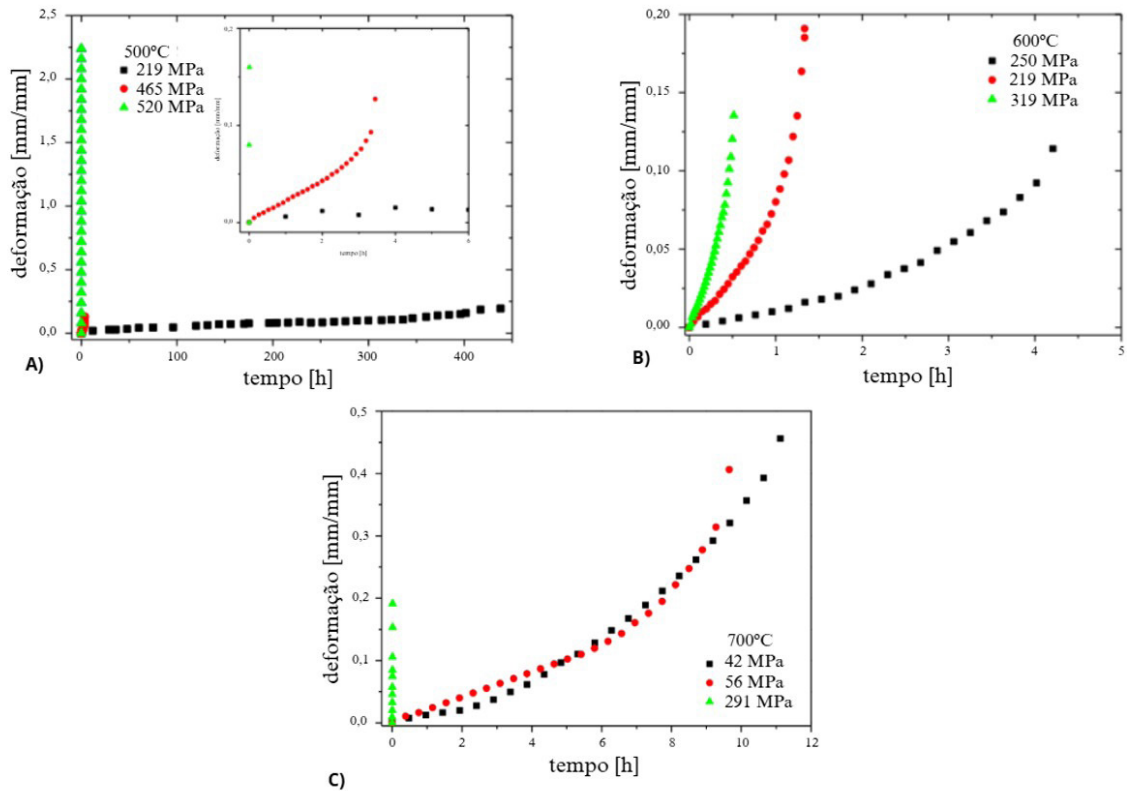


Figura 3. Curvas de fluência obtidas para as condições: (a) 291, 465 e 520 MPa a 500 °C; (b) 250, 291 e 319 MPa a 600 °C; e (c) 42, 56 e 291 MPa a 700 °C.

permitiu a determinação do expoente de tensão (n) e da energia de ativação (Q_c), com os gráficos correspondentes apresentados na Figura 4. Ambas equações são amplamente utilizadas nos estudos de fluência por serem derivadas da Lei da Potência, relacionando a taxa de fluência com a tensão e a energia de ativação do processo [3].

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

(1)

Em que, B é uma constante característica do material, n é o expoente de tensão e $\dot{\epsilon}$ é a taxa mínima de fluência [3].

$$\dot{\epsilon} = B_0 \times \sigma^n \times e^{-Q_c/RT}$$

(2)

Em que, B_0 é um fator dependente da tensão e da estrutura do material, Q_c é a energia de ativação para fluência e n é o expoente de tensão [3].

Os resultados indicaram que, com o aumento da temperatura, há tendência de decréscimo no valor de n, conforme evidenciado no trabalho de Reis [13] que relatou valores de expoente de tensão variando entre 2,23 e 11,73 ao ar. Entretanto, em 600 °C, observou-se um aumento pontual no valor de n (n=10,87), porém com resultados ainda dentro

Tabela 3. Tabela comparativa dos parâmetros de fluência para a liga de Ti-6Al-4V

Temperatura (°C)	σ (MPa)	t_p (h)	$\dot{\epsilon}_s$ (1/h)	t_r (h)	ϵ_r (mm/mm)
500	291	36	0,02876	438	0,1936
	465*	0,2667	0,02041	3,45	0,1272
	520*	0,56	0,0304	2,24	0,1056
600	250*	0,38	0,0104	4,59	0,1490
	291	0,25	0,0797	1,33	0,1908
	319*	0,03	0,1401	0,51	0,1353
700	42*	0,967	0,00912	11,61	0,4719
	56*	0,389	0,02025	9,66	0,40636
	291*	0,003	9,4262	0,0139	0,1914

Fonte: Dados próprios e *Dados extraídos de Reis [13].

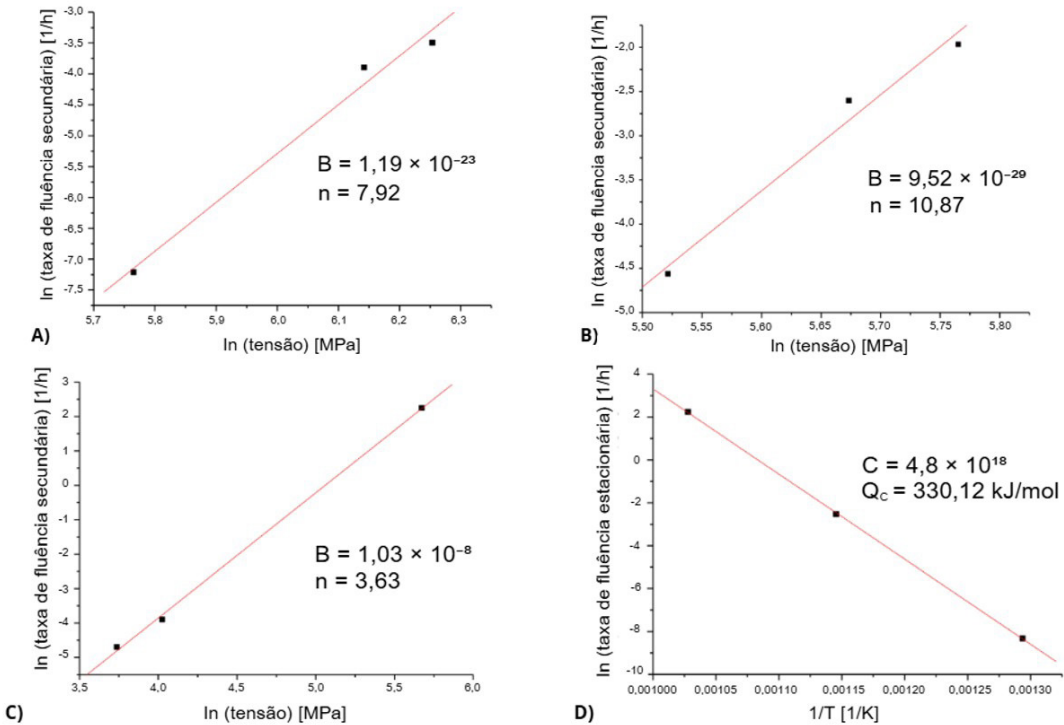


Figura 4. Curvas de regressão utilizadas para determinar os parâmetros de fluência: ln(taxa de fluência secundária) em função de ln(tensão) para obtenção do expoente de tensão (a) a 500 °C; (b) a 600 °C e (c) a 700 °C; e (d) ln(taxa de fluência estacionária) em função de 1/T para obtenção da energia de ativação.

da faixa reportada na literatura. Estudos anteriores, como os de Evans e Harrison [17] identificaram para ligas de titânio $\alpha + \beta$ (tal qual para a liga de Ti-6Al-4V) expoentes de tensão entre 4 e 34 e energias de ativação entre 259 e 405 kJ/mol, na faixa de temperatura de 397 a 552 °C.

Brigante [11], ao estudar a influência da microestrutura e da presença de recobrimento cerâmico na fluência da liga Ti-6Al-4V, encontrou valores de energia de ativação de 271,3 kJ/mol para martensita, e de 313,685 e 313,648 kJ/mol para microestruturas do tipo Widmanstätten com e sem recobrimento, respectivamente. Barboza [14] também relatou energia de ativação da ordem de 319 kJ/mol para a liga na condição equiaxial, como recebida. Desse modo, os valores obtidos neste estudo - energia de ativação de 330,12 kJ/mol e expoente de tensão entre 3,63 e 10,87 - ao serem comparados com os reportados na literatura, permitem sugerir que o mecanismo predominante de fluência é a movimentação de discordâncias.

A Tabela 4 apresenta compara os parâmetros de fluência da liga Ti-6Al-4V com e sem recobrimento cerâmico, para a temperatura de 600 °C [13]. Observa-se que, na presença do recobrimento, a liga apresentou maior resistência à fluência, evidenciada por um aumento no tempo até a ruptura (t_r) de aproximadamente 86,5% sob tensão de 250 MPa e 66,7% sob 319 MPa.

Além disso, a taxa de fluência mínima ($\dot{\epsilon}_s$) foi reduzida em cerca de 93,5% e 71,9%, respectivamente. Esses resultados demonstram a eficácia do revestimento

cerâmico em retardar a deformação por fluência, mesmo sob tensões elevadas, mantendo a ductilidade do material praticamente inalterada.

3.3 Análise fractográfica

Para completar a compreensão mecânica acerca do fenômeno da fluência, realizou-se a análise fractográfica. As Figuras 5, 6 e 7 ilustram as superfícies de fraturas dos corpos de prova ensaiados nas temperaturas de 500, 600 e 700 °C, sob tensão de 291 MPa.

As imagens revelam, para todas as condições avaliadas, fraturas de natureza dúctil, caracterizadas pela presença expressiva de microcavidades formadas devido à movimentação de discordâncias.

Com o aumento da temperatura, observou-se um acréscimo na densidade dos *dimples* e na profundidade dessas cavidades. Além disso, foi constatado o descolamento do recobrimento cerâmico nas diferentes condições ensaiadas, o que pode estar associado à diferença de dilatação térmica entre as camadas, tensões de desajuste térmico ou a falhas na adesão [18-20]. Contudo, abordagens como o *laser remelting* têm mostrado potencial para melhorar a resistência à fratura e a adesão entre o substrato e o recobrimento cerâmico [21].

Dessa forma, a análise fractográfica indicou que o mecanismo predominante de fratura nas condições avaliadas corresponde à formação e coalescimento de microcavidades associadas à movimentação de discordâncias.

Tabela 4. Tabela comparativa dos parâmetros experimentais de fluência a 600 °C

	σ (MPa)	t_p (h)	$\dot{\epsilon}_s$ (1/h)	t_r (h)	ϵ_r (mm/mm)	RA (%)
Recoberta	250	0,38	0,0104	4,59	0,1490	71,91
	319	0,03	0,1401	0,51	0,1353	69,75
Não recoberta	250	0,03	0,1597	0,62	0,1940	75,83
	319	0,01	0,4990	0,17	0,1740	62,99

Fonte: Reis [13].

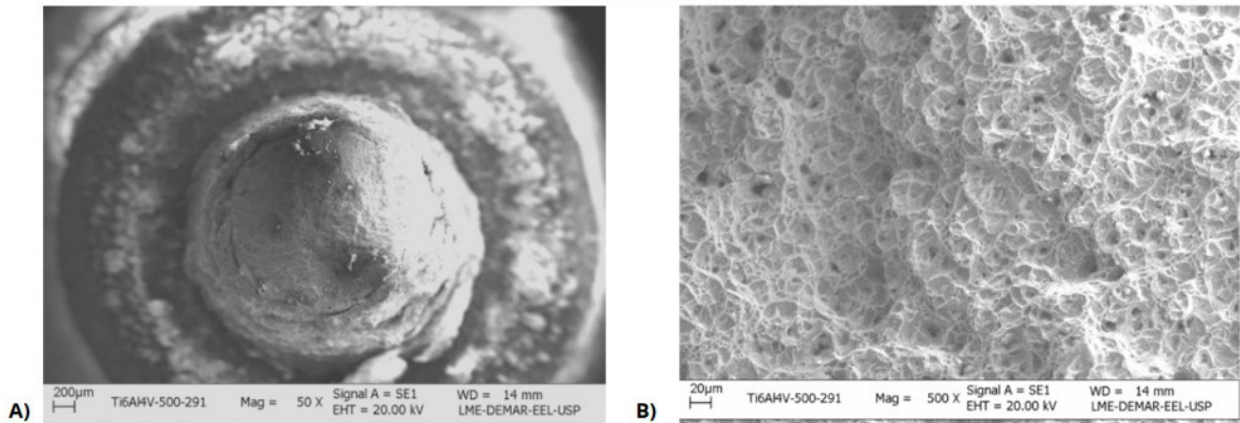


Figura 5. Análise fractográfica da superfície da fratura a 500°C: (a) aspecto geral e (b) região central.

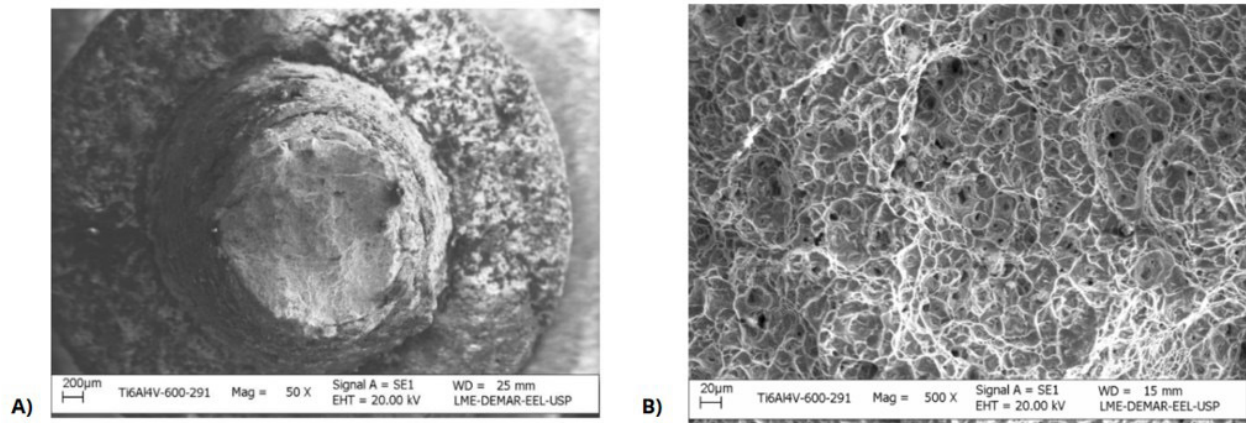


Figura 6. Análise fractográfica da superfície da fratura a 600°C: (a) aspecto geral e (b) região central.

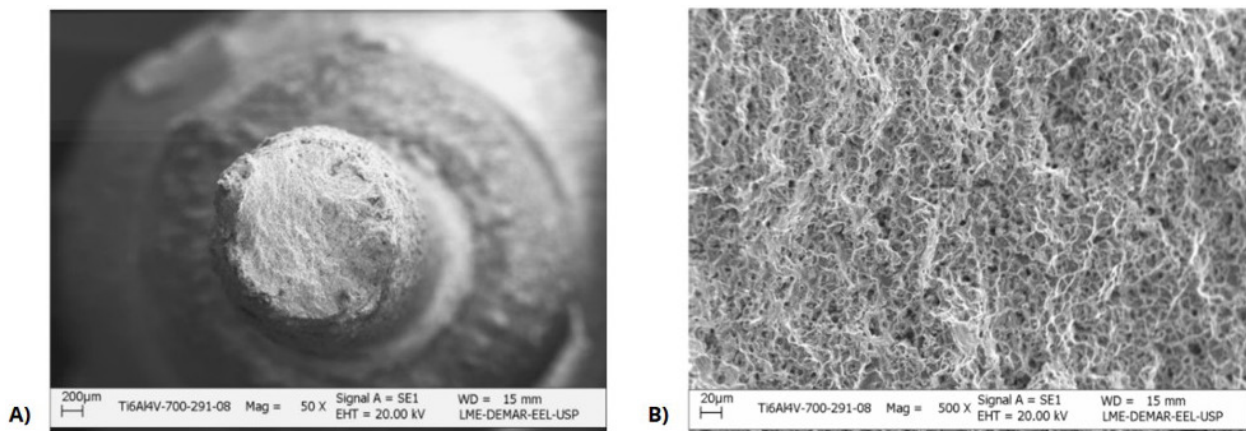


Figura 7. Análise fractográfica da superfície da fratura a 700°C: (a) aspecto geral e (b) região central.

4 Conclusões

Este estudo analisou o comportamento em fluência da liga Ti-6Al-4V com recobrimento cerâmico de barreira térmica (TBC) sob diferentes condições de temperatura (500, 600 e 700 °C) e tensão, com foco na avaliação dos parâmetros de fluência, energia de ativação, mecanismo de deformação e características fractográficas. A partir dos resultados experimentais, pode-se concluir que:

- A 700 °C, a influência da tensão sobre o comportamento em fluência é menos significativa, refletida nos baixos valores de expoente de tensão observados;
- O material apresentou boa ductilidade em todas as condições de ensaio;
- A condição de 500 °C e 291 MPa resultou em maior resistência à fluência, com elevados tempos de fluência primária (t_p) e ruptura (t_r), e baixa taxa de deformação;

- As curvas obtidas apresentaram o perfil típico de fluência, com os três estágios distintos bem definidos;
- Os valores do expoente de tensão variaram entre 3,63 e 10,87, demonstrando a sensibilidade do material às diferentes condições de carga e temperatura;
- A energia de ativação calculada foi de 330,12 kJ/mol, valor compatível com ligas de titânio $\alpha+\beta$;
- O recobrimento cerâmico mostrou-se eficaz ao aumentar a vida útil do material sob fluência;
- A análise conjunta da energia de ativação e do expoente de tensão indica que o mecanismo dominante de deformação é a movimentação e escalonamento de discordâncias;

- A análise fractográfica confirmou a ocorrência de fratura dúctil, caracterizada pela formação e coalescimento de microcavidades, resultando na falha do material.

Dessa maneira, os resultados obtidos reforçam o papel do recobrimento cerâmico na melhoria da resistência à fluência da liga Ti-6Al-4V, destacando a importância do controle dos parâmetros térmicos e mecânicos em aplicações de alta temperatura, como em componentes aeroespaciais. Esses resultados evidenciam o potencial de aplicação dos

TBCs em turbinas de aviação e motores aeroespaciais sujeitos a ambientes críticos, contribuindo para o aumento da vida útil e confiabilidade estrutural desses sistemas.

Agradecimentos

CNPq, Capes, FAPESP, FINEP, Grupo de Fluência ITA, Laboratório de Comportamento Mecânico de Metais, EEL-USP, DEMAR-EEL, e Rolls-Royce do Brasil.

Referências

- 1 Sakai T, Ohashi M, Chiba K, Jonas JJ. Recovery and recrystallization of polycrystalline nickel after hot working. *Acta Metallurgica*. 1988;36(7):1781-1790. [http://doi.org/10.1016/0001-6160\(88\)90246-5](http://doi.org/10.1016/0001-6160(88)90246-5).
- 2 Lee WS, Lin CF. High temperature deformation behavior of Ti-6Al-4V alloy evaluated by strain-rate compression tests. *Journal of Materials Processing Technology*. 1998;75(1-3):127-136. [http://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00302-6](http://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00302-6).
- 3 Evans RW, Wilshire B. Introduction to creep. London: The Institute of Materials; 1993. 115 p.
- 4 Reis DAP. Efeito do recobrimento cerâmico e da atmosfera de ensaio na fluência de liga refratária. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE); 2004. 188 p.
- 5 Welsch G, Kahveci AI. Oxidation of high-temperature intermetallics. In: Grobstein T, Doychak J, editors. Oxidation of high-temperature intermetallics. Warrendale: The Minerals, Metals & Materials Society (TMS); 1988. cap. 3, p. 167-174.
- 6 Takahashi RJ, Assis JMK, Fazan LH, Rodríguez LAA, Capella AG, Reis DAP. Development on Ti-6Al-4V for aerospace application. *Coatings*. 2025;15(1):47. <http://doi.org/10.3390/coatings15010047>.
- 7 Almeida DS. Estudo de revestimentos cerâmicos sobre substrato metálico, obtidos por deposição física de vapores por feixe de elétrons para aplicação como barreira térmica. [tese]. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005.
- 8 Reis DAP, Moura C No, Silva CRM, Barboza MJR, Piorino F No, Perez EAC. Effect of coating on the creep behavior of the Ti-6Al-4V alloy. *Materials Science and Engineering A*. 2008;486(1-2):421-426. <http://doi.org/10.1016/j.msea.2007.09.024>.
- 9 Alperine S, Lelait L. Microstructural investigation of plasma-sprayed yttria partially stabilized zirconia TBC. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power – Transactions of the ASME*. 1994;116(1):258-65.
- 10 Siemens AG. Standard Internal Report. Berlin: Siemens AG; 1982.
- 11 Brigante LANS. Estudo de tratamento térmico e recobrimento como forma de barreira térmica sobre o comportamento em fluência da liga Ti-6Al-4V [dissertação]. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica; 2011.
- 12 Callister WD. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. Rio de Janeiro: LTC; 2002. cap. 8, p. 157-161.
- 13 Reis DAP. Estudo de recobrimento cerâmico e da atmosfera de ensaio na fluência da liga metálica refratária de titânio. [tese]. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005.
- 14 Barboza MJR. Estudo e modelagem sob condições de fluência da liga Ti-6Al-4V [tese]. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica; 2001.
- 15 American Society for Testing and Materials. B265-89. Standard specification for titanium and titanium alloy strip, sheet and plate. Philadelphia: ASTM; 1990.
- 16 American Society for Testing and Materials. E139-06. Standard practice for conducting creep, creep-rupture and stress-rupture tests of metallic materials. Philadelphia: ASTM; 2006.
- 17 Evans WJ, Harrison GF. Power law steady state creep in α/β titanium alloys. *Journal of Materials Science*. 1983;18(11):3449-3455. <http://doi.org/10.1007/BF00544173>.
- 18 Zeng S, Liu Y, Fan X, Huang W, Gu L, Zou B, et al. Thermal shock resistance of APS 8YSZ thermal barrier coatings on titanium alloy. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2012;21:335-343. <https://doi.org/10.1007/s11666-011-9721-2>.

- 19 Abedi HR, Salehi M, Shafyei A. Microstructural, mechanical and thermal shock properties of triple-layer TBCs with different thicknesses of bond coat and ceramic top coat deposited onto polyimide matrix composite. *Ceramics International*. 2018;44(6):6212-6222. <http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.01.006>.
- 20 Evans AG, Clarke DR, Levi CG. The influence of oxides on the performance of advanced gas turbines. *Journal of the European Ceramic Society*. 2008;28(7):1405-1419. <http://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.12.023>.
- 21 de Freitas FE, da Silva RAL, Takahashi RJ, dos Reis AG, Capella AG, Reis DAP. Influence of laser remelting on creep resistance in Ti-6Al-4V alloy with thermal barrier coating. *Coatings*. 2025;15(2):220. <http://doi.org/10.3390/coatings15020220>.

Recebido em: 22 Abr. 2025

Aceito em: 01 Set. 2025

Editor responsável:

Sabrina Arcaro 