







Avaliação das propriedades mecânicas em alta temperatura da liga Ti-6Al-4V com e sem revestimento de barreira térmica para aplicações aeroespaciais

Bianca Costa Rodrigues¹ 
Renata Jesuina Takahashi² 
Luiz Felipe Pereira Soares¹ 
Lucas Caetano da Silva¹ 
Vera Lúcia de Óthero Brito² 
Danieli Aparecida Pereira Reis^{1*} 

Resumo

Este trabalho investigou algumas propriedades mecânicas importantes em alta temperatura para a liga Ti-6Al-4V com e sem revestimento de proteção térmica (TBC, *Thermal Barrier Coating*), visando aplicações aeroespaciais. Os corpos de prova foram ensaiados por tração a quente nas temperaturas de 23 °C, 500 °C, 550 °C e 600 °C, e foram submetidos à análise microestrutural inicial, análise das propriedades mecânicas obtidas durante o ensaio de tração a quente e análise fractográfica. Os resultados mostraram queda significativa dos limites de escoamento (σ_y) e resistência à tração (σ_r) com o aumento da temperatura, acompanhada por aumento da ductilidade. A evolução da fratura em função da temperatura do ensaio, de moderadamente dúctil para altamente dúctil, foi confirmada visualmente pelo estereomicroscópio e pelo microscópio eletrônico de varredura, podendo ser associada a mecanismos como esferoidização da fase α e recristalização dinâmica. Na amostra revestida, observou-se menor resistência mecânica, mas a ductilidade manteve-se elevada e não houve fratura completa do revestimento. Conclui-se que o TBC na condição estudada contribui para a proteção térmica e manutenção da ductilidade da liga em ambientes térmicos severos, porém com perda significativa de resistência mecânica, exigindo controle adequado da espessura e dos parâmetros de processo.

Palavras-chave: Tração a quente; TBC; Ti-6Al-4V; Mecanismo de fratura.

Evaluation of high-temperature mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy with and without thermal barrier coating for aerospace applications

Abstract

This study investigated key high-temperature mechanical properties of the Ti-6Al-4V alloy, both with and without a thermal barrier coating (TBC), aiming at aerospace applications. The specimens were subjected to hot tensile testing at temperatures of 23 °C, 500 °C, 550 °C, and 600 °C, along with initial microstructural analysis, analysis of the mechanical properties obtained during the hot tensile test, and fractographic analysis. The results showed a significant decrease in yield strength (σ_y) and tensile strength (σ_r) with increasing temperature, accompanied by an increase in ductility. The evolution of the fracture mode as a function of the test temperature, from moderately ductile to highly ductile, was visually confirmed by stereomicroscopy and scanning electron microscopy, and may be associated with mechanisms such as α -phase spheroidization and dynamic recrystallization. In the coated sample, lower mechanical strength was observed, but ductility remained high and no complete failure of the coating occurred. It is concluded that the TBC under the conditions investigated contributes to thermal protection and to the maintenance of ductility of the alloy in severe thermal environments, but with a significant loss of mechanical strength, requiring adequate control of coating thickness and processing parameters.

Keywords: Hot tensile; TBC; Ti-6Al-4V; Fracture mechanism.

¹Laboratório de Comportamento Mecânico de Metais, Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de São Paulo - UNIFESP, São José dos Campos, SP, Brasil.

²Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial – DCTA, Instituto de Estudos Avançados – IEAv, São José dos Campos, SP, Brasil.

*Autor correspondente: danieli.reis@unifesp.br

E-mails: bianca.costa@unifesp.br; renata.takahashi@unifesp.br; luiz.felipe21@unifesp.br; lucas.lucas000@gmail.com; veravlob@fab.mil.br



1 Introdução

As ligas de titânio, em especial a Ti-6Al-4V, têm sido largamente utilizadas em aplicações aeroespaciais devido à combinação de elevada resistência mecânica, baixa densidade, boa resistência à corrosão e bom desempenho em temperaturas moderadamente elevadas [1-4]. Essa liga é classificada como uma liga de titânio $\alpha + \beta$ (bifásica), composta por fases com estruturas cristalinas hexagonal compacta (α , estabilizada por Al) e cúbica de corpo centrado (β , estabilizada por V), conferindo-lhe propriedades mecânicas fortemente influenciadas pela microestrutura e textura cristalográfica [5-7].

A liga Ti-6Al-4V apresenta desempenho satisfatório até cerca de 500 °C, entretanto, em temperaturas mais elevadas, seu uso passa a ser limitado devido à oxidação superficial e à difusão de elementos intersticiais (como oxigênio, nitrogênio e hidrogênio), que promovem endurecimento e fragilização do material [6,8]. Por isso, visando ampliar sua aplicação em ambientes térmicos mais severos, revestimentos conhecidos como barreiras térmicas (TBCs, do inglês *Thermal Barrier Coatings*) vêm sendo empregados. Estes revestimentos são compostos por uma camada metálica de ligação (geralmente MCrAlY, com M = Ni, Fe, Co ou uma combinação desses elementos), responsável pela adesão entre o substrato metálico e a camada superior; uma camada de óxido crescida termicamente (TGO, do inglês *Thermally Grown Oxide*), formada entre a camada metálica e a camada superior; e uma camada superior de zircônia parcialmente estabilizada com ítria (YSZ) [9-11]. Ao ser estabilizada com 6 a 8% em peso de ítria, a zircônia apresenta elevada estabilidade térmica, sendo apropriada para aplicações acima de 1000 °C, como é o caso das zonas quentes das turbinas de aeronaves [9].

Dessa forma, o desempenho mecânico das ligas de titânio a altas temperaturas depende não apenas das propriedades intrínsecas da liga, mas também é influenciado por fatores como difusão atômica, movimento de discordâncias, escorregamento de contornos de grão e recristalização dinâmica [12,13]. Ademais, mecanismos como esferoidização de fases e alinhamento de lamelas têm sido identificados como predominantes durante a deformação a quente dessas ligas [14-18].

O desempenho dos revestimentos cerâmicos está sujeito a desafios expressivos que requerem estudo adicional. A incompatibilidade nos coeficientes de expansão térmica (CTEs) entre as camadas e os gradientes térmicos impostos durante o serviço podem gerar tensões elevadas nas interfaces e em regiões próximas a trincas e defeitos, promovendo falhas como delaminação por encurvamento (*buckling*), destacamento (*spallation*) ou fraturas catastróficas [19,20]. Em particular, a falha dos sistemas com revestimento de barreira térmica (TBC) sob carregamento termomecânico é complexa, pois é influenciada pelo desajuste térmico, rugosidade da interface, fluência, sinterização e outros fatores [20]. Qian et al. [21] observaram, em análises do

comportamento à tração uniaxial de um sistema TBC aplicado por plasma, que as falhas evoluem em quatro estágios: iniciação de trincas transversais no *top coat*, multiplicação e saturação dessas trincas, propagação para o *bond coat* e, por fim, decoesão na interface entre o *bond coat* e substrato.

Apesar da existência na literatura de estudos abordando a deformação a quente da Ti-6Al-4V, há uma escassez de investigações experimentais atuais focadas na caracterização mecânica e nos mecanismos de fratura dessas ligas sob tração a quente, especialmente quando revestidas com TBCs. Diante disso, este trabalho visa avaliar as propriedades mecânicas da liga Ti-6Al-4V em três condições: (i) temperatura ambiente sem revestimento, (ii) temperaturas elevadas sem revestimento (500, 550 e 600 °C) e (iii) temperatura elevada (600 °C) com revestimento cerâmico térmico (TBC). Assim, espera-se promover uma discussão aprofundada dos mecanismos atuantes e da efetividade dos TBCs na preservação das propriedades mecânicas em altas temperaturas.

2 Materiais e métodos

A liga de Ti-6Al-4V sem recobrimento foi ensaiada por tração a temperatura ambiente (23 °C) e por tração a quente nas temperaturas de 500 °C, 550 °C e 600 °C, com velocidade do ensaio de 0,5 mm/min. Seguindo o mesmo procedimento, realizou-se o ensaio de tração a quente a 600 °C, condição mais severa investigada neste estudo, na liga de Ti-6Al-4V recoberta com TBC, sendo a camada cerâmica de 8YSZ (Metco 204NS-G) e a camada metálica de NiCrAlY (Amdry 962). A aplicação do recobrimento cerâmico foi realizada pela empresa brasileira Revesteel Metalização.

Os corpos de prova foram usinados conforme a norma ASTM E139 [22] e ilustrados na Figura 1. Por sua vez, o comprimento da seção útil e o diâmetro dos corpos de prova, medidos utilizando o paquímetro digital Mitutoyo 150 mm, estão listados na Tabela 1.

2.1 Ensaio de tração a quente

Para cada condição experimental, foi realizado um único ensaio de tração a quente. Os corpos de prova foram aquecidos até as temperaturas de ensaio (Tabela 1) a uma taxa de 10 °C/min antes da aplicação da carga, com variação permitida de temperatura para os ensaios de ± 2 °C.

Uma vez atingida a temperatura programada para o ensaio, a carga foi imediatamente aplicada e os corpos de prova foram ensaiados até o rompimento utilizando máquina Zwick/Roell, modelo Kappa DS, com 3 zonas de temperatura e sistema de controle e aquisição de dados por computador, através do *software* Test Xpert II. Por fim, os corpos de prova fraturados foram resfriados até a temperatura ambiente no interior do próprio forno.

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

| Identificação da amostra | Temperatura do ensaio (°C) | Comprimento da seção útil (mm) | Diâmetro inicial (mm) |
|--------------------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Sem revestimento | 23 | 18,09 | 3,03 |
| | 500 | 17,79 | 3,07 |
| | 550 | 17,81 | 3,05 |
| | 600 | 18,00 | 3,00 |
| Com revestimento | 600 | 17,20 | 3,93 |

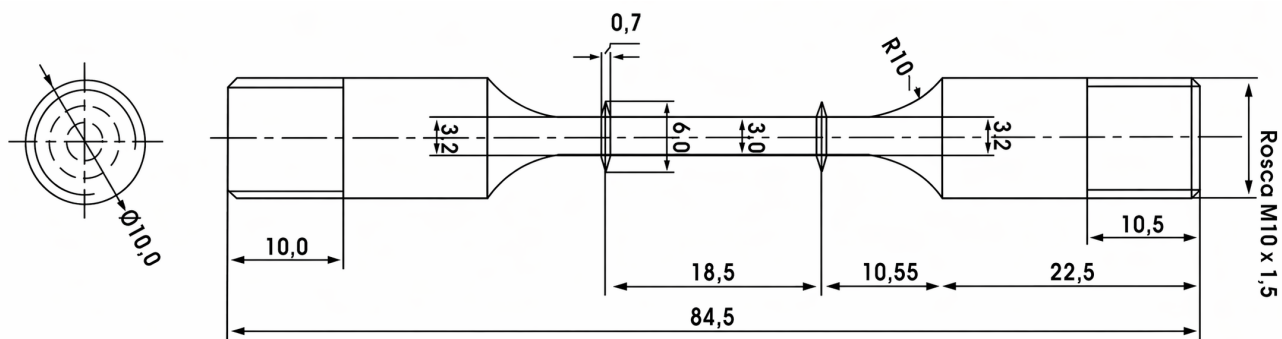


Figura 1. Configuração dos corpos de prova, com dimensões em mm.

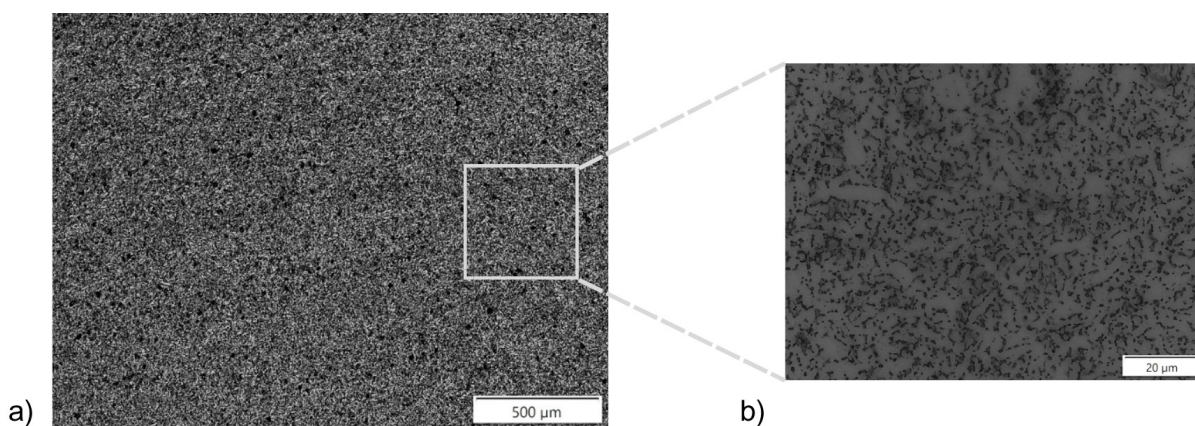


Figura 2. Microestrutura da seção transversal dos corpos de prova de Ti-6Al-4V sem revestimento, com (a) micrografia ampliada e (b) micrografia em maior magnificação.

2.2 Análise por microscopia óptica (MO)

Os corpos de prova com e sem revestimento cerâmico foram cortados na seção transversal na cortadeira de precisão (Minitom, Struers), com disco de diamante. Os parâmetros escolhidos para a rotação foram entre 150 rpm e 200 rpm e para a carga entre 250 N e 300 N. Em seguida, realizou-se o ataque químico com Kroll (3 mL de ácido fluorídrico, 6 mL de ácido nítrico e 100 mL de água). Para obter as micrografias, utilizou-se os microscópios ópticos Opton TNM-07T-PL e Zeiss Axio Imager a2M.

2.3 Análise fractográfica

As superfícies de fratura foram analisadas em estereomicroscópio Olympus SZ61, acoplado à lente

auxiliar Olympus 110AL2X, com auxílio do *software* LCMicro. Complementarmente, para os corpos de prova com revestimento cerâmico, realizou-se análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) no equipamento Tescan da série Vega3.

3 Resultados e discussão

3.1 Análise por microscopia óptica dos corpos de prova antes dos ensaios de tração a quente

A Figura 2 apresenta a micrografia da liga Ti-6Al-4V. Na Figura 2A, observa-se uma visão geral da distribuição das fases e uniformidade microestrutural. A microestrutura exibe uma matriz homogênea composta por fases típicas da

liga, onde se identifica a fase α (regiões claras) e a fase β (regiões escuras). Na Figura 2B observa-se uma microestrutura predominantemente equiaxial da fase α , distribuída em uma matriz contendo regiões da fase β , em concordância com microestruturas típicas reportadas para a liga Ti-6Al-4V em condição equiaxial [23,24].

A Figura 3 exibe a micrografia da seção transversal da amostra revestida com TBC. Sua análise permite verificar a integridade e a morfologia das camadas aplicadas. Observa-se a presença de porosidade e falhas na interface entre a camada metálica e o substrato (regiões escuras), aspectos críticos para a durabilidade do revestimento.

Nas Figuras 4a e 4b são apresentadas imagens utilizadas para a medição da espessura das camadas depositadas. As espessuras médias foram de $(463,49 \pm 16,87) \mu\text{m}$ para a camada cerâmica e de $(153,95 \pm 23,48) \mu\text{m}$ para a camada metálica. Esses resultados indicam que a camada cerâmica excedeu a faixa típica encontrada na literatura ($130\text{--}380 \mu\text{m}$) [25]. Essa

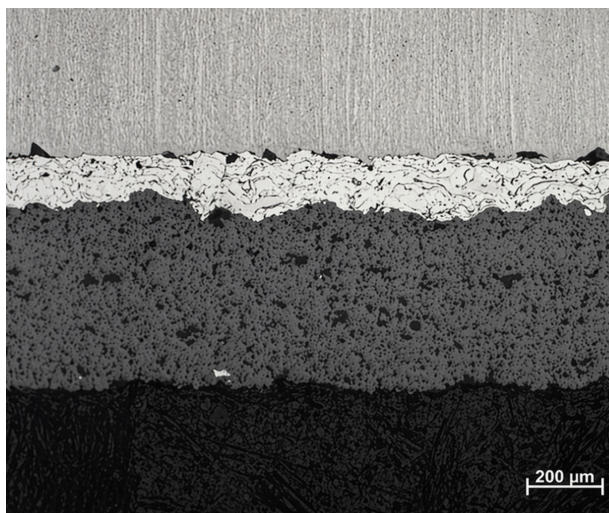


Figura 3. Micrografia da seção transversal do corpo de prova de Ti-6Al-4V com revestimento.

espessura ligeiramente maior foi escolhida para avaliar a resistência mecânica do revestimento e a proteção do substrato metálico sob sollicitações termomecânicas elevadas [26]. Camadas mais espessas podem intensificar as tensões residuais, inerentes ao processo de aspersão, geradas durante o rápido resfriamento das gotículas fundidas sobre o substrato frio. Isso resulta em tensões de tração responsáveis pela formação de microtrincas que comprometem a integridade do sistema [27].

3.2 Análise da liga de Ti-6Al-4V sem recobrimento após os ensaios de tração a quente

A Figura 5 apresenta as curvas tensão-deformação obtidas nos ensaios de tração a quente em corpos de prova sem recobrimento, nas temperaturas de $23 \text{ }^\circ\text{C}$, $500 \text{ }^\circ\text{C}$, $550 \text{ }^\circ\text{C}$ e $600 \text{ }^\circ\text{C}$.

As curvas obtidas estão em consonância com o modelo proposto por diversos autores que descreve o comportamento de escoamento de ligas de titânio em três estágios distintos durante a tração a quente: (I) estágio elástico, (II) estágio de amolecimento térmico e (III) estágio de estricção localizada [14]. Inicialmente, nota-se que a tensão (σ) aumenta linearmente com a deformação (ϵ) até atingir um valor máximo no estágio elástico. Em seguida, ocorre o amolecimento dinâmico, caracterizado por queda gradual da tensão devido à atuação de mecanismos como a recuperação e recristalização dinâmica ou à esferoidização da fase α [14–18]. Por fim, no terceiro estágio, verifica-se a estricção localizada, que leva à fratura final do corpo de prova [28].

Por sua vez, a Tabela 2 resume os principais parâmetros mecânicos extraídos do ensaio de tração a quente.

De acordo com os resultados, para a condição sem recobrimento, observou-se que o aumento da temperatura promoveu uma queda significativa nos valores de limite de escoamento (σ_y) e resistência à tração (σ_r), caracterizando o amolecimento térmico da liga. O σ_y diminuiu de 888 MPa a $23 \text{ }^\circ\text{C}$ para 343 MPa a $600 \text{ }^\circ\text{C}$, enquanto o σ_r reduziu de 907 MPa para 373 MPa na mesma faixa de temperatura. Em

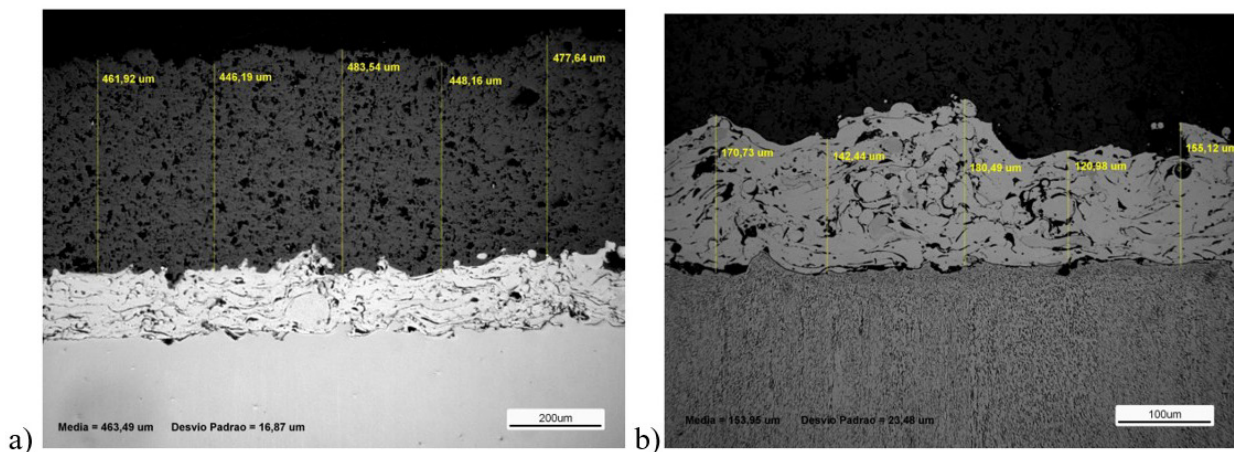


Figura 4. Medidas de espessura na (a) camada cerâmica e na (b) camada metálica da seção transversal dos corpos de prova de Ti-6Al-4V com revestimento.

contrapartida, a ductilidade da liga aumentou consideravelmente: o alongamento percentual (A_p) passou de 13% para 67%, e a redução em área (ϕ) de 30% para 85%, entre 23 °C e 600 °C.

O aumento da ductilidade é esperado para ligas de Ti-6Al-4V com microestrutura inicial equiaxial, especialmente em comparação com outras microestruturas. Conforme reportado por Lin et al. [29], ligas de Ti-6Al-4V com microestrutura lamelar espessa tendem a apresentar menor ductilidade, porém maior resistência mecânica em relação à estrutura equiaxial, evidenciando a importância da condição microestrutural inicial nos ensaios de tração a quente.

A morfologia das fraturas foi obtida utilizando um estereomicroscópio (Figura 6) e confirma a transição do modo de fratura com a elevação da temperatura, assim como a estrição localizada, típica do terceiro estágio da curva, que leva à fratura final do corpo de prova. A 23 °C (Figura 6a), a fratura apresenta morfologia relativamente menos rugosa e com menor estrição em comparação às temperaturas elevadas. No entanto, a redução em área de 30% evidencia que se trata de uma fratura de natureza dúctil, ainda que com deformação plástica limitada. Com o aumento da temperatura, especialmente a 500 °C e 550 °C (Figuras 6b e 6c, respectivamente), aparecem regiões com deformação plástica mais pronunciada. Por fim, a 600 °C (Figura 6d), a fratura assume caráter claramente dúctil, com grandes áreas de estrição (comprovado pelo aumento

da redução em área de 85%). A evolução do mecanismo de fratura observado com o aumento da temperatura ocorre porque temperaturas mais elevadas e menores taxas de deformação fornecem força motriz e tempo suficientes para a acumulação de energia e o deslizamento de discordâncias, reforçando a ação dos mecanismos inelásticos termicamente ativados [14,29].

Além disso, verificou-se uma mudança visual nos corpos de prova após o ensaio, com a coloração superficial evoluindo de tons metálicos para azulados e arroxeados com o aumento da temperatura, sugerindo a formação progressiva de camadas de óxidos. Esses efeitos muito provavelmente estão associados ao crescimento de TiO_2 [5,6]. A avaliação dos óxidos formados pode trazer informações valiosas para o estudo da durabilidade das ligas, dado que complementa a análise do comportamento térmico da liga pelo fato da oxidação poder influenciar tanto as propriedades mecânicas quanto a superfície de fratura.

3.3 Análise da liga de Ti-6Al-4V com recobrimento após os ensaios de tração a quente

A Figura 7 apresenta a curva tensão-deformação obtida nos ensaios de tração a quente em corpos de prova com e sem recobrimento a 600 °C. No corpo de prova revestido, a tensão de engenharia foi calculada considerando a seção transversal total, incluindo a espessura do TBC.

O ensaio de tração a quente realizado no corpo de prova com revestimento cerâmico a 600 °C revelou alterações importantes no comportamento mecânico da liga. Embora os valores de σ_y (232 MPa) e σ_r (234 MPa) tenham sido inferiores aos observados para o corpo sem revestimento na mesma temperatura (343 MPa e 373 MPa, respectivamente - dados apresentados na Tabela 2), a ductilidade manteve-se elevada, com A_p de 70% e ϕ de 89%.

A redução da resistência pode estar relacionada à introdução de descontinuidades interfaciais durante a aplicação do revestimento, além da possível concentração de tensões na região da interface TBC-substrato que podem estar associadas com o aumento da espessura da camada cerâmica [27]. Ademais, é importante considerar que o próprio processo de deposição do revestimento cerâmico pode influenciar o comportamento mecânico do substrato metálico.

O jateamento abrasivo, etapa prévia à aspersão por plasma atmosférico, pode induzir deformação plástica superficial e tensões residuais no substrato, especialmente em ligas de titânio, como evidenciado nos estudos de Ghara et al. [30].

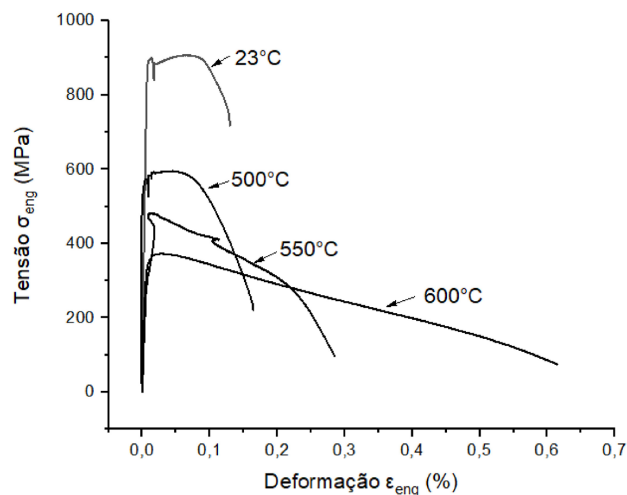


Figura 5. Curva de tensão (MPa) em função da deformação (%) após os ensaios de tração a quente nos corpos de prova de Ti-6Al-4V sem revestimento.

Tabela 2. Propriedades mecânicas medidas após a realização do ensaio de tração a quente nos corpos de prova de Ti-6Al-4V sem e sem revestimento de barreira térmica

| Condição do corpo de prova | Temperatura do ensaio (°C) | σ_y (MPa) | σ_r (MPa) | A_p (%) | ϕ (%) |
|----------------------------|----------------------------|------------------|------------------|-----------|------------|
| Sem revestimento | 23 | 888 | 907 | 13 | 30 |
| | 500 | 573 | 595 | 19 | 62 |
| | 550 | 477 | 481 | 31 | 42 |
| | 600 | 343 | 373 | 67 | 85 |
| Com revestimento | 600 | 232 | 234 | 70 | 89 |

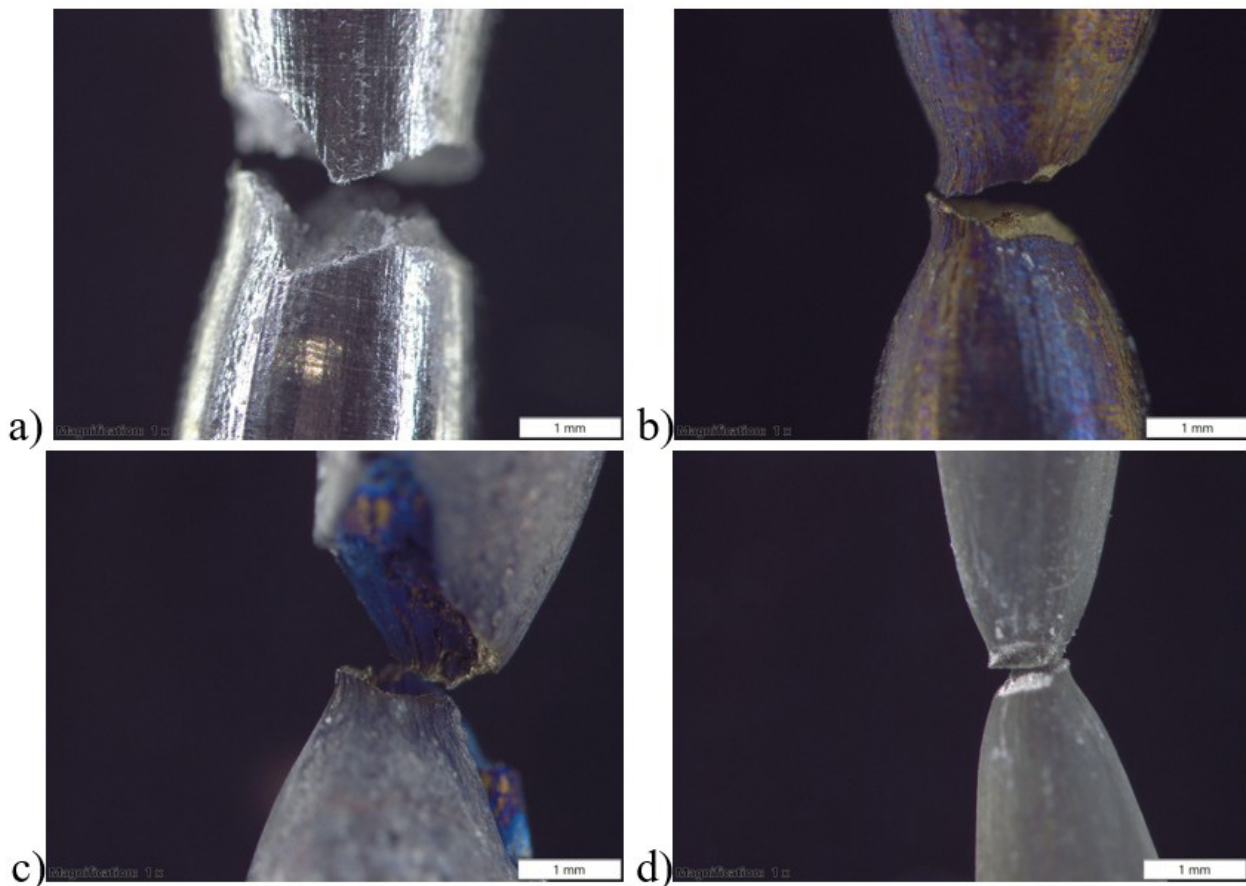


Figura 6. Imagens obtidas por estereomicroscópio das superfícies fraturadas dos corpos de prova de Ti-6Al-4V sem revestimento após os ensaios de tração nas temperaturas de (a) 23 °C, (b) 500 °C, (c) 550 °C e (d) 600 °C.

A superposição desses efeitos com os elevados gradientes térmicos do processo e com a espessura do revestimento pode resultar em estados tensionais complexos na interface revestimento/substrato. Isso os torna particularmente críticos em temperaturas mais elevadas, como 600 °C, contribuindo para a redução acentuada da resistência mecânica. Nesse contexto, estratégias microestruturais como o controle da porosidade [31] ou a introdução de trincas superficiais segmentadas [32] foram reportadas na literatura como eficazes para aliviar essas tensões acumuladas. Assim, a queda de resistência mecânica verificada não deve ser interpretada apenas como fragilização, mas como resultado da interação entre preparação superficial, deposição por APS e características microestruturais do revestimento. Apesar disso, o revestimento não comprometeu a capacidade de deformação da liga, demonstrando seu potencial como mitigador de efeitos de fragilização por oxidação, especialmente em ambientes operacionais severos.

As imagens de fratura (Figura 8b e 8c) obtidas pelo MEV, indicam que corpo revestido apresenta uma superfície complexa, com indícios de descontinuidades e trincas localizadas na interface entre o revestimento e o substrato. Observam-se evidências que indicam a natureza dúctil da fratura, como a presença de *dimples* (microcavidades originadas pelo processo de

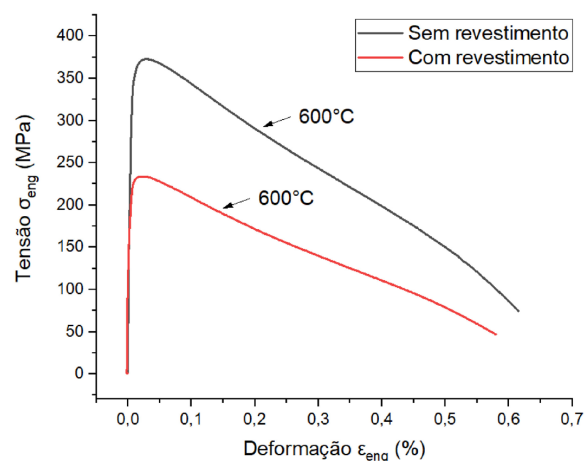


Figura 7. Curva de tensão (MPa) em função da deformação (%) após os ensaios de tração a quente a 600 °C nos corpos de prova de Ti-6Al-4V sem e com revestimento.

nucleação, crescimento e coalescência de microvazios) distribuídos em diferentes tamanhos e formas. Ademais, a análise com elétrons secundários (SE) evidencia regiões rugosas associadas à deformação plástica localizada reforçando a natureza dúctil

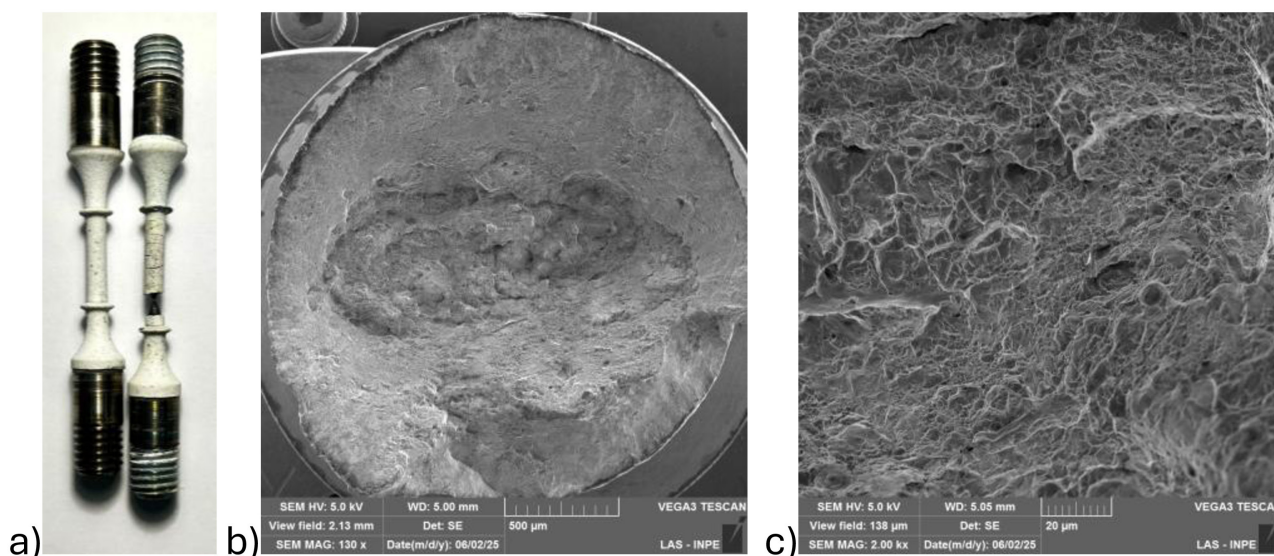


Figura 8. (a) Comparação do CPD de Ti-6Al-4V revestido com TBC antes e após o ensaio de tração a 600 °C; microscopia eletrônica de varredura da superfície da fratura com (b) visão geral e (c) detalhes em maior magnificação.

da fratura. Por outro lado, não se verificou fratura completa do revestimento (Figura 8a), dado que a interface revestimento/substrato permaneceu parcialmente íntegra, sugerindo que a falha ocorreu predominantemente no substrato metálico. Esses sinais reforçam os desafios associados à compatibilidade térmica e integridade interfacial, especialmente em condições de gradiente térmico elevado e espessuras acima do ideal [19-22].

4 Conclusões

O presente trabalho investigou o comportamento mecânico da liga Ti-6Al-4V em diferentes condições térmicas (23 °C, 500 °C, 550 °C e 600 °C), com e sem aplicação de revestimento cerâmico, com foco na avaliação mecânica e fractográfica. Pelos resultados obtidos, conclui-se que:

- O aumento da temperatura promove queda significativa nos valores de limite de escoamento e resistência à tração;
- O aumento da temperatura gera um aumento expressivo da ductilidade, podendo estar atrelado, de acordo com a literatura, a mecanismos atuantes na liga, tais como esferoidização da fase α , escorregamento de contornos de grão e recristalização dinâmica;
- A microestrutura equiaxial inicial da liga contribui para o bom desempenho mecânico observado em

altas temperaturas, em concordância com estudos reportados na literatura para a liga Ti-6Al-4V;

- A análise fractográfica confirmou a evolução da fratura de um perfil moderadamente dúctil a 23 °C para um comportamento claramente dúctil a 600 °C;
- A presença de coloração superficial azulada e arroxeadada sugere a formação de camadas de óxidos de titânio em temperaturas elevadas;
- O revestimento cerâmico sobre a liga de Ti-6Al-4V manteve a ductilidade em elevadas temperaturas, mesmo com redução dos valores de resistência;
- Trincas e discontinuidades no TBC podem estar associados a camadas espessas.

Dessa maneira, os resultados ressaltam o potencial do TBC como estratégia de mitigação da degradação térmica, com manutenção da ductilidade em altas temperaturas, porém à custa de perda significativa de resistência mecânica, o que exige controle rigoroso da espessura da camada e da integridade da interface.

Agradecimentos

CNPq, Capes, FINEP, FAPESP e Revesteel Metalização.

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. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(88\)90246-5](https://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. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00302-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00302-6).
- 3 Evans RW, Wilshire B. *Introduction to Creep*. London: The Institute of Materials; 1993.
- 4 Jesuíno GA, Santos EM, Silva MR. Propriedades mecânicas e resistência à corrosão da liga Ti-4Al-4V obtida da reciclagem da liga Ti-6Al-4V. *Materials Research*. 2001;4(2):63-69. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392001000200004>.
- 5 Bhattacharjee A, Saha B, Williams JC. Titanium alloys: part 1—physical metallurgy and processing. In: Srivatsan TS, Sudarshan TS, editors. *Aerospace materials and material technologies: volume 1: aerospace materials*. Singapore: Springer Singapore; 2016. p. 91-115.
- 6 Welsch G, Kahveci AI. Oxidation of high-temperature intermetallics. In: Grobstein T, Doychak J, editors. *Oxidation of high-temperature intermetallics*. Warrendale: PA: The Metallurgical Society Inc.; 1988. p. 167-174.
- 7 Briguente LANS, Couto AA, Barboza MJR. Determination of creep parameters of Ti-6Al-4V with bimodal and equiaxed microstructure. In: *Diffusion in Solids and Liquids VII*; 2011; Aveiro, Portugal. Stafa-Zurich: Trans Tech Publications Ltd; 2012. p. 520-528.
- 8 Reis DAP, Moura Neto C, Silva CRM, Barboza MJR, Piorino Neto F, 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. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.09.024>.
- 9 Takahashi RJ, Assis JMK, Piorino Neto F, Reis DAP. Thermal conductivity study of ZrO₂-YO_{1,5}-NbO_{2,5} TBC. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;19:4932-4938. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.037>.
- 10 Limar CRC. Revestimentos para barreira térmica: evolução e perspectivas. *Soldagem e Inspeção*. 2014;19(4):353-363. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI1904.11>.
- 11 Park JH, Kim JS, Lee KH, Song YS, Kang MCK. Effects of the laser treatment and thermal oxidation behavior of CoNiCrAlY/ZrO₂-8 wt% Y₂O₃ thermal barrier coating. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;201(1-3): 331-335. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.192>.
- 12 Martins JCA. Instalação de forno na máquina de ensaio de tração do laboratório h005 e validação do ensaio de tração à quente no material Al T6-6351 [Trabalho de Conclusão de Curso]. Pato Branco: Universidade Tecnológica Federal do Paraná; 2018.
- 13 Oliveira AC, Oliveira RM, Reis DAP, Carreri FC. Effect of nitrogen high temperature plasma based ion implantation on the creep behavior of Ti-6Al-4V alloy. *Applied Surface Science*. 2014;311:239-244. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.05.047>.
- 14 Jiang Y-Q, Lin YC, Jiang X-Y, He D-G, Zhang X-Y, Kotkunde N. Hot tensile properties, microstructure evolution and fracture mechanisms of Ti-6Al-4V alloy with initial coarse equiaxed phases. *Materials Characterization*. 2020;163:110272. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110272>.
- 15 Ji H, Peng Z, Huang X, Wang B, Xiao W, Wang S. Characterization of the Microstructures and Dynamic Recrystallization Behavior of Ti6Al4V Titanium Alloy through Experiments and Simulations. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021;30(11):8257-8275. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06044-0>.
- 16 Xia YF, Long S, Zhou YT, Zhao J, Wang TY, Zhou J. Identification for the optimal working parameters of Ti-6Al-4V-0.1Ru alloy in a wide deformation condition range by processing maps based on DMM. *Materials Research*. 2016;19(6):1449-1460. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-0448>.
- 17 Tan K, Li J, Guan ZJ, Yang JB, Shu JX. The identification of dynamic recrystallization and constitutive modeling during hot deformation of Ti55511 titanium alloy. *Materials & Design*. 2015;84:204-211. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.093>.
- 18 Ghasemi E, Zarei-Hanzaki A, Farabi E, Tesař K, Jäger A, Rezaee M. Flow softening and dynamic recrystallization behavior of BT9 titanium alloy: a study using process map development. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017;695:1706-1718. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.10.322>.
- 19 Zhou YC, Mai YW, Yu TX, Zhang XP. Fracture characteristics of thermal barrier coatings after tensile and bending tests. *Surface and Coatings Technology*. 2002;157(2-3):118-127. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00154-8](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00154-8).

- 20 Mao WG, Dai CY, Yang L, Zhou YC. Interfacial fracture characteristic and crack propagation of thermal barrier coatings under tensile conditions at elevated temperatures. *International Journal of Fracture*. 2008;151(2):107-120. <https://doi.org/10.1007/s10704-008-9246-y>.
- 21 Qian L, Zhu S, Kagawa Y, Kubo T. Tensile damage evolution behavior in plasma-sprayed thermal barrier coating system. *Surface and Coatings Technology*. 2003;173(2-3):178-184. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(03\)00429-8](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00429-8).
- 22 ASTM International. ASTM E139: Standard test methods for conducting creep, creep-rupture, and stress-rupture tests of metallic materials. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2018. <https://doi.org/10.1520/E0139-11R18>.
- 23 Hutchinson JW, Suo Z. Mixed mode cracking in layered materials. *Advances in Applied Mechanics*. 1992;29:63-191. [https://doi.org/10.1016/S0065-2156\(08\)70164-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2156(08)70164-9).
- 24 Welsch G, Boyer R, Collings EW, editors. *Materials properties handbook: titanium alloys*. Materials Park (OH): ASM International; 1993.
- 25 Gonçalves FAR, Takahashi RJ, Reis DAP. Estudo do tratamento de oxidação em diferentes microestruturas da liga de titânio. *Tecnologica em Metalurgia, Materiais e Mineração*. 2021;18:e2125. <https://doi.org/10.4322/2176-1523.20212125>.
- 26 Nass KCF, Radi PA, Leite DMG, Vieira L, Reis DAP. Tribomechanical and structural properties of a-SiC:H films deposited using liquid precursors on titanium alloy. *Surface and Coatings Technology*. 2015;284:240-246. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.06.080>.
- 27 Hardwicke CU, Lau YC. *Advances in Thermal Spray Coatings for Gas Turbines and Energy Generation: A Review*. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2013;22(5):564-576. <https://doi.org/10.1007/s11666-013-9904-0>.
- 28 Zhang J, Desai V. Evaluation of thickness, porosity and pore shape of plasma sprayed TBC by electrochemical impedance spectroscopy. *Surface and Coatings Technology*. 2005;190(1):98-109. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.06.019>.
- 29 Lin YC, Wu Q, Pang GD, Jiang XY, He DG. Hot tensile deformation mechanism and dynamic softening behavior of Ti-6Al-4V alloy with thick lamellar microstructures. *Advanced Engineering Materials*. 2020;22(3):e1901193. <https://doi.org/10.1002/adem.201901193>.
- 30 Ghara T, Paul S, Bandyopadhyay PP. Effect of grit blasting parameters on surface and near-surface properties of different metal alloys. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2021;30(1-2):251-269. <https://doi.org/10.1007/s11666-020-01127-1>.
- 31 Man Y, Hua C, Huang T, Yin G, Ma T, Zhuang Y, et al. Positive effect of large porosity in super-thick thermal barrier coatings on thermal shock resistance and failure mechanisms. *Journal of Alloys and Compounds*. 2025;1017:178792. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.178792>.
- 32 Yang L, Chen Y, Li D, Jiang P. Mechanisms governing the enhanced strain tolerance of segmented APS-TBCs. *Materials & Design*. 2025;253:113877. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.113877>.

Recebido em: 22 Out. 2025

Aceito em: 23 Mar. 2026

Editor responsável:

Sabrina Arcaro 