Investigação dos Efeitos de Tratamentos Térmicos sobre Compósitos Ti-β (42%Nb) + B4C desenvolvidos pelo Processo de Manufatura Aditiva via Fusão em Leito de Pó

Palavras-Chave: Tratamentos Térmicos, Manufatura aditiva, Microestrutura.

Autores(as):

ISABELLA CHIAROTTI MASSAFELLI, FCA - UNICAMP

Prof. Dr. RODRIGO JOSÉ CONTIERI (orientador), FCA - UNICAMP

INTRODUÇÃO:

As ligas de titânio beta (Ti-β) apresentam uma combinação de elevada resistência mecânica, baixa densidade e excelente resistência à corrosão, o que as tornam particularmente relevantes para aplicações aeroespaciais e biomédicas. No entanto, diversos fatores podem influenciar diretamente o desempenho final dessas ligas, entre os quais se destacam a composição química, os tratamentos térmicos aplicados e a rota de processamento, os quais podem modificar significativamente a microestrutura e, como consequência, as propriedades do material fabricado.

Com o avanço da Manufatura Aditiva (MA), estão surgindo novas possibilidades para a produção de ligas de titânio com geometrias mais complexas e maior controle microestrutural. A técnica de Fusão a Laser em Leito de Pó (Laser Powder Bed Fusion – L-PBF) tem destaque entre os métodos de MA, por permitir a fabricação direta, camada por camada, a partir de modelos tridimensionais, com elevado grau de precisão. Apesar disso, ainda existem limitações quanto à produção de ligas não convencionais, como as Ti-Nb com altos teores de nióbio. Nesse cenário, o uso de misturas de pós elementares tem se mostrado uma solução viável e com bons resultados, tanto sob o ponto de vista técnico quanto econômico. [1-3]

Entre as ligas Ti-Nb, aquelas com cerca de 42% de nióbio (Nb), têm se mostrado promissoras e se destacado por suas propriedades mecânicas superiores, como menor módulo de elasticidade, maior resistência à corrosão e maior dureza, quando comparadas ao titânio comercialmente puro (Ti-cp) e à tradicional liga Ti-6Al-4V. [4-8]. Além disso, a adição de reforços cerâmicos, como o carbeto de boro (B4C), surge como uma estratégia promissora para potencializar ainda mais as propriedades mecânicas dessas ligas, especialmente em relação à dureza e à resistência ao desgaste.

Apesar do grande potencial, o comportamento de ligas Ti-β com 42% de Nb em processos de manufatura aditiva permanece pouco explorado, devido aos desafios associados à preparação adequada dos pós e à definição precisa dos parâmetros de processamento. Além disso, incorporação de reforços cerâmicos, por sua vez, gera novos desafios ao controle microestrutural, exigindo um ajuste mais criterioso de variáveis como potência do laser e velocidade de varredura aplicada durante a fabricação.

METODOLOGIA:

A fabricação dos compósitos de Ti-β (42%Nb) + B4C foi realizada por meio da técnica de manufatura aditiva Fusão a Laser em Leito de Pó, em atmosfera controlada. Os parâmetros de processamento aplicados foram baseados em revisão bibliográfica e em estudos preliminares conduzidos pelo grupo de pesquisa, considerando tanto as limitações do equipamento quanto a viabilidade técnica da incorporação do reforço cerâmico. Foram produzidas nove amostras distintas, totalizando 27 corpos de prova. As variáveis experimentais incluíram três teores de B4C (0,5%, 1,0% e 1,5%), três níveis de potência do laser (100 W, 200 W e 300 W) e três velocidades de varredura (500 mm/s, 700 mm/s e 900 mm/s), conforme indicado na Tabela 1. Essa abordagem permitiu a criação de um gradiente controlado de reforço cerâmico, essencial para analisar o efeito dos parâmetros de processamento sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas dos compósitos produzidos.

Tabela 1. Composição nominal e parâmetros impostos nas amostras de compósitos.

Amostra	B4C (%)	Potência (w)	Velocidade (mm/s)
1	0,5 1,0 1,5	100	500
2			700
3			900
4		200	500
5			700
6			900
7		300	500
8			700
9			900

Após a fabricação, as amostras foram cortadas longitudinalmente e preparadas para observação microestrutural por microscopia óptica, utilizando lentes com aumentos de 5X, 10X, 20X e 50X. Neste primeiro momento, as análises estão focadas nas amostras no estado como-fabricado, visando avaliar a microestrutura de cada seção.

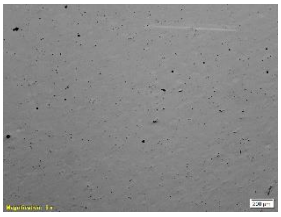
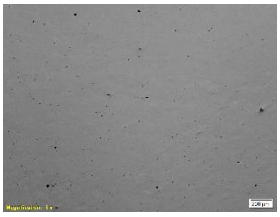
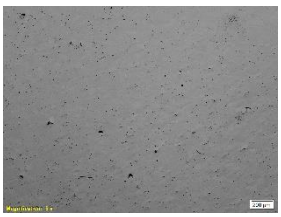
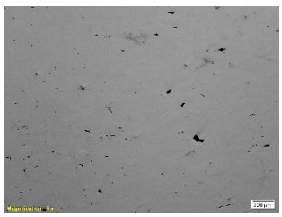
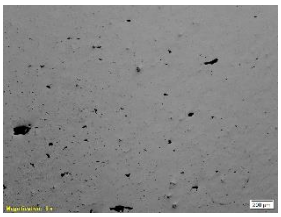
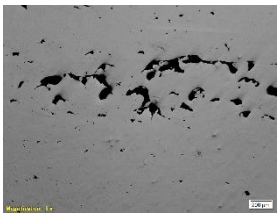
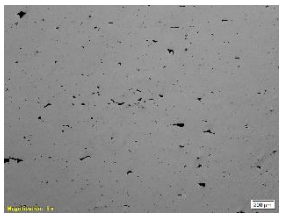
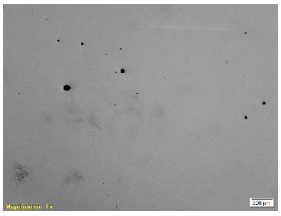
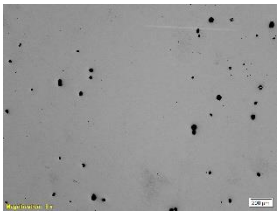
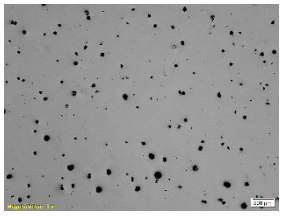
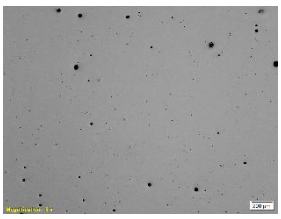
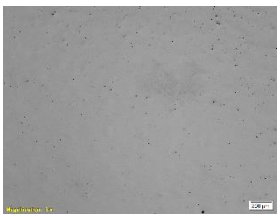
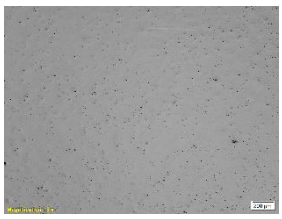
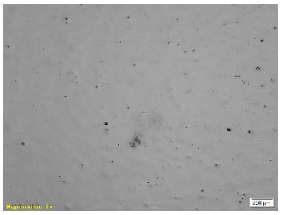
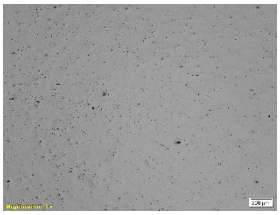
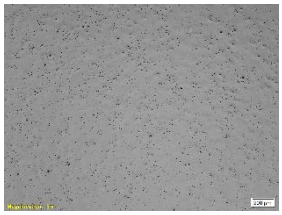
As próximas etapas do estudo incluem o tratamento térmico das amostras, que ainda não foi realizado, mas já teve seus parâmetros definidos com base no estudo de Kanapaakala et al. (2022). O procedimento consistirá em uma etapa de solubilização a 900 °C durante 2 horas, seguida de resfriamento rápido em água. O objetivo do tratamento é a dissolução homogênea da fase β, estabilizar a microestrutura e melhorar o desempenho mecânico do compósito, ja as condições aplicadas visam manter o refino de grãos, evitar a formação de fases indesejadas e garantir propriedades como baixo módulo de elasticidade, alta ductilidade e resistência à corrosão.

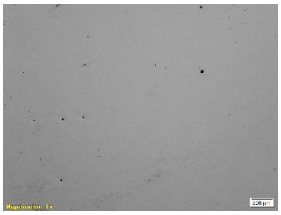
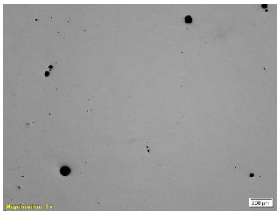
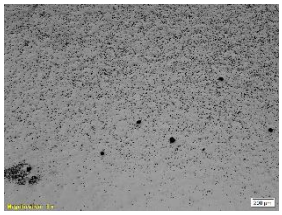
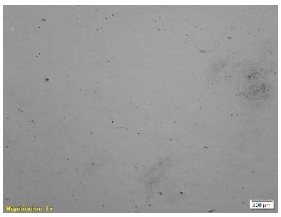
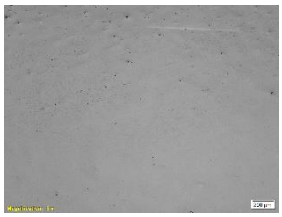
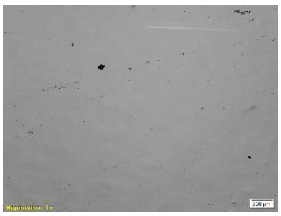
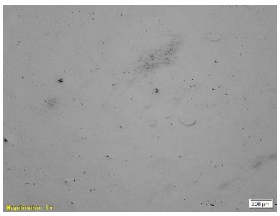
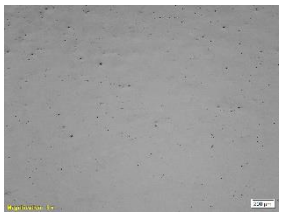
Por fim, as propriedades mecânicas das amostras, serão avaliadas por meio de ensaios de microdureza e nanodureza, além de medições do módulo de elasticidade. Com essas análises, será possível correlacionar as características microestruturais com o desempenho mecânico dos materiais.

ANÁLISE E DISCUSSÃO:

As imagens obtidas, por meio do microscópio óptico, presentes na Tabela 2, evidenciaram variações entre as amostras, especialmente quanto à ocorrência de defeitos, como poros e descontinuidades.

Tabela 2 – Exemplo dos resultados de Microscopia Óptica das amostras de (Ti-42Nb) – B4C com ampliação 5X.

Volume/Região de B4C	0,5%	1,0%	1,5%
Amostra 1 100 W - 500 mm/s			
Amostra 2 100 W - 700 mm/s			
Amostra 3 100 W - 900 mm/s			
Amostra 4 200 W - 500 mm/s			
Amostra 5 200 W - 700 mm/s			
Amostra 6 200 W - 900 mm/s			

Amostra 7 300 W - 500 mm/s			
Amostra 8 300 W - 700 mm/s			
Amostra 9 300 W - 900 mm/s			

A análise das imagens indicou que o aumento da velocidade de varredura intensifica a formação de poros, sobretudo em amostras com maior teor de B_4C. Em contrapartida, amostras processadas com menor velocidade e menor adição de B_4C apresentaram superfícies mais uniformes e com menor incidência de poros. Esse comportamento provavelmente está relacionado ao fato de que, em velocidades mais elevadas, o laser não consegue fundir completamente a matriz, favorecendo a formação de pequenos defeitos.

Por se tratar de uma pesquisa em andamento, o tratamento térmico ainda será executado. Está prevista a realização de uma etapa de solubilização (ST), seguida de resfriamento rápido em água (WC) e, posteriormente, envelhecimento térmico (STA), com o objetivo de estabilizar a fase β e refinar a microestrutura. Espera-se que esse processo contribua para reduzir tensões residuais, redistribuir de forma homogênea as partículas cerâmicas e aprimorar as propriedades mecânicas, especialmente dureza e módulo de elasticidade.

Os resultados esperados deverão ampliar a compreensão dos efeitos combinados da manufatura aditiva e dos tratamentos térmicos na produção de compósitos de titânio reforçados, fortalecendo o potencial desses materiais para aplicações em setores que exigem componentes leves, duráveis e de alto desempenho.

CONCLUSÕES

A análise microestrutural indicou que parâmetros de processamento, em especial a velocidade de varredura e o teor de B_4C, influenciam diretamente a formação de poros nos compósitos de titânio produzidos por manufatura aditiva. Velocidades mais elevadas resultaram em maior incidência de poros, principalmente em amostras com maior teor de B_4C, enquanto velocidades mais baixas e menor adição de reforço favoreceram a obtenção de superfícies mais uniformes e com menos defeitos.

O tratamento térmico planejado — composto por solubilização (ST), resfriamento rápido em água (WC) e envelhecimento térmico (STA) — deverá contribuir para a estabilização da fase β, o refino microestrutural e a redistribuição homogênea das partículas cerâmicas. A expectativa é de que esses ajustes promovam a redução de tensões residuais e a melhoria das propriedades mecânicas, especialmente dureza e módulo de elasticidade.

Os resultados previstos têm potencial para ampliar o conhecimento sobre a relação entre parâmetros de manufatura aditiva e tratamento térmico, fortalecendo o uso de compósitos de titânio reforçados em aplicações que demandam leveza, durabilidade e alto desempenho.

BIBLIOGRAFIA:

[1] M. Eriksson, D. Salamon, M. Nygren, Z. Shen. Mater. Sci. Eng. A. 475, 101–104 (2008).

[2] B. Zhang, J. Chen, C. Coddet. J. Mater. Sci. Technol., 29 (9) (2013), pp. 863-867.

[3] H. Pan, T. Sparks, Y.D. Thakar, F. Liou, J. Manuf. Sci. Eng., 128 (2) (2006), pp. 541-5534. M. Sabeena, S. Murugesan, R. Mythili, A.K. Sinha, M.N. Singh, M. Vijayalakshmi, S.K. Deb Trans. Indian Inst. Met., 68 (2015), pp. 1-6

[4] Zhang Y, Sun D, Cheng J, Tsoi JKH, Chen J. Mechanical and biological properties of Ti-(0-25 wt%)Nb alloys for biomedical implants application. Regen Biomater. 2020;7(1):119-27 http://dx.doi.org/10.1093/rb/rbz042.

[5] Bai Y, Deng Y, Zheng Y, Li Y, Zhang R, Lv Y, et al. Characterization, corrosion behavior, cellular response and in vivo bone tissue compatibility of titanium-niobium alloy with low Young's modulus. Mater Sci Eng C Mater Biol Appl. 2016;59:565-76 http://dx.doi.org/10.1016/j.msec.2015.10.062.

[6] Martins GV, Silva CRM, Nunes CA, Trava-Airoldi VJ, Borges LA, Machado JPB. Beta Ti-45Nb and Ti-50Nb alloys produced by powder metallurgy for aerospace application. Mater Sci Forum. 2010;660-661:405-9 http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.660-661.405

[7] Kaseem M, Choe HC. Electrochemical and bioactive characteristics of the porous surface formed on Ti-xNb alloys via plasma electrolytic oxidation. Surf Coat Tech. 2019;378:125027. http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125027

[8] Bönisch M, Calin M, Van Humbeeck J, Skrotzki W, Eckert J. Factors influencing the elastic moduli, reversible strains and hysteresis loops in martensitic Ti-Nb alloys. Mater Sci Eng C Mater Biol Appl. 2015;48:511-20. http://dx.doi.org/10.1016/j.msec.2014.12.048 PMid:25579952.

[9] KANAPAAKALA, Gouthamaraj; SUBRAMANI, Venkatesan. A review on β-Ti alloys for biomedical applications: The influence of alloy composition and thermomechanical processing on mechanical properties, phase composition, and microstructure. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, v. 237, n. 6, p. 1251-1294, 2023.