

## Preparação e caracterização de uma liga de titânio com a adição de tântalo e zircônio para aplicações biomédicas

### Preparation and characterization of a titanium alloy with the addition of tantalum and zirconium for biomedical applications

Pedro Akira Bazaglia Kuroda<sup>1</sup>, Mycaella Vieira do Nascimento<sup>2</sup>,  
Carlos Roberto Grandini<sup>1</sup>

<sup>1</sup> UNESP – Univ. Estadual Paulista, Laboratório de Anelasticidade e Biomateriais, 17.033.360, Bauru, SP, Brasil.

<sup>2</sup> IBTN-Br, Braço Brasileiro do Institute of Biomaterials, Tribocorrosion and Nanomedicine, 17.033.360, Bauru, SP, Brasil.

e-mail: pedro.kuroda@unesp.br, mycaellanasascimento@gmail.com, carlos.r.grandini@unesp.br

#### RESUMO

Ligas de titânio são amplamente utilizadas na área biomédica devido à sua excelente resistência à corrosão em fluidos corpóreos, elevada razão resistência mecânica/densidade, baixo módulo de elasticidade e comprovada biocompatibilidade. As ligas mais promissoras para serem utilizadas na área biomédica possuem elementos em solução sólida que diminuem a temperatura de transformação de fase do titânio. Tais elementos são denominados beta-estabilizadores e obtêm-se como resultado a diminuição do módulo de elasticidade e uma excelente resistência à corrosão. Os elementos tântalo e zircônio, quando acrescentados ao titânio, melhoram a resistência à corrosão e diminuem o módulo de elasticidade, pois o tântalo é considerado um elemento  $\beta$ -estabilizador e o zircônio atua como elemento estabilizador desta fase, na presença de outro elemento  $\beta$ -estabilizador. Neste trabalho, a liga Ti-25Ta-5Zr foi preparada por fusão à arco, visando aplicações biomédicas. As caracterizações química, estrutural, microestrutural e mecânica foram realizadas por intermédio de medidas da composição química, análise de gases, espectrometria por dispersão de energia (EDS), difração de raios X, microscopias óptica e eletrônica de varredura, microdureza Vickers e módulo de elasticidade. Os resultados obtidos mostraram uma boa estequiometria e homogeneidade da liga. As análises estrutural e microestrutural corroboraram entre si e indicaram que a liga possui a coexistência de duas fases,  $\alpha$  (com estrutura cristalina ortorrômbica) e  $\beta$  (com estrutura cristalina cúbica de corpo centrado). A microdureza elevou-se com a adição de tais elementos e o módulo de elasticidade possui valores abaixo das ligas utilizadas comercialmente, satisfatório para aplicação como implante ortopédico.

**Palavras-chave:** Biomateriais, Ligas de titânio, Microestrutura.

#### ABSTRACT

Titanium alloys are widely used in the biomedical field due to its excellent corrosion resistance in bodily fluids, high mechanical strength/density ratio, low elastic modulus and good biocompatibility. The most promising alloys to be used in the biomedical field have solid solution elements that decrease the phase transformation temperature of titanium. Such elements are called beta-stabilizers and are obtained as a result of their introduction in the alloy, the decrease of the elastic modulus and an excellent corrosion resistance. Tantalum and zirconium elements, when added to the titanium, improve the corrosion resistance and diminish the elastic modulus, because tantalum is considered a  $\beta$ -stabilizer element and the zirconium acts as a stabilizing element of this phase, in presence of another  $\beta$ -stabilizer element. In this paper, Ti-25Ta-5Zr alloy was prepared by arc-melting, aiming biomedical applications. The chemical, structural, microstructural and mechanical characterizations were performed by means of chemical composition measurements, gas analysis, energy dispersive spectrometry (EDS), X-ray diffraction, optical and scanning electron microscopies, Vickers microhardness and elastic modulus. The obtained results showed a good stoichiometry and homogeneity of the samples. Structural and microstructural analyses corroborated each other and indicated that the alloy has the coexistence of two phases,  $\alpha$  (with orthorhombic crystalline structure) and  $\beta$  (with body-centered cubic

structure). The microhardness increased with the addition of such elements and the elastic modulus has values below the commercially used alloys, satisfactory for application as orthopedic implant.

**Keywords:** Biomaterials, Titanium alloys, Microstructure.

## 1. INTRODUÇÃO

Ligas de titânio tem sido muito utilizadas com sucesso na área biomédica desde os anos 40 do século passado [1,2]. Porém, estudos recentes mostram alguns efeitos citotóxicos de alguns elementos em longo prazo, em especial o alumínio e o vanádio, que tem sido associados com desordens neurológicas [3,4]. Outro problema está associado com a grande diferença entre os módulos de elasticidade das ligas utilizadas comercialmente (em torno de 100 GPa) e do osso cortical (em torno de 30 GPa) [5]. Esta diferença faz com que todos os esforços mecânicos sejam absorvidos pelo material implantado, causando efeitos de reabsorção óssea [6]. Assim, intensa investigação e desenvolvimento de ligas metálicas estão sendo realizadas em todo o campo biomédico, com o objetivo de encontrar novas ligas de titânio que possuam módulo de elasticidade cada vez mais próximo do osso, ótima resistência à corrosão e excelente biocompatibilidade [7,8].

Na linha de ligas binárias vantajosas para aplicação biomédica, destacam-se as ligas do sistema Ti-Ta, com o teor de tântalo variando de 20 a 30 % em peso [9]. A microestrutura das ligas Ti-Ta é influenciada pela quantidade de tântalo presente na sua composição. Para concentrações abaixo de 20 %p de tântalo, a liga apresenta uma microestrutura composta apenas pela fase  $\alpha$ , com estrutura cristalina hexagonal compacta. Para concentração de tântalo variando entre 30 a 50 %p, coexistem as fases martensíticas  $\alpha'$  e  $\alpha''$ , com estrutura cristalina hexagonal distorcida e ortorrômbica, respectivamente. Quando a concentração aumenta para até 60% em peso de tântalo, as fases  $\alpha''$  e  $\beta$  coexistem e apenas para ligas com concentração de tântalo acima de 60 %p há a predominância da fase  $\beta$ , com estrutura cristalina cúbica de corpo centrado, sem a formação de fases martensíticas [10]. Tais ligas possuem boas propriedades mecânicas e baixo módulo de elasticidade, onde se destaca a liga Ti-25Ta, com módulo de elasticidade abaixo de 70 GPa [11]. Estas características fazem a liga Ti-25Ta bastante promissora para ser utilizada em aplicações ortopédicas e odontológicas.

Outra possibilidade bastante interessante é o caso de ligas do sistema Ti-Zr [9, 12-14]. Sabe-se que o zircônio possui propriedades químicas semelhantes às do titânio, podendo formar soluções sólidas com certa facilidade [15], além da concentração de zircônio reduzir o ponto de fusão da liga facilitando o manuseio do material nos processos de conformação mecânica [16]. Embora o zircônio seja considerado um elemento neutro em ligas binárias de titânio, na presença de um outro elemento beta estabilizador (como tântalo, por exemplo), ele pode ajudar na retenção desta fase e diminuir a temperatura da transição martensítica  $\alpha'$  [17-21].

Levando-se em consideração as diversas condições favoráveis das ligas dos sistemas Ti-Ta e Ti-Zr para aplicação como biomateriais, a formação de ligas ternárias do sistema Ti-Ta-Zr pode apresentar propriedades mais interessantes ainda para a área biomédica. A liga Ti-25Ta com o acréscimo de cinco por cento de zircônio pode mostrar propriedades mecânicas e eletroquímicas favoráveis para a fabricação de implantes, além dos elementos constituintes apresentarem excelente biocompatibilidade com o organismo [22].

Neste sentido, este trabalho mostra o desenvolvimento de uma nova liga a base de titânio, a liga Ti-25Ta-5Zr, visando aplicações ortopédicas e dentárias. Também são apresentados os resultados da caracterização química, estrutural, microestrutural e de algumas propriedades mecânicas selecionadas da liga.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A fusão foi realizada utilizando um forno arco-voltaico, com cadinho de cobre refrigerado a água, eletrodo não-consumível de tungstênio e atmosfera controlada de argônio [18, 23-28].

A composição química das amostras produzidas foi verificada utilizando a técnica da solubilização em meio ácido, seguido da detecção dos elementos em um espectrômetro de emissão ótica com plasma induzido (ICP-OES) [29] e pela técnica de espectrometria por dispersão de energia (EDS), utilizando um microscópio eletrônico de varredura da Carls Zeiss, modelo EVO-015, com a sonda INCA. As quantidades dos gases oxigênio e nitrogênio foram verificados utilizando um equipamento LECO, modelo TC-400, pela fusão direta das amostras em cadinhos de grafite que combina o carbono com o oxigênio liberado pela amostra [30].

As medidas de difração de raios X foram realizadas por intermédio de um difratômetro Rigaku D/Max 2100PC, utilizando a radiação  $K\alpha$  do cobre ( $\lambda=1,544 \text{ \AA}$ ), corrente de 20 mA, potencial de 40 kV, tempo de permanência de 1,6 s e passo de 0,02 graus, de  $20^\circ$  à  $100^\circ$ , no modo de tempo fixo.

Para a obtenção das imagens de microscopia óptica, foi utilizado um microscópio Olympus modelo BX51M e para as imagens de microscopia eletrônica de varredura, foi utilizado um microscópio eletrônico da Carls Zeiss, modelo EVO-015. Os materiais passaram por um preparo metalográfico prévio no qual as amostras foram lixadas com lixas com 360, 400, 500, 600, 800, 1200 e 1500 mesh de granulometria [31]. Após o lixamento, as amostras foram polidas em suspensão de alumina de 1  $\mu\text{m}$ . Para revelar a microestrutura das amostras, foi realizado um ataque químico com o reagente Kroll [32], utilizando uma solução de 15% de  $\text{HNO}_3$ , 5% de HF e 80% de  $\text{H}_2\text{O}$ .

Para a caracterização mecânica inicial das amostras, foram selecionadas duas propriedades extremamente importantes para a utilização como biomaterial, a dureza e o módulo de elasticidade [33]. As medidas de microdureza Vickers foram obtidas por intermédio de um microdurômetro Shimadzu HMV-2, com carga de 200 g (1,961 N) e tempo de 60s [34]. Para as medidas do módulo de elasticidade, foi utilizado método dinâmico, baseado na técnica de excitação por impulso [35], por intermédio de um equipamento Sonelastic®, da ATCP.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra os valores obtidos para os elementos que compõem a liga, utilizando a técnica de ICP-EOS e análise de gases. Observa-se que a composição química da liga é próxima ao valor nominal e as impurezas metálicas apresentam concentrações não significativas. Com relação à análise de gases, pode ser visto que a liga possui oxigênio e nitrogênio dissolvidos intersticialmente em pequenas quantidades, oriundos do processo de fusão. Os resultados mostram um baixo teor de oxigênio e nitrogênio nas amostras produzidas. A Tabela 2 mostra uma análise dos elementos da liga utilizando EDS. Os valores encontrados são próximos da estequiometria proposta e corrobora os resultados obtidos por ICP-EOS. Segundo a norma ASTM 2066 [36], uma liga binária Ti-15%pMo deve possuir uma quantidade de molibdênio entre 14 e 16 %p. Como a liga produzida é nova e não possui uma norma específica, analisando os resultados à luz da norma ASTM 2066, observa-se que a liga é obtida de forma satisfatória. Por esta norma, na liga Ti-15%pMo, o teor máximo de gases tolerado é  $(0,20 \pm 0,02)$  %p e  $(0,05 \pm 0,02)$  %p, para o oxigênio e nitrogênio, respectivamente. Assim, conclui-se que o teor de oxigênio e nitrogênio para os lingotes produzidos estão de acordo com o estabelecido pela norma.

**Tabela 1:** Composição química das amostras da liga Ti-25Ta-5Zr

Elemento	Al	Cr	Cu	Fe	Hf	Mo	Ni	Si	Ta	Zr	O	N	Ti
%p	0,07	0,01	0,01	0,07	0,01	0,02	0,01	0,01	25,07	5,35	0,17	0,01	Balanço

**Tabela 2:** Análise química quantitativa por EDS das amostras da liga Ti-25Ta-5Zr

Elemento	Ti	Ta	Zr
%p	Balanço	$(29,1 \pm 0,2)$	$(5,6 \pm 0,2)$

A Figura 1 mostra imagens do mapeamento por EDS, dos elementos que compõem uma amostra de liga de Ti-25Ta-5Zr, onde os pontos de coloração vermelha representam o titânio, os pontos verde representam o tântalo e os azuis, representam o zircônio. Observa-se uma distribuição homogênea, sem a presença de aglomerados ou segregados.

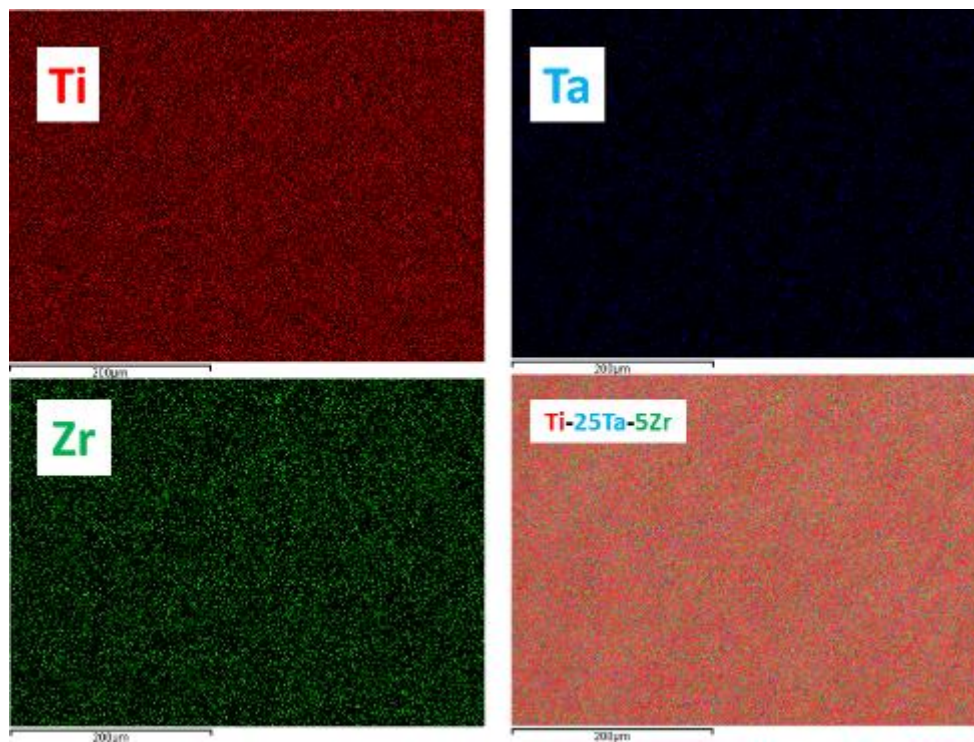
A partir de resultados empíricos, foi desenvolvida uma equação que possibilita escolher composições das ligas nas quais as quantidades de elementos substitucionais podem estabilizar a fase  $\beta$ . A equação usa a porcentagem equivalente de molibdênio por ser um dos principais estabilizadores da fase  $\beta$  [37]:

$$[Mo] = Mo + \frac{Ta}{5} + \frac{Nb}{3,6} + \frac{W}{2,5} + \frac{V}{1,5} + 1,25Cr + 1,25Ni + 1,7Mn + 1,7Co + 2,5Fe \quad (1)$$

Para as ligas produzidas neste trabalho, o molibdênio equivalente é igual a 5,23. Assim, segundo a teoria a liga Ti-25Ta-5Zr deve possuir uma estrutura semelhante à liga binária Ti-5Mo. Ho e colaboradores [38] estudaram as ligas do sistema Ti-Mo para aplicações como biomaterial e observaram que com 5 %p de molibdênio, uma pequena quantidade de fase  $\alpha'$  está presente na liga. Logo espera-se que a liga Ti-25Ta-5Zr possua, além da fase  $\beta$ , a fase  $\alpha'$  em sua microestrutura.

Outra técnica utilizada para prever fases de ligas de titânio é a teoria do orbital molecular DV- $X\alpha$  [39]. O método é baseado na aproximação de Hartree-Fock-Slater usando o potencial  $X\alpha$  de Slater [40-42]. O parâmetro de ordem de ligação  $B_0$  representa a intensidade da força de ligação entre o titânio e seus elemen-

tos de liga. O parâmetro de nível de energia  $Md$  é relacionado à camada  $d$  do metal de transição que está sendo ligado. Estes dois parâmetros são levados em consideração para prever a estrutura do material e seu módulo de elasticidade [40]. O cálculo dos parâmetros médios  $Bo$  e  $Md$  para as ligas de estudo é apresentado na em um diagrama  $Bo-Md$ , mostrado na Figura 2. Em ambas as teorias, a previsão é que a liga Ti-25Ta-5Zr possua a fase ortorrômbica  $\alpha''$ , coexistindo com a fase  $\beta$ .



**Figura 1:** Mapeamento da distribuição dos elementos titânio (em verde), tântalo (em azul) e zircônio (em verde), nas amostras da liga Ti-25Ta-5Zr

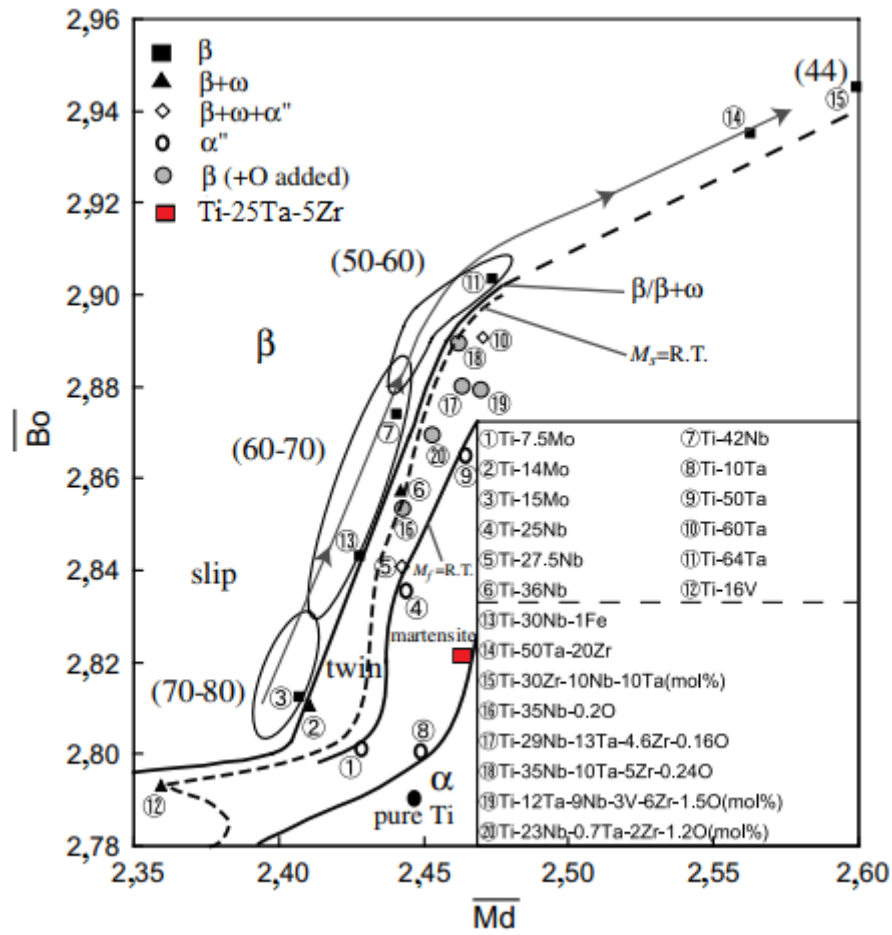
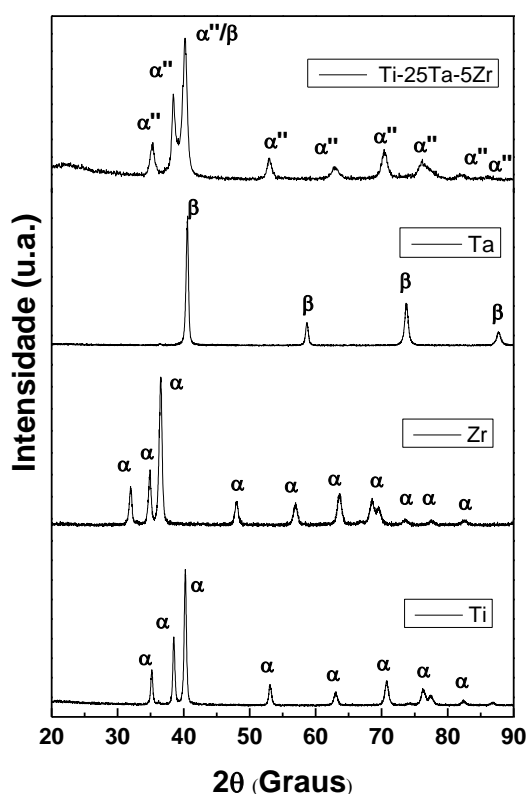


Figura 2: Diagrama Bo-Md (adaptado de Abdel-Hady e colaboradores [41]).

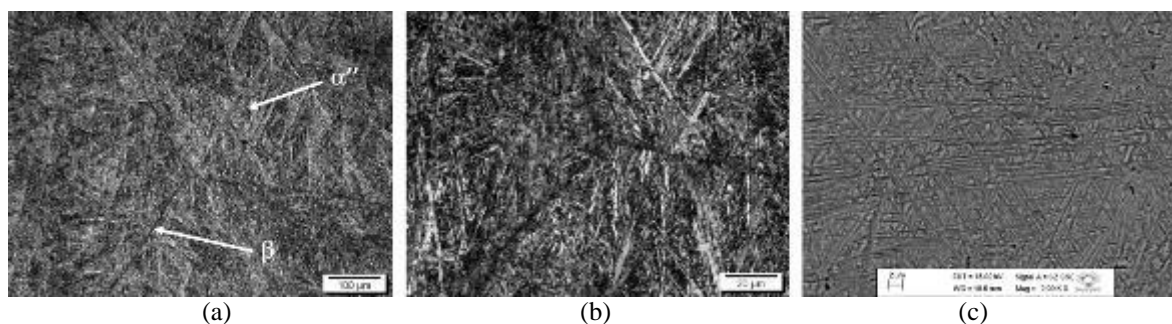
A Figura 3 mostra um gráfico comparativo dos difratogramas de raios X para as amostras da liga Ti-25Ta-5Zr na condição bruta de fusão. Observando os difratogramas, verifica-se que as amostras da liga em questão, apresentaram picos da fase martensítica  $\alpha''$  e  $\beta$ , com estrutura cristalina ortorrômbica e cúbica de corpo centrado, respectivamente [38]. O tântalo é um elemento  $\beta$ -estabilizador [10], e a presença do mesmo faz com que o zircônio deixe de ser neutro e passe a atuar na estabilização da fase  $\beta$  na liga [21,23], devido a isso é possível detectar a presença de picos que são associados à fase  $\beta$ . Segundo Zhou e Niinomi [11], a liga binária Ti-25Ta possui a estrutura cristalina ortorrômbica (fase  $\alpha''$ ), quando resfriada rapidamente do campo  $\beta$  até a temperatura ambiente. Neste estudo, foi observado que a fase  $\alpha''$  possui uma célula unitária maior que as demais fases do titânio, e como o módulo de elasticidade depende da força de ligação entre os átomos, este resultado indica ligas do tipo  $\alpha''$  do sistema Ti-Ta possuem os menores valores para o módulo de elasticidade do sistema. Logo, a liga Ti-25Ta-5Zr pode possuir um menor módulo de elasticidade que a liga Ti-25Ta, pois a liga proposta possui fração volumétrica de fase  $\beta$ , que reduz mais ainda o módulo da liga [32].



**Figura 3:** Difratogramas de raios X para os elementos constituintes e para a liga Ti-25Ta-5Zr, após a fusão.

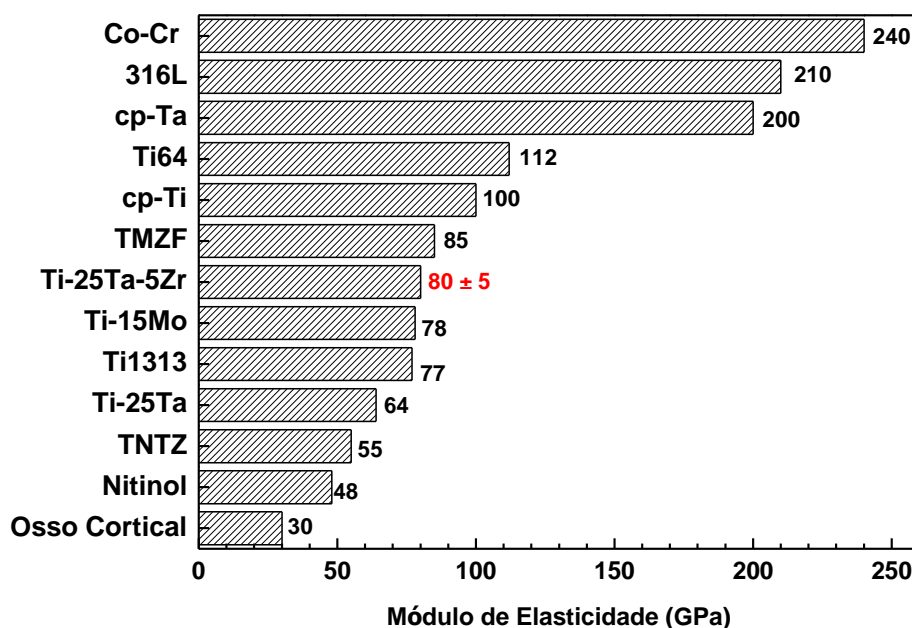
A Figura 4 apresenta as micrografias ópticas e eletrônicas de varredura. As micrografias corroboraram os resultados obtidos nos difratogramas de raios X. A liga Ti-25Ta-5Zr apresentou uma microestrutura composta por agulhas que são típicas de estruturas das fases  $\alpha''$  e contorno de grãos característicos da fase  $\beta$  [43], conforme esperado a partir dos resultados da difração de raios X. Os resultados das caracterizações estrutural e microestrutural mostraram que as teorias do molibdênio equivalente e do orbital molecular funcionaram bem no caso da liga Ti-25Ta-5Zr. Ambas as teorias indicaram que a liga deveria possuir a coexistência das fases  $\alpha''$   $\beta$ .

Com relação aos resultados de dureza da liga Ti-25Ta-5Zr, obteve-se o valor de  $(264 \pm 11)$  HV, significativamente maior que o titânio puro (167 HV) e menor que a liga Ti-25Ta ( $300 \pm 2$ ) HV. A liga produzida possui dureza maior que o Ti-cp devido a um processo de endurecimento por solução sólida causada pela adição de tântalo e zircônio que possuem massa atômica superiores a do titânio [44]. Com o acréscimo de 5 %p de zircônio, houve um aumento de dureza da liga pois ele é bifásica e isso aumenta a barreira para o movimento das discordâncias, acarretando uma maior dureza quando comparado com a liga Ti-25Ta, que é monofásica [45].



**Figura 4:** Micrografias das amostras da liga Ti-25Ta-5Zr após a fusão, obtidas por microscopia óptica (a) e (b) e por microscopia eletrônica de varredura (c).

A Figura 5 mostra uma comparação do módulo de elasticidade de alguns biomateriais metálicos comumente encontrados no mercado, juntamente com a liga Ti-25Ta-5Zr, desenvolvida neste trabalho [8]. A liga produzida neste trabalho possui módulo de elasticidade de aproximadamente 80 GPa. Pode ser observado que apenas a liga TNTZ (Ti-35Nb-5Ta-7Zr), o nitinol (55Ni-45Ti equiatômico) e a liga Ti25Ta possuem resultados mais satisfatórios para serem implantados em um osso cortical. As ligas Ti-1313 (Ti-13Nb-13Zr), Ti-15Mo e TMZF (Ti-13Mo-6Zr-2Fe), possuem valores de módulo de elasticidade próximos ao da liga Ti-25Ta-5Zr, dentro da margem experimental. As demais ligas possuem valores de módulo de elasticidade bem maiores. A liga Ti-25Ta-5Zr possui melhores resultados de módulo de elasticidade comparado com o titânio comercialmente puro, pois a liga possui uma fração da fase ortorrômbica  $\alpha''$ , e essa fase tem um fator de empacotamento atômico menor que a fase hexagonal compacta ( $\alpha$ ) do titânio.



**Figura 5:** Módulo de elasticidade da liga Ti-25Ta-5Zr, comparado com valores de materiais metálicos usados comumente na área biomédica [8].

#### 4. CONCLUSÕES

A liga Ti-25Ta-5Zr foi preparada por fusão à arco e as medidas de composição química, EDS e mapeamento indicam que a liga foi fundida de maneira homogênea, preservando a estequiometria proposta. A análise estrutural mostra uma coexistência de fase  $\beta$  e  $\alpha''$ , o que foi corroborado pela análise microestrutural. Os valores de dureza obtidos estiverem acima do titânio comercialmente puro, causado pelo endurecimento por solução sólida da liga. O módulo de elasticidade da liga é mais baixo comparada com a titânio comercialmente puro, pois a liga possui a coexistência das fases  $\beta$  e da ortorrômbica  $\alpha''$ , que tendem a possuir um valor de módulo de elasticidade menor, quando comparado com as ligas do tipo  $\alpha$  (Hexagonal compacta). Tais características fazem desta liga uma boa alternativa para aplicações ortopédicas.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Faculdade de Ciências de Bauru pela facilidade nas medidas de DRX e MEV e às agências de fomento Capes, CNPq (processo # 307279/2013-8) e FAPESP (processo # 2015/09480-0), pelo suporte financeiro.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] LI, Y., YANG, C., ZHAO, H., *et al.*, “New developments of Ti-based alloys for biomedical applications”, *Materials*, v. 7, n. 3, pp. 1709-1800, Mar. 2014.
- [2] IBRAHIM, M.Z., SARHAN, A.A., YUSUF, F., *et al.*, “Biomedical materials and techniques to improve the tribological, mechanical and biomedical properties of orthopedic implants – A review article”, *Journal of Alloys and Compounds*, v. 714, pp. 636-667, Aug. 2017.
- [3] MANAM, N.S., HARUN, W.S.W., SHRI, D.N.A., *et al.*, “Study of corrosion in biocompatible metals for implants: A review”, *Journal of Alloys and Compounds*, v. 701, pp. 698-715, Apr. 2017.
- [4] MARKHOFF, J., KROGULL, M., SCHULZE, C., *et al.*, “Biocompatibility and Inflammatory Potential of Titanium Alloys Cultivated with Human Osteoblasts, Fibroblasts and Macrophages”, *Materials*, v. 10, ed. 1, pp. 52, Jan. 2017.
- [5] KOLLI, R., DEVARAJ, A., “A Review of Metastable Beta Titanium Alloys”, *Metals*, v. 8, n. 7, pp. 506, Jul. 2018.
- [6] NIINOMI, M., NAKAI, M., “Titanium-Based Biomaterials for Preventing Stress Shielding between Implant Devices and Bone”, *International Journal of Biomaterials*, v. 2011, pp. 1-10, Mar. 2011.
- [7] LEI, Z., LIU, X., WANG, H., *et al.*, “Development of advanced materials via entropy engineering”, *Scripta Materialia*, v. 165, pp. 164-169, May. 2019.
- [8] KAUR, M., SINGH, K., “Review on titanium and titanium based alloys as biomaterials for orthopaedic applications”, *Materials Science and Engineering: C*, v. 102, pp. 844-862, Apr. 2019.
- [9] CORDEIRO, J.M., BELINE, T., RIBEIRO, A.L.R., *et al.*, “Development of binary and ternary titanium alloys for dental implants”, *Dental Materials*, v.33, n. 11, pp. 1244-1257, Nov. 2017.
- [10] ZHOU, Y.L., NIINOMI, M., AKAHORI, T., *et al.*, “Comparison of Various Properties between Titanium-Tantalum Alloy and Pure Titanium for Biomedical Applications”, *Materials Transactions*, v. 48, n. 3, pp. 380-384, Mar. 2007.
- [11] ZHOU, Y.L., NIINOMI, M., “Ti–25Ta alloy with the best mechanical compatibility in Ti–Ta alloys for biomedical applications”, *Materials Science and Engineering: C*, v. 29, n. 3, pp. 1061-1065, Apr. 2009.
- [12] CORDEIRO, J.M., FAVERANI, L.P., GRANDINI, C.R., *et al.*, “Characterization of chemically treated Ti-Zr system alloys for dental implant application”, *Materials Science and Engineering: C*, v. 92, pp. 849-861, Nov. 2018.
- [13] CORREA, D.R.N., VICENTE, F.B., DONATO, T.A.G., *et al.*, “The effect of the solute on the structure, selected mechanical properties, and biocompatibility of Ti-Zr system alloys for dental applications”, *Materials Science & Engineering C-Materials For Biological Applications*, v. 34, pp. 354-359, Jan. 2014.
- [14] VICENTE, F.B., CORREA, D., DONATO, T.A., *et al.*, “The Influence of Small Quantities of Oxygen in the Structure, Microstructure, Hardness, Elasticity Modulus and Cytocompatibility of Ti-Zr Alloys for Dental Applications”, *Materials*, v. 7, n. 1, pp. 542-553, Jan. 2014.
- [15] LIU, X., CHEN, S., TSOI, J.K., MATINLINNA, J.P., “Binary titanium alloys as dental implant materials—a review”, *Regenerative Biomaterials*, v. 4, n. 5, pp. 315-323, Oct. 2017.
- [16] BANERJEE, D., WILLIAMS, J.C., “Perspectives on Titanium Science and Technology”, *Acta Materialia*, v. 61, n. 3, pp. 844-879, Feb. 2013.
- [17] CORREA, D.R.N., KURODA, P.A.B., LOURENÇO, M.L., *et al.*, “Adjustment of the microstructure and selected mechanical properties of biomedical Ti-15Zr-Mo alloys through oxygen doping”, *Journal of Alloys and Compounds*, v. 775, pp. 158-167, Feb. 2019.
- [18] CORREA, D.R.N., KURODA, P.A.B., LOURENÇO, M.L., *et al.*, “Microstructure and selected mechanical properties of aged Ti-15Zr-based alloys for biomedical applications”, *Materials Science and Engineering: C*, v. 91, pp. 762-771, Oct. 2018.
- [19] CORREA, D.R.N., VICENTE, F.B., ARAÚJO, R.O., *et al.*, “Effect of the substitutional elements on the microstructure of the Ti-15Mo-Zr and Ti-15Zr-Mo systems alloys”, *Journal of Materials Research and Technology*, v. 4, n. 2, pp. 180-185, Apr. 2015.
- [20] CORREA, D.R.N., KURODA, P.A.B., LOURENÇO, M.L., *et al.*, “Effect of Heat Treatment in the Structure and Microstructure of Ti-15Zr-XMo Alloys”, *Defect and Diffusion Forum*, v. 365, pp. 305-310, 180-185, Jul. 2015.
- [21] CORREA, D.R.N., KURODA, P.A.B., GRANDINI, C.R., “Structure, Microstructure, and Selected Me-



chanical Properties of Ti-Zr-Mo Alloys for Biomedical Applications”, *Advanced Materials Research*, v. 922, pp. 75-80, May. 2014.

[22] HO, W.F., CHENG, C.H., CHEN, W.K., *et al.*, “Evaluation of low-fusing porcelain bonded to dental cast Ti-Zr alloys”, *Journal of Alloys and Compounds*, v. 471, n. 1-2, pp. 185-189, Mar. 2009.

[23] KURODA, P.A.B., BUZALAF, M.A.R., GRANDINI, C.R., “Effect of molybdenum on structure, microstructure and mechanical properties of biomedical Ti-20Zr-Mo alloys”, *Materials Science and Engineering: C*, v. 67, pp. 511-515, Out. 2016.

[24] KURODA, P.A.B., BUZALAF, M.A.R., GRANDINI, C.R., “Preparation, microstructural characterization, and selected mechanical properties of Ti-20Zr-2.5Mo and Ti-20Zr-7.5Mo used as biomaterial”, *Materials Science Forum*, v. 869, pp. 946-951, Ago. 2016.

[25] KURODA, P.A.B., LOURENÇO, M.L., CORREA, D.R.N., *et al.*, “Thermomechanical treatments influence on the phase composition, microstructure, and selected mechanical properties of Ti-20Zr-Mo alloys system for biomedical applications”, *Journal of Alloys and Compounds*, v. 812, pp. 152108, Jan. 2020.

[26] QUADROS, F.F., KURODA, P.A.B., SOUSA, K.D.S.J., *et al.*, “Preparation, structural and microstructural characterization of Ti-25Ta-10Zr alloy for biomedical applications”, *Journal of Materials Research and Technology*, v. 8, n. 5, pp. 4108-4114, Set. 2019.

[27] LUZ, A.R., SANTOS, L.S., LEPIENSKI, C.M., *et al.*, “Characterization of the morphology, structure and wettability of phase dependent lamellar and nanotube oxides on anodized Ti-10Nb alloy”, *Applied Surface Science*, v. 448, pp. 30-40, Aug. 2018.

[28] CORREA, D.R.N., KURODA, P.A.B., LOURENÇO, M.L., *et al.*, “Development of Ti-15Zr-Mo alloys for applying as implantable biomedical devices”, *Journal of Alloys and Compounds*, v. 749, pp. 163-171, Jun. 2018.

[29] ASTM, “E2371 – 04 - Standard Test Method for Analysis of Titanium and Titanium Alloys by Atomic Emission Plasma Spectrometry”, ASTM West Conshohocken, 2004.

[30] ASTM, “E1409 – 08 - Standard Test Method for Determination of Oxygen and Nitrogen in Titanium and Titanium Alloys by the Inert Gas Fusion Technique”, ASTM West Conshohocken, 2008.

[31] ASTM, “E407-07 - Standard Practice for Microetching Metals and Alloys”, ASTM West Conshohocken, 2007.

[32] COLLINGS, E.W., *The Physical Metallurgy of Titanium Alloys*, 17 ed, Moscow, Metallurgiya, 1988.

[33] WANG, W., POH, C.K., “Titanium Alloys in Orthopaedics”, In: *Titanium Alloys - Advances in Properties Control*, v. 15, InTech, Rijeka, pp. 1-20, 2013.

[34] ASTM, “E92-82 - Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials”, ASTM West Conshohocken, 2003.

[35] ASTM, “E1876-01 - Standard Test Method for Dynamic Young’s Modulus, Shear Modulus, and Poisson’s Ratio by Impulse Excitation of Vibration”, ASTM International: Philadelphia (USA), 2002.

[36] ASTM, “F2066-08 - Standard specification for wrought titanium-15 molybdenum alloy for surgical implant application”, ASTM: Philadelphia (USA), 2008.

[37] LÜTJERING, G., WILLIAMS, J.C., *Titanium*, 2 ed, New York, Springer, 2003.

[38] HO, W.F., JU, C.P., CHERN LIN, J.H., “Structure and properties of cast binary Ti-Mo alloys”, *Biomaterials*, v. 2, n. 22, pp. 2115-2122, Nov. 1999.

[39] MORINAGA, M., YUKAWA, H., “Alloy design with the aid of molecular orbital method”, *Bulletin of Materials Science*, v. 20, n. 6, pp. 805-815, Sep. 1997.

[40] MORINAGA, M., MURATA, Y., YUKAWA, H., “Molecular orbital approach to alloy design”, In: *Applied Computational Materials Modeling: Theory, Simulation and Experiment*, Springer US: Boston, pp. 255-306, 2007.

[41] ABDEL-HADY, M., HINOSHITA, H., MORINAGA, M., “General approach to phase stability and elastic properties of  $\beta$ -type Ti-alloys using electronic parameters”, *Scripta Materialia*, v. 55, n. 5, pp. 477-480, Set. 2006.

[42] KURODA, D., NIINOMI, M., MORINAGA, M., *et al.*, “Design and mechanical properties of new  $\beta$  type titanium alloys for implant materials”, *Materials Science and Engineering: A*, v. 243, n. 1-2, pp. 244-249, Mar. 1998.

[43] LEYENS, C. AND PETERS, M., *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*, 1 ed., New York, Wiley-VCH, 2003.

[44] BOYER, R., WELSCH, G., COLLINGS, E.W., *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*, 1 ed., New York, Materials Park, ASM International, 1994.

[45] MANDA, P., CHAKKINGAL, U., SINGH, A.K., “Hardness characteristic and shear band formation in metastable  $\beta$ -titanium alloys”, *Materials Characterization*, v. 96, pp. 151-157, Mar. 1998.

#### ORCID

Pedro Akira Bazaglia Kuroda <https://orcid.org/0000-0001-9867-9186>

Mycaela Vieira do Nascimento <https://orcid.org/0000-0002-8686-3389>

Carlos Roberto Grandini <https://orcid.org/0000-0002-3336-309X>