

DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE EXPERIMENTAL DE UMA LIGA DE TITÂNIO PARA APLICAÇÕES BIOMÉDICAS

DETERMINATION OF THE EXPERIMENTAL DENSITY OF A TITANIUM ALLOY FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD EXPERIMENTAL DE UNA ALEACIÓN DE TITANIO PARA APLICACIONES BIOMEDICAS

Guilherme Hernandes de Oliveira Santos¹
Cauan Ferrara Batista²
Lucas Satoshi Cipriano Oikawa³
José Roberto Severino Martins Junior⁴

1

Resumo: Uma das ligas mais aplicadas na área biomédica é a Ti-6Al-4V, no entanto, estudos apontaram que o vanádio pode causar efeitos citotóxicos, gerando reações com alguns tecidos humanos e o alumínio tem sido associado a desordens neurológicas. Por sua vez, ligas do sistema TiMoNb integram uma nova classe a base de titânio, sem a presença de alumínio e vanádio, e apresentando um baixo módulo de elasticidade. Além disso, apresenta densidade volumétrica menor que alguns metais utilizados na medicina, algo atraente para o emprego de biomateriais. A densidade volumétrica foi determinada de duas formas: teórica e experimental. A forma teórica é pautada na densidade de cada elemento químico bem como sua proporção em massa. Já a forma experimental utiliza o Princípio de Arquimedes como base para as medidas. O objetivo deste trabalho é fazer o estudo da liga Ti-15%p.Mo-5%p.Nb, caracterizá-la quimicamente e quantitativamente por meio da técnica de densidade.

Palavras-chave: Biomaterial. Ligas de Titânio. Densidade volumétrica. Propriedades Mecânicas.

¹ Estudante do Curso Técnico de Eletrônica Integrado ao Ensino Médio . Instituto Federal de São Paulo, Campus Avançado Tupã. E-mail: guitupa@gmail.com. Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7574-6163>

² Estudante do Curso Técnico de Eletrônica Integrado ao Ensino Médio . Instituto Federal de São Paulo, Campus Avançado Tupã. E-mail: cauanfebatista@gmail.com. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2833-2440>

³ Estudante do Curso Técnico de Eletrônica Integrado ao Ensino Médio . Instituto Federal de São Paulo, Campus Avançado Tupã . E-mail: lucas.oikawa@aluno.ifsp.edu.br. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2921-8997>

⁴ Prof. Dr. José Roberto Severino Martins Junior. Instituto Federal de São Paulo, Campus Avançado Tupã. E-mail: jose.martins@ifsp.edu.br. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2407-2346>

Abstract: One of the most applied alloys in the biomedical area is Ti-6Al-4V, however, it has been discovered that vanadium causes cytotoxic effects, generating reactions with some human tissues, while aluminum has been associated with neurological disorders. In turn, TiMoNb alloys integrate a new titanium-based class, without the presence of aluminum and vanadium, and presenting a low modulus of elasticity. In addition, it has a lower volumetric density than some metals used in medicine, something attractive for elements in the use of biomaterials. Volumetric density was determined in two ways: theoretical and experimental. The theoretical form based on the density of each chemical element as well as its mass proportion. And the experimental form using the Archimedes Principle. The objective of this work is to study the Ti-15%wt.Mo-5%wt.Nb alloy and characterize it chemically quantitatively by density technique.

Keywords: Biomaterial. Titanium Alloys. Volumetric Density. Mechanical Properties.

Resumen: Una de las aleaciones más aplicadas en el área biomédica es Ti-6Al-4V, sin embargo, se ha descubierto que el vanadio causa efectos citotóxicos, generando reacciones con algunos tejidos humanos, mientras que el aluminio se ha asociado con trastornos neurológicos. A su vez, las aleaciones de TiMoNb integran una nueva clase a base de titanio, sin la presencia de aluminio y vanadio, y presentando un módulo bajo de elasticidad. Además, tiene una densidad volumétrica más baja que algunos metales utilizados en la medicina, algo atractivo para el uso de los biomateriales. La densidad volumétrica se determinó de dos maneras: teórica y experimental. La forma teórica es basada en la densidad de cada elemento químico, así como su proporción de masa. Ya la forma experimental usa el Principio Arquímedes en sus mediciones. El objetivo de este trabajo es estudiar la aleación Ti-15%p.Mo-5%p.Nb, caracterizarla químicamente y cuantitativamente por la técnica de densidad.

Palabras-clave: Biomaterial. Aleaciones de Titanio. Densidad Volumétrica. Propiedades Mecánicas.

Submetido 09/06/2020

Aceito 13/12/2020

Publicado 03/02/2021

INTRODUÇÃO

As criações de próteses utilizando os metais devem-se às suas propriedades físicas, químicas e estruturais. Apesar de apresentarem características em comuns, muitos elementos classificados como metais, apresentam peculiaridades distintas, sendo propício cada um para uma função (Donato, 2009; Ratner, 2012; Jakubowicz, 2020).

Dentre os biomateriais essenciais na ortopedia encontra-se o titânio e suas ligas. Descoberto em 1791, o titânio é um metal leve e resistente (Leyens, 2005). Devido a essas características, foi implementado primariamente no uso de ligas aeronáuticas, porém após a descoberta da sua baixa reatividade com o corpo humano, foi logo introduzido na área de biomateriais. Além da sua baixa reatividade com o corpo humano apresenta outras características apreciadas para o seu uso, como sua densidade, que é baixa em relação a outros metais, e também como sua alta resistência mecânica.

Assim desde 1970, as ligas de titânio foram escolhidas como principais ligas nessa área, virando a mais comum e mais adequada, a liga Ti-6Al-4V (Lütjering, 2007). A escolha dessas ligas foi feita baseada em três aspectos essenciais: a biocompatibilidade do elemento, seu Módulo Young, ou módulo de elasticidade, e a sua resistência a corrosão (Park; 2007; Martins Jr, 2011; Martins Jr, 2014 (a); Martins Jr, 2018).

No entanto, após diversas pesquisas, foi descoberto que o vanádio apresenta, em sua composição, algumas substâncias citotóxicas e apresenta um histórico de divergência com alguns tecidos do corpo humano (Ratner, 2012). Além disso, o alumínio está relacionado com algumas desordens neurológicas. Compreendendo as afirmações acima, diversos pesquisadores buscam um substituto similar ou melhor que a Ti-6Al-4V. Procurando assim, uma liga que apresente os três aspectos essenciais anteriormente citados e uma resistência mecânica maior ou similar (Correa, 2014; Grandini, 2009; Martins Jr, 2014 (a) e 2016; Kuroda, 2020; Martins Jr, 2014 (b); Li, 2020).

A Ti-15Mo-5Nb, protagonista da pesquisa, tem um grande potencial, pois ela é feita de titânio, um metal resistente e relativamente leve (Martins Jr, 2014 (a)). Além disso, ela apresenta, em sua composição, dois elementos que contribuem para a transformação da sua microestrutura, passando de uma liga alfa (α) (estrutura hexagonal compacta) para uma liga beta (β) (estrutura cúbica de corpo centrado) (Jakubowicz, 2020). Ademais, o molibdênio permite que nessa liga haja uma resistência ainda maior contra a corrosão. Já o nióbio, além

de suas propriedades satisfatórias, é um importante metal para o Brasil, visto que, em nosso país, está presente cerca de 98% das reservas mundiais exploradas dessa substância, auxiliando, automaticamente, a economia nacional (Brasil, 2019).

Neste projeto, será pesquisada uma liga alternativa em relação as comerciais, e será determinada sua densidade de dois modos: Teórico e Experimental. Após isto, será comparado valores de densidade com os demais materiais ortopédicos.

Estrutura de ligas de Titânio

Muito se discute sobre as ligas de titânio para uso biomédico para aprimorar ligas já existentes como a liga Ti-6Al-4V muito utilizada atualmente, ou criar novas ligas. As ligas mais promissoras apresentam Nb, Zr, Mo e Ta como elementos adicionados a liga de titânio, pois apresentam uma maior biocompatibilidade, já que o vanádio é citotóxico, e menor módulo de elasticidade, por causa de estabilizarem a fase β , muito atraente para o uso biomédico (Leyens, 2005).

Sobre a fase β é possível dizer que ela é formada por uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC) muito mais versátil que a fase α , sobre o que se diz em microestrutura, e propriedades mecânicas. Esta fase necessita de outros elementos além do titânio puro para estabilizar-se a temperatura ambiente, como o alumínio e o nióbio (Geetha, 2009; Martins Jr, 2012 (a)). Esta fase é caracterizada, também, por alguns elementos que ajudam em sua estabilização como o tântalo, vanádio e molibdênio. Estes são chamados de beta (β) estabilizadores, pois permitem a estabilização da fase β em temperaturas menores (Lütjering, 2007). Para a fase beta (β) é possível usar a equação que prevê o molibdênio equivalente a alguns elementos utilizados para estabilizar a fase β (Boyer, 1994; Lütjering, 2007). Essa equação utiliza os valores percentuais de peso dos elementos na liga. A equação citada é a (1) é a seguinte:

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

Com base na equação (1) é possível classificar se uma liga é considerada α ou β dependendo de seu nível de molibdênio equivalente, sendo considerada β uma liga com o Mo_{eq} maior ou igual a 11,5. Na tabela 1 foi realizado este cálculo para diversas ligas comerciais. A liga deste trabalho a liga Ti-15Mo-5Nb apresentou o valor de 16,4, logo ela terá estrutura β , este foi o motivo da escolha da composição química desta liga.

Tabela 1 – Tabela do Molibdênio equivalente

Classificação da liga e composição, (% p.)	Em cada coluna, é apresentado a contribuição de cada elemento químico na Teoria do Mo equivalente. Assim, é necessário para cada elemento fazer o cálculo com base nestes valores.								
	[Mo]	$\frac{[Ta]}{5}$	$\frac{[Nb]}{3,6}$	$\frac{[V]}{1,25}$	1,25[Cr]	1,25[Ni]	1,7[Mn]	2,5[Fe]	$[Mo]_{eq}$
Ligas alfa e quase-alfa									
Ti-0,8Ni-0,3Mo	0,3	...	...	...	...	1,0	...	...	1,3
Ti-8Al-1Mo-1V	1,0	...	...	0,7	...	...	...	...	1,7
Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo	0,8	0,2	0,6	...	...	...	...	...	1,6
Ligas alfa-beta									
Ti-7Al-4Mo	4,0	...	...	...	...	...	...	...	4,0
Ti-6Al-4V	...	...	...	2,7	...	...	...	...	2,7
Ti-3Al-2,5V	...	...	...	1,7	...	...	...	...	1,7
Ligas beta									
<u>Ti-15Mo-5Nb</u>	15,0	...	1,39	...	...	...	...	...	16,4
Ti-8Mn	...	...	...	...	...	...	13,6	...	13,6
Ti-10V-2Fe-3Al	...	...	...	6,7	...	...	...	5,0	11,7

Fonte:(Boyer, 1994).

A fase alfa (α) é descrita pela estrutura hexagonal compacta, a qual se estabelece abaixo da temperatura β -transus (que é a temperatura de passagem da fase alfa para beta) e

tem a concentração de fase β entre 2% a 5% em fração volumétrica. Possui vários graus de pureza e concentração, pois, podem ser feitas ligas na estrutura hexagonal compacta como descrito na introdução (Martins Jr, 2014 (a)).

Os elementos que estabilizam a fase α são o alumínio, nitrogênio, carbono e oxigênio; logo estes elementos aumentam a temperatura limite a qual a fase α é estável. Elementos como zircônio e estanho são chamados de neutros, pois em baixas quantidades estabilizam a fase β e em altas quantidades estabilizam a fase α (Martins Jr, 2012 (b), 2014 (b) e 2016). Esta fase é geralmente utilizada quando o objetivo é conseguir a maior resistência a corrosão o possível como no caso de tubulações, sendo assim interessante para o uso biomédico, já que comparada as ligas β , possuem menor resistência mecânica e maior modo de elasticidade que comparadas as ligas α (Leyens, 2005).

Existem, também, variações da fase α ; as quais são metaestáveis; que seriam α' e α'' que se formam quando há o rápido resfriamento a partir de altas temperaturas resultando em um movimento repentino, e em conjunto de átomos causando a deformação dos planos atômicos (Lüjtering, 2007).

Uma versão híbrida de α e β também é chamada de $\alpha + \beta$ e possui propriedades interessantes para a indústria aeroespacial como uma alta faixa de tenacidade e resistência mecânica, tanto quanto seu uso recomendado para altas temperaturas (Leyens, 2005). Para uma liga ser considerada $\alpha + \beta$ ela precisa ter uma concentração de 10% a 50% de fase beta em temperatura ambiente presente na liga (Boyer, 1994).

PROPOSTA MATEMÁTICA PARA O CÁLCULO DA DENSIDADE DAS LIGAS

Densidade teórica

A densidade volumétrica ou massa específica é uma grandeza física que tem como unidade, a partir do Sistema Internacional (SI), kg/m^3 . No entanto, é muito comum encontrar a densidade representada, também, pela unidade g/cm^3 . Analisando a unidade, pode-se afirmar que densidade é a relação entre massa e o espaço (volume) (Keller, 1999). Vale exaltar a forma no qual é representada a densidade teórica que, em ligas metálicas, é feita a partir do número (porcentagem) que antecede o elemento multiplicado com a densidade do mesmo, por fim, é somado todos os materiais que compõe a liga, conforme a equação (2) (Callister, 2014):

$$D_{teórica} = \frac{100\%}{\frac{C_1}{D_1} + \frac{C_2}{D_2} + \frac{C_3}{D_3}} \quad (2)$$

Em que:

$D_{teórica}$ – Densidade teórica

D_1 – Densidade do elemento químico 1

D_2 – Densidade do elemento químico 2

D_3 – Densidade do elemento químico 3

C_1 – Porcentagem da massa do elemento químico 1

C_2 – Porcentagem da massa do elemento químico 2

C_3 – Porcentagem da massa do elemento químico 3

Dedução da equação (2):

Será demonstrado para uma liga com três elementos químicos, mas os resultados podem ser generalizados para qualquer quantidade de elementos.

$$D_{teórica} = \frac{m_1 + m_2 + m_3}{V_1 + V_2 + V_3} = \frac{m_1 + m_2 + m_3}{\frac{m_1}{D_1} + \frac{m_2}{D_2} + \frac{m_3}{D_3}} \quad (3)$$

Em que:

m_1 – massa do elemento químico 1

m_2 – massa do elemento químico 2

m_3 – massa do elemento químico 3

V_1 – Volume do elemento químico 1

V_2 – Volume do elemento químico 2

V_3 – Volume do elemento químico 3

Sabendo que: $m_1 = C_1 * 100\%$; $m_2 = C_2 * 100\%$; $m_3 = C_3 * 100\%$, e que $C_1 + C_2 + C_3 = 100\%$, substituindo na equação (3) :

Temas:

$$D_{teórica} = \frac{100\%*(C_1+C_2+C_3)}{100\%*\left(\frac{C_1}{D_1}+\frac{C_2}{D_2}+\frac{C_3}{D_3}\right)} = D_{teórica} = \frac{100\%}{\frac{C_1}{D_1}+\frac{C_2}{D_2}+\frac{C_3}{D_3}} \quad (4)$$

Para n elementos químicos temos a equação (5) na forma generalizada:

$$D_{teórica} = \frac{100\%}{\frac{C_1}{D_1}+\frac{C_2}{D_2}+\frac{C_3}{D_3}+\dots+\frac{C_n}{D_n}} \quad (5)$$

Densidade experimental (Princípio de Arquimedes)

Já a densidade experimental é representada pela equação (6). Além disso, para obter de forma precisa a densidade da amostra, a partir das medições experimentais, usamos a seguinte equação 6. Esta equação pode ser obtida levando se em conta as forças submetidas na amostra (força peso e empuxo) (Keller, 1999). Esta técnica é utilizada por muito pesquisadores (Martins Jr, 2012) inclusive já possui norma técnica para este ensaio (ASTM, 2010).

$$D_{amostra} = \frac{m_{am}}{m_{am}-m_{liq}} * D_{liq} \quad (6)$$

Em que:

$D_{amostra}$ = Densidade da amostra

D_{liq} = Densidade do líquido

m_{am} = Massa da amostra no ar

m_{liq} = Massa da amostra no líquido

v_{desl} = Volume deslocado

m_{ap} = Massa aparente

P_{ap} = Peso aparente

P = Peso

E = Empuxo

g = aceleração da gravidade local

A dedução da equação 6 é feita a partir das seguintes relações:

$$P_{ap} = P - E \quad (7)$$

$$m_{ap} \times g = m_{am} \times g - m_{liq} \times g \quad (8)$$

Então, a partir de uma propriedade algébrica, dividimos a equação (7) inteira por g .

Obtém-se:

$$m_{ap} = m_{am} - m_{liq} \quad (9)$$

$$m_{ap} = m_{am} - D_{liq} \times v_{desl} \quad (10)$$

$$m_{ap} = m_{am} - D_{liq} \times m_{am} \div D_{am} \quad (11)$$

A seguir, é tirado o Mínimo Múltiplo Comum, M.M.C. da equação (11), e colocado em evidência o $1 \div d_{am}$

$$m_{ap} = 1 \div D_{am} (m_{am} \times D_{am} - D_{liq} \times m_{am}) \quad (12)$$

$$m_{ap} \times D_{am} = m_{am} \times D_{am} - D_{liq} \times m_{am} \quad (13)$$

$$m_{ap} \times D_{am} - m_{am} \times D_{am} = - D_{liq} \times m_{am} \quad (14)$$

$$D_{am} = - D_{liq} \times m_{am} \div (m_{ap} - m_{am}) \quad (15)$$

E então para facilitar a visualização, é multiplicado por -1 a equação (15), obtendo assim a equação (6):

$$D_{amostra} = \frac{m_{am}}{m_{am} - m_{liq}} * D_{liq} \quad (6)$$

PARTE EXPERIMENTAL

A amostra utilizada neste trabalho é uma lâmina da liga Ti-15Mo-Nb, mostrada na Figura 1. Foi produzida e fornecida pelo Laboratório de Anelasticidade e Biomateriais da Unesp de Bauru, coordenado pelo Prof. Dr. Carlos Roberto Grandini. Maiores detalhes sobre

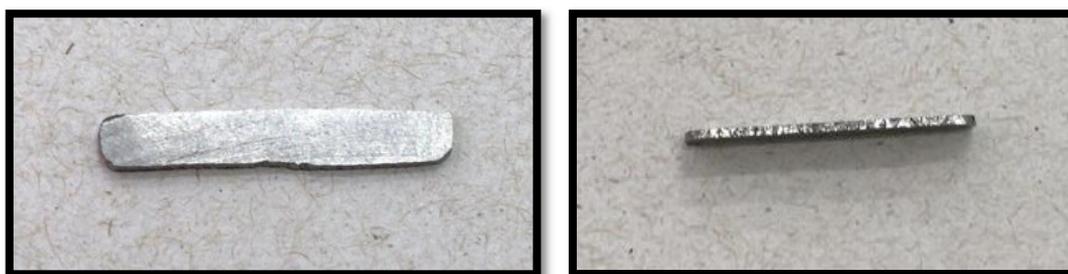
produção de ligas de titânio podem ser vistos nos trabalhos de Martins Jr e colaboradores (Martins, 2011; Martins Jr, 2018; Lourenço, 2020).

A densidade teórica da liga foi calculada utilizando a equação (4). Os valores teóricos de cada elemento foram encontrados no Handbook (Lide, 2004).

Já a densidade experimental foi medida no Laboratório de Anelasticidade e Biomateriais da Unesp de Bauru, coordenado pelo Prof. Dr. Carlos Roberto Grandini. O equipamento utilizado foi uma balança analítica Ohaus, modelo Explorer com kit de densidade, mostrados na Figura 2. A massa do corpo foi medida no ar e depois da imersão em água destilada, utilizando-se um béquer e o aparato de medida densidade da balança. Foram realizadas cinco medidas de massa em cada condição. A densidade foi obtida utilizando-se a Equação (6). Este método é uma das principais formas de determinar a densidade de objetos (ASTM, 2010).

Os ensaios foram realizados a uma temperatura de 20° C, o valor da densidade da água nesta temperatura é de 0,9982 g.cm⁻³ (Lide, 2004).

Figura 1 – Amostra da liga Ti-15Mo-5Nb



Fonte: imagens dos autores.

Figura 2 – Kit de densidade volumétrica para balança analítica



Fonte: imagens dos autores.

11

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Densidade

Na tabela 2, pode-se encontrar a liga estudada, juntamente com outras dezessete ligas comerciais de titânio. Podemos notar que, em geral, as ligas calculadas a partir da equação (4), presentes na coluna “Densidade Teórica”, apresentam uma densidade maior do que as densidades que foram obtidas de forma experimental, presentes na coluna “Densidade Experimental”. Isso pode ocorrer, pois as ligas comerciais apresentam uma tolerância em sua composição química em relação a composição nominal, podendo, muitas vezes, existir pequenas diferenças entre os valores (Kuroda, 2020; Martins Jr, 2018).

Tabela 2 – Densidade de ligas de titânio

Ligas de Titânio	Fase	Densidade Teórica (g/cm ³)	Densidade Experimental (g/cm ³)
Ti-6Al-4V	α	4,41	4,41
Ti-6Al-6V-2Sn	α	4,55	4,54

Ti-8Al-1Mo-1V	α	4,43	4,37
Ti-6Al-2Nb-1Ta-0,8Mo	α	4,64	4,48
Ti-5Al-2,5Sn	α	4,48	4,48
Ti-3Al-2,5V	α	4,49	4,48
Ti-5Al-6Sn-2Zr-1Mo-0,25Si	α	4,67	4,51
Ti-6Al-2Sn-6Mo	α	4,79	4,5
Ti-15Mo-5Nb	β	5,05	(5,15 \pm 0,04)
Ti-11,5Mo-6Zr-4,5Sn	β	5,40	5,06
Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	β	5,05	4,82
Ti-10V-2Fe-3Al	β	4,68	4,65
Ti-13V-11Cr-3Al	β	4,95	4,82
Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn	β	4,78	4,7
Ti-15Mo	β	4,95	4,95
Ti-15Mo-5Zr	β	5,06	5,06
Ti-15Mo-5Zr-3Al	β	5,06	5,06
Ti-12V-2,5Al-2Sn-2Zr	β	4,73	4,73

Fonte: (Boyer, 1994; Lide, 2004).

Para obter a densidade experimental foram medidas as massas no ar e imersas no líquido. Os dados podem ser vistos na Tabela 3. Foi utilizada a equação (6) para determinar a densidade experimental da liga.

Tabela 3 – Densidade de ligas de titânio

	Massa no ar (m_{am}) (g)	Massa no líquido (m_{liq})(g)	Densidade (g.cm⁻³)
1º Medida	0,4463	0,3613	5,2411
2º Medida	0,4466	0,3597	5,1299
3º Medida	0,4464	0,3583	5,0578

4° Medida	0,4466	0,3599	5,1418
5° Medida	0,4467	0,3602	5,1548

Fonte: dados dos autores.

Na Tabela 3 nota-se que os valores em cada medida possuem pequenas variações. Para analisar estes vários resultados foi utilizado a teoria de erros. Na Tabela 4 é apresentado os valores: Valor médio da densidade, o desvio médio e a valor real

Tabela 4 – Densidade experimental da liga Ti-15Mo-5Nb

	Densidade (g.cm ⁻³)
Valor médio	5,1451
Desvio Médio	0,04
Valor real	(5,15 ± 0,04)

Fonte: dados dos autores.

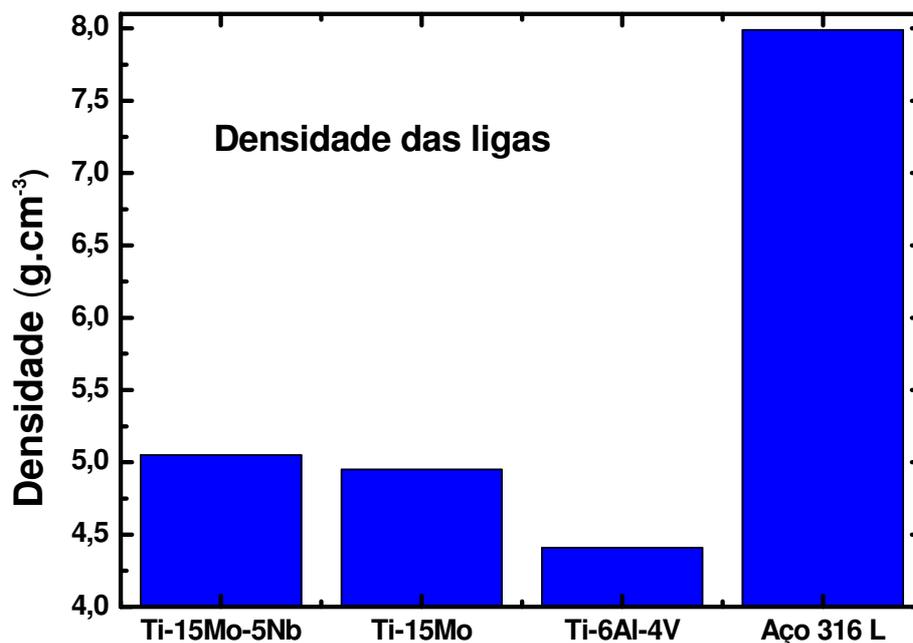
Esse desvio significa que o erro que se comete ao adotar o valor médio ($D = 5,15 \text{ g.cm}^{-3}$) é de $0,04 \text{ cm}^{-3}$ (Santoro, 2008). Em outras palavras, o valor real deve estar entre $5,11$ e $5,19 \text{ g.cm}^{-3}$. Dessa maneira, a densidade da amostra pode ser expressa como $(5,15 \pm 0,04) \text{ g.cm}^{-3}$, visto na tabela 4.

Na Figura 3, foi feito um gráfico com as densidades de algumas ligas de titânio e com a do aço cirúrgico (Park, 2004). Podemos notar, ao analisar essa figura, que a liga de titânio estudada, Ti-15Mo-5Nb, apresenta uma densidade um pouco maior $(5,15 \pm 0,04) \text{ g.cm}^{-3}$ que as outras ligas comerciais comparadas, porém, cerca de 40 % menor que a do aço 316 L ($7,99 \text{ g.cm}^{-3}$). Sendo que o aço 316 L é um material já utilizado na ortopedia no Brasil, pelo sistema único de saúde (SUS). O aço 316 L existe há uma quantidade de 2,5% de molibdênio e no máximo de 0,03 % de carbono em sua composição. Enquanto o aço 316 pode ter em até 0,08% de carbono em sua composição (PARK, 2007).

Além disso, podemos perceber que a liga em questão não apresenta alumínio e nem vanádio. Isso é importante, pois, como citado anteriormente, o vanádio pode causar efeitos

citotóxicos no corpo humano e o alumínio é associado a algumas desordens neurológicas (Jakubowicz, 2020; Zhang, 2020).

Figura 3 – Gráfico da densidade

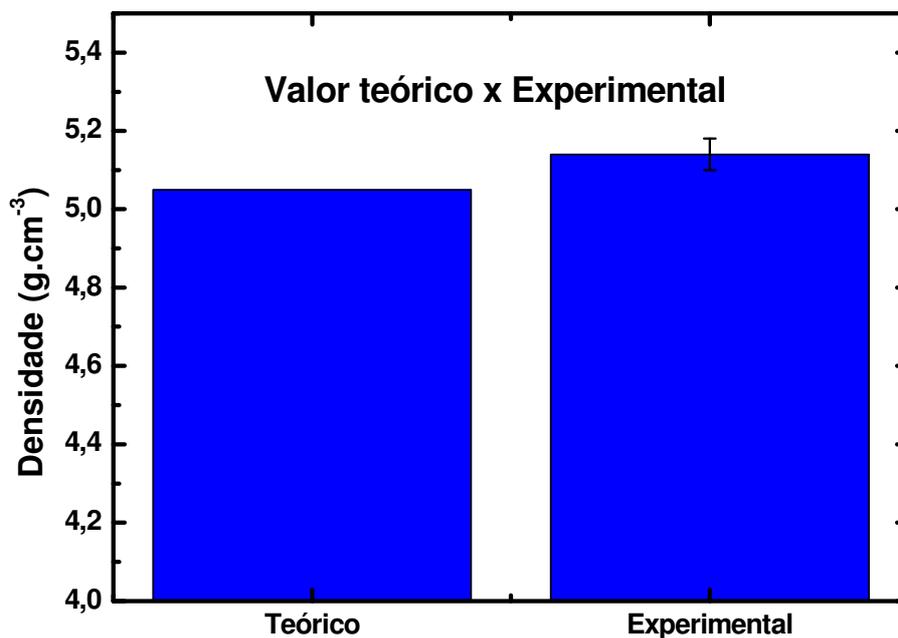


Fonte: dados dos autores.

Na figura 4, pode-se observar uma pequena diferença existente ao comparar as duas formas estudadas de determinar a densidade de uma amostra, ou seja, pela densidade teórica e pelo Princípio de Arquimedes (Keller, 1999). Toda técnica tem suas vantagens e suas limitações (Martins Jr, 2018). No caso do Princípio de Arquimedes, a vantagem é que a densidade pode ser encontrada mesmo não podendo determinar o volume da amostra. A desvantagem, por sua vez, é que quanto menor a massa da amostra, mais influência da agitação do fluido existirá no valor final. Uma terceira forma seria determinar a densidade a partir do seu volume, uma vez, que já temos sua massa. No entanto, as amostras, de modo geral, são irregulares, apresentando imprecisões no valor do volume e posteriormente, em seu valor de densidade (ASTM, 2010; Callister, 2014; Lourenço, 2020). Na Figura 1 é possível

observar que as amostras têm bordas irregulares. As bordas irregulares prejudicam obter o valor correto do volume.

Figura 4 – Gráfico comparativo das 2 formas de densidade



Fonte: dados dos autores.

A medição da densidade experimental apresentou uma diferença com o valor tido como correto (teórico) menos de 1%. Assim, pode-se entender que a técnica experimental baseada no princípio de Arquimedes é bem confiável (Martins Jr, 2016; Lourenço, 2020). Mas para isto, deve-se utilizar uma balança analítica com resolução adequada. E também é necessário determinar a densidade do líquido que a amostra é imersa e também sua temperatura, pois, a temperatura influencia no valor da densidade do líquido.

CONCLUSÕES

Produziu-se uma nova liga de titânio (composição química inédita), sem os elementos alumínio e vanádio. Além disso, possui uma densidade quase 40% menor que a do aço 316 L,

este último que é um material já utilizado na ortopedia no Brasil, pelo sistema único de saúde (SUS).

Foi proposto um modo de calcular a densidade teórica de ligas. Este método foi comparado com a densidade experimental e foi validado.

A técnica de medir a densidade pelo princípio de Arquimedes é uma técnica adequada para o estudo de amostras com formatos irregulares, além de segurança nos resultados. O valor experimental encontrado tem diferença de menos de 1% com o valor tido como correto (teórico).

Assim, os resultados obtidos até o momento mostram que essa liga é uma promissora candidata a biomaterial, pois em relação a uma prótese com o mesmo formato e dimensões (mesmo volume espacial), apresenta uma massa quase 40% menor, proporcionando um maior conforto ao paciente. Ou seja, existe a possibilidade de novos designs de próteses que atendam às necessidades específicas de cada paciente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CBMM pelo fornecimento de nióbio e à FAPESP, CNPq, CAPES, FUNDUNESP pelo suporte financeiro. Ao Instituto Federal de São Paulo (IFSP), Campus Avançado de Tupã, pelo apoio institucional. E ao Prof. Dr. Carlos Roberto Grandini, coordenador do Laboratório de Anelasticidade e Biomateriais da Unesp de Bauru, pelo fornecimento das amostras e auxílio nos ensaios de densidade.

REFERÊNCIAS

ASTM designation C20-00. **Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water**, Philadelphia (USA): ASTM, p.1-3, 2010.

BOYER , R.; WELSCH , G.; COLLINGS , E. W. **Materials Properties Handbook - Titanium Alloys**. ASM International, 1994, p. 1202.

BRASIL, A. N. D. M. Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas. ENERGIA, M. D. M. E. Brasília (BRASIL) 2019.

CALLISTER , W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering : an introduction**. 9ed. ed. Wiley, 2014, p. 990.

CORREA, D. R. N.; KURODA, P. A. B.; GRANDINI, C. R. Structure, Microstructure, and Selected Mechanical Properties of Ti-Zr-Mo Alloys for Biomedical Applications. **Advanced Materials Research**, 922, p. 75-80, 2014.

DONATO, T. A. G.; DE ALMEIDA, L. H.; NOGUEIRA, R. A.; NIEMEYER, T. C. *et al.* Cytotoxicity study of some Ti alloys used as biomaterial. **Materials Science & Engineering C**, 29, n. 4, p. 1365-1369, 2009.

GEETHA, M.; SINGH, A. K.; ASOKAMANI, R.; GOGIA, A. K. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants – A review. **Progress in Materials Science**, 54, n. 3, p. 397-425, 2009.

GRANDINI, C.; KAMIMURA, E.; MARTINS, J.; SANDIM, H. *et al.* Diffusion of Nitrogen in Ti-13V-11Cr-3Al Alloys. **Diffusion in Solids and Liquids Iv**, 283-286, p. 38-44, 2009.

JAKUBOWICZ, J. Special Issue: Ti-Based Biomaterials: Synthesis, Properties and Applications. **Materials**, 13, n. 7, 2020.

KELLER, F. J.; GETTYS, W. E.; SKOVE, J, M. Física. Pearson Education do Brasil, 1999, p. 640.

KURODA, P. A. B.; DE FREITAS QUADROS, F.; SOUSA, K. D. S. J.; DONATO, T. A. G. *et al.* Preparation, structural, microstructural, mechanical and cytotoxic characterization of as-cast Ti-25Ta-Zr alloys. **Journal of Materials Science: Materials in Medicine**, 31, n. 2, p. 19, 2020.

LEYENS, C.; PETERS, M. **Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications**. New York (USA: Wiley-VCH, 2005, 532.

LI, P.; MA, X.; TONG, T.; WANG, Y. Microstructural and mechanical properties of β -type Ti-Mo-Nb biomedical alloys with low elastic modulus. **Journal of Alloys and Compounds**, 815, p. 152412, 2020.

LIDE, D. R. **CRC handbook of chemistry and physics: a ready-reference book of chemical and physical dat**. 85 ed. CRC Press, 2004, p. 2712.

LOURENÇO, M. L.; CARDOSO, G. C.; SOUSA, K. D. S. J.; DONATO, T. A. G. *et al.* Development of novel Ti-Mo-Mn alloys for biomedical applications. **Scientific Reports**, 10, n. 1, p. 6298, 2020.

LÜTJERING, G., R.I.; WILLIAMS, J. **Titanium**. Springer, 2007, p. 431.

MARTINS, JR.; NOGUEIRA, R.; DE ARAUJO, R.; DONATO, T. *et al.* Preparation and Characterization of Ti-15Mo Alloy used as Biomaterial. **Materials Research-Ibero-American Journal of Materials**, 14, n. 1, p. 107-112, 2011.

MARTINS JR, J. R.S. NOGUEIRA, R. A., ARÁUJO, R. O ; GRANDINI, C. R. Diffusion of Oxygen and Nitrogen in the Ti-15Mo Alloy Used for Biomedical Applications. **Defect and Diffusion Forum**, v. 326-328, p. 696-701, 2012. (a)

MARTINS JR, J.R.S., GRANDINI, C.R. Structural characterization of Ti-15Mo alloy used as biomaterial by Rietveld method. **Journal of Applied Physics**, v. 111, p. 083535-8, 2012. (b)

MARTINS JR, J. R. S.; GRANDINI, C. R. The Influence of Heat Treatment on the Structure and Microstructure of Ti-15Mo-xNb System Alloys for Biomedical Applications. **Materials Science Forum**. 783-786: 1255-1260 p. 2014. (a)

MARTINS JR, J. R. S.; KAMIMURA, E. H.; SANDIM, H. R. Z.; GRANDINI, C. R. Anelastic spectroscopy in Ti-13V-11Cr-3Al alloy. *Journal of Materials Science: Springer US*. 22: 7864-7869 p. 2014. (b)

MARTINS JR, J. R. S.; ARÁUJO, R. O.; NOGUEIRA, R. A.; GRANDINI, C. R. Internal Friction and Microstructure of Ti and Ti-Mo Alloys Containing Oxygen. *Archives of Metallurgy and Materials*, 61, n. 1, p. 6, 2016.

MARTINS JÚNIOR, J. R. S.; MATOS, A. A.; OLIVEIRA, R. C.; BUZALAF, M. A. R. *et al.* Preparation and characterization of alloys of the Ti-15Mo-Nb system for biomedical applications. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*, 106, n. 2, p. 639-648, 2018.

PARK; J; S, L. R. **Biomaterials:An Introduction**. Springer-Verlag New York, 2007, p. 562.

RATNER , B. D.; HOFFMAN , A. S.; SCHOEN , F. J.; LEMONS, J. E. **Biomaterials Science**. 3 ed. Academic Press, 2012, p. 1600 p.

SANTORO, A.; MAHON, J. R.; OLIVEIRA, J. H. C. L.; MUNDIM FILHO, L. M. *et al.* **Estimativas e erros em experimentos de física**. 2 ed. EdUERJ, 2008, p.140.

ZHANG, Y.; SUN, D.; CHENG, J.; TSOI, J. K. H. *et al.* Mechanical and biological properties of Ti-(0-25 wt%)Nb alloys for biomedical implants application. *Regenerative Biomaterials*, 7, n. 1, p. 119-127, 2020.