



## ESTRUTURA E PROPRIEDADES DAS LIGAS TEMPERADAS DE Ti-(32-4x)%Nb-x%Mo<sup>1</sup>

Marília Santos de Souza<sup>2</sup>

Liudmila Aleksandrovna Matlakhova<sup>3</sup>

Anatoliy Nikolaevich Matlakhov<sup>4</sup>

Herval Ramos Paes Júnior<sup>5</sup>

Boris Andreevich Goncharenko<sup>6</sup>

### Resumo

O presente trabalho tem por objetivo investigar a influência de Mo e Nb nas microestruturas e propriedades das ligas temperadas do sistema Ti-(32-4x)%Nb-x%Mo, com o teor de Mo variando de 1 a 4% e o de Nb de 28 a 16%, em peso. A análise microestrutural foi feita por microscopia ótica e difração de raios X. Avaliaram-se propriedades das ligas como densidade, microdureza e resistividade elétrica. As microestruturas das ligas apresentam as fases  $\beta$  metaestável, martensitas  $\alpha''/\alpha'$  e  $\omega$ , em proporções dependentes de suas composições. O aumento do teor de Mo, de 1 a 3%, favorece a estabilização da fase  $\beta$ , sendo que na liga 3%Mo,  $\beta$  é dominante. Contudo, na liga 4%Mo, a martensita  $\alpha''$  reaparece. Os valores de microdureza nos grãos com estrutura  $\alpha''/\alpha'$  é maior do que nos grãos com a fase  $\beta$ . A formação da fase  $\omega$ , nas ligas com teores de 2 e 3%Mo, resulta em um acréscimo na resistividade.

**Palavras-chave:** Ligas Ti-Nb-Mo; Análise microestrutural; Microdureza

### STRUCTURE AND PROPERTIES OF QUENCHED Ti-(32-4x)%Nb-x%Mo ALLOYS

#### Abstract

The aim of this work is to investigate the influence of Mo and Nb contents in the microstructure and properties of quenching Ti-(32-4x)%Nb-x%Mo alloys, where Mo contents ranging from 1 to 4 wt% and Nb from 28 to 16 wt%. The microstructural analyses were done by optical microscopy and X-ray diffractometry. The properties of alloys such as density, Vickers microhardness and electrical resistivity were studied. The microstructures of the alloys show the metastable phases  $\beta$ , martensites  $\alpha''/\alpha'$  and  $\omega$ , whose proportions depend on alloy composition. The increasing content of Mo, from 1 to 3%, favors the stabilization of  $\beta$  phase, and in 3%Mo alloy, the  $\beta$  phase is dominant. However, in 4% Mo alloy, the martensite  $\alpha''$  appears again. The microhardness values in  $\alpha''/\alpha'$  grains are greater than those in  $\beta$  phase. The  $\omega$  phase formation in alloys with 2 and 3% Mo contents results in an increase in electric resistivity.

**Key Words:** Ti-Nb-Mo alloys; Microstructural analysis; Microhardness

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Aluna de Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, LAMAV/CCT/UENF. Av. Alberto Lamego 2000, Parque Califórnia, Campos dos Goytacazes, RJ, CEP: 28015-620, marília\_souza@ymail.com

<sup>3</sup> Eng.º Metalúrgico M.Sc., Ph.D., Professora Associada, LAMAV/CCT/UENF. liudmila@uenf.br

<sup>4</sup> Eng.º Metalúrgico M.Sc., Ph.D., Professor Associado, LAMAV/CCT/UENF. anatoli@uenf.br

<sup>5</sup> Eng.º Elétrico M.Sc., Ph.D., Professor Associado, LAMAV/CCT/UENF. herval@uenf.br

<sup>6</sup> Ph.D., Senior Researcher, IMET, Russian Academy of Science, Moscow, Russia. pali@ultra.imet.ac.ru

## 1 INTRODUÇÃO

O titânio e suas ligas contendo  $\beta$ -estabilizadores têm despertado interesse de muitos engenheiros e cientistas por apresentarem propriedades mecânicas, físicas e químicas essenciais, entre as quais se destacam: baixa densidade, alta resistência mecânica e alta resistência à corrosão.<sup>(1-3)</sup>

Dependendo do teor de elementos  $\beta$ -estabilizadores, as ligas de titânio no estado estável possuem estruturas compostas por fases estáveis, como  $\alpha$  (HC) e  $\beta$  (CCC), em proporções variáveis.<sup>(1-3)</sup> Porém, caso o equilíbrio termodinâmico não seja alcançado, podem ser formadas fases metaestáveis tais como as martensitas  $\alpha'$ (HC),  $\alpha''$ (Ortorrômbica),  $\beta$ -metaestável e  $\omega$ (HCC).<sup>(2,3)</sup> Com a estrutura de fases metaestáveis, as ligas de titânio podem exibir efeitos não elásticos, incluindo o efeito de memória de forma, superelasticidade e o considerável fenômeno de amortecimento devido ao alto atrito interno, que ocorre nas ligas no intervalo de transformações martensíticas.<sup>(3-6)</sup> Além disso, estudos têm demonstrado que o titânio e suas ligas possuem excelente compatibilidade com o corpo humano, se tornando um biomaterial metálico de grande valia em implantes.<sup>(1-4)</sup>

Como as ligas de titânio com elementos  $\beta$ -estabilizadores ainda estão em fase de pesquisa e desenvolvimento, a importância deste trabalho consiste em aprimorar o conhecimento, visando possível aplicação das ligas em várias áreas, como a indústria química, medicina, equipamentos especiais. Estas ligas também têm importância para Região Norte Fluminense, que possui uma das maiores bacias petrolíferas do Brasil, podendo ser utilizadas no setor *off-shore* e em vários equipamentos submersos.

O principal objetivo do presente trabalho é a caracterização microestrutural e estudo de algumas propriedades de quatro ligas temperadas do sistema Ti-(32-4x)%Nb-x%Mo (% em peso), onde o molibdênio substitui o nióbio em proporção 1:4, avaliando a influência conjunta desses dois elementos  $\beta$  estabilizadores.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

No presente trabalho, foram estudadas quatro ligas do sistema Ti-(32-4x)%Nb-x%Mo, com os teores de Nb e Mo variando de 16% a 28% e de 1% a 4% (% em peso), respectivamente. As ligas foram produzidas pela técnica de cinco fusões em forno elétrico a arco no Instituto de Metalurgia e de Materiais (IMET), em Moscou. As ligas foram homogeneizadas a 1.200°C em ampolas evacuadas de quartzo, forjadas a quente em atmosfera protetora, recozidas, temperadas em água e deformadas a frio, com deformação de até 20%. Após isso, as amostras foram submetidas ao recozimento a 800°C, durante 10 horas, em ampolas de quartzo evacuadas e, em seguida, partindo da mesma temperatura, foram temperadas em água fria.

Para a determinação da densidade das ligas foi utilizado o método de pesagem hidrostática. Para fins de comparação, a densidade das ligas também foi estimada com base nas suas composições químicas.

A preparação metalográfica das ligas foi feita através do embutimento a frio, lixamento, polimento e ataque com uma solução de 25 ml de ácido nítrico, 25 ml de ácido fluorídrico e 50 ml de glicerina.

A caracterização das ligas foi realizada através das técnicas de microscopia ótica, microdureza, difração de raios X (DRX) e resistividade elétrica. As observações das microestruturas foram realizadas através do microscópio ótico

Neophot-32, em regime de observação campo claro (CC) e interferência diferencial (ID), utilizando aumentos de 50x a 400x.

A composição física foi determinada pela análise de DRX à temperatura ambiente, usando um difratômetro SHIMADZU modelo XRD7000, empregando-se radiação Cu-K $\alpha$ , em um intervalo de 2 $\theta$  de 20° a 100°, com passo de varredura de 0,03° e tempo de 3s.

A resistividade elétrica foi medida através do método de quatro pontas, usando os equipamentos fonte de tensão TECTRONIX PS2520G, multímetro Agilent 34420A e ponteira de 4 pontas CASCADE. Neste método, duas das quatro pontas são usadas para transportar uma corrente elétrica ( $i$ ) e as outras duas para monitorar a tensão ( $V$ ). Os valores da resistividade foram obtidos através da equação (1) apresentada no trabalho de Giroto e Santos:<sup>(7)</sup>

$$\rho = \frac{V \cdot 2 \pi s}{i} \quad (1)$$

onde:  $V$  - tensão ( $\mu V$ );  $i$  - corrente (mA);  $s$  - distância entre as ponteiras que é igual a 0,001 m.

Os ensaios de microdureza foram realizados com o auxílio de um microdurômetro modelo MHP-160 adaptado ao microscópio JENAVENT. A microdureza Vickers, expressada em ( $kgf/mm^2$ ), foi determinada pela equação (2):

$$HV = \frac{1854 F}{d^2} \quad (2)$$

onde:  $F$  - carga aplicada à amostra (g);  $d$  - diagonal da impressão obtida na amostra ( $\mu m$ ); 1854 - fator de conversão das unidades.

O ensaio de microdureza foi realizado nas quatro amostras. Foram efetuadas 14 medidas em cada amostra, sendo 7 executadas nos grãos da fase  $\beta$ , enquanto as demais nos grãos de martensitas  $\alpha''/\alpha'$ , com uma carga de 40g em toda superfície das amostras, objetivando-se alcançar maior área possível da superfície das amostras. Foi feita análise estatística dos resultados obtidos através do cálculo da média, desvio padrão ( $\sigma$ ) e erro absoluto ( $\epsilon$ ), para cada amostra.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Análise de Densidade Experimental e Teórica

A Tabela 1 apresenta a comparação entre a densidade teórica e experimental das ligas estudadas. Pode-se notar que o aumento do teor de Mo provocou uma diminuição da densidade das ligas. Tal fato faz sentido, uma vez que ao aumentar a quantidade de Mo em peso, cuja densidade é 10,2  $g/cm^3$ , que substitui o Nb (8,57  $g/cm^3$ ) na proporção de 1:4, há um aumento no teor de Ti, que tem densidade inferior (4,51  $g/cm^3$ ).

Pode-se observar também que os valores de densidade experimental foram bem próximos aos valores teóricos calculados, evidenciando, portanto, que as composições das ligas preparadas ficaram bastante próximas à composição nominal.

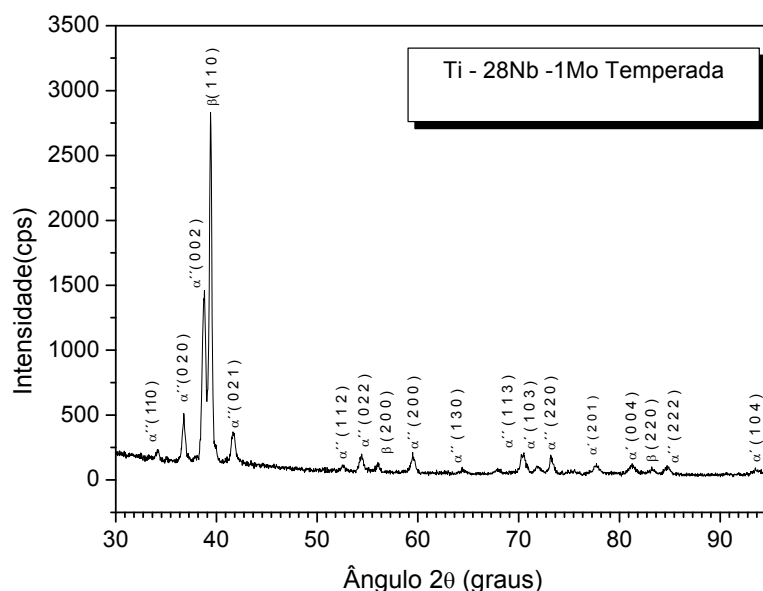
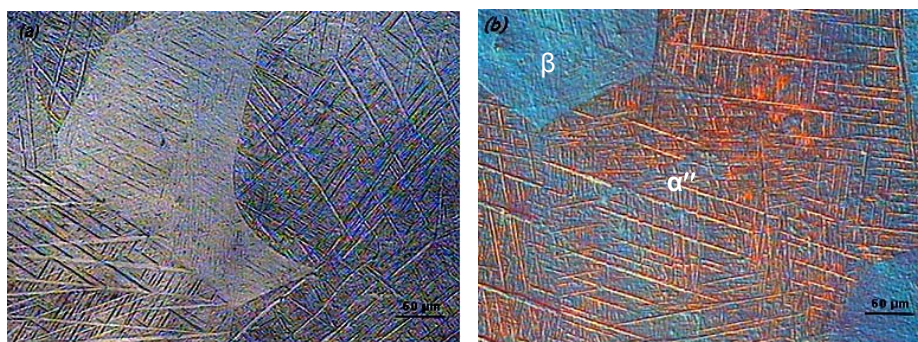
**Tabela 1.** Densidades experimental ( $d_{exp}$ ) e teórica ( $d_{teor}$ ) das ligas Ti-(32-4x)%Nb-x%Mo

Composição da liga	$d_{exp}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$d_{teor}$ (g/cm <sup>3</sup> )
Ti-28%Nb-1%Mo	5,2104	5,2334
Ti-24%Nb-2%Mo	5,1294	5,1534
Ti-20%Nb-3%Mo	5,0784	5,0759
Ti-16%Nb-4%Mo	4,9870	5,0006

## 3.2 Análise Estrutural

### 3.2.1 Liga Ti-28%Nb-1%Mo

Através da análise de difração de raios X da liga Ti-28%Nb-1%Mo, apresentada na Figura 1, foi determinado que a sua estrutura é composta pelas fases principais  $\beta$ (CCC) e martensita  $\alpha''$ (Ortorrômbica), com traços da fase martensítica  $\alpha'$ (HC). A fase martensítica  $\alpha''$  foi identificada por seus picos característicos  $(020)_{\alpha''}$  e  $(022)_{\alpha''}$ ,  $(021)_{\alpha''}$ , enquanto a fase  $\beta$  pelo pico característico  $(110)_{\beta}$ .

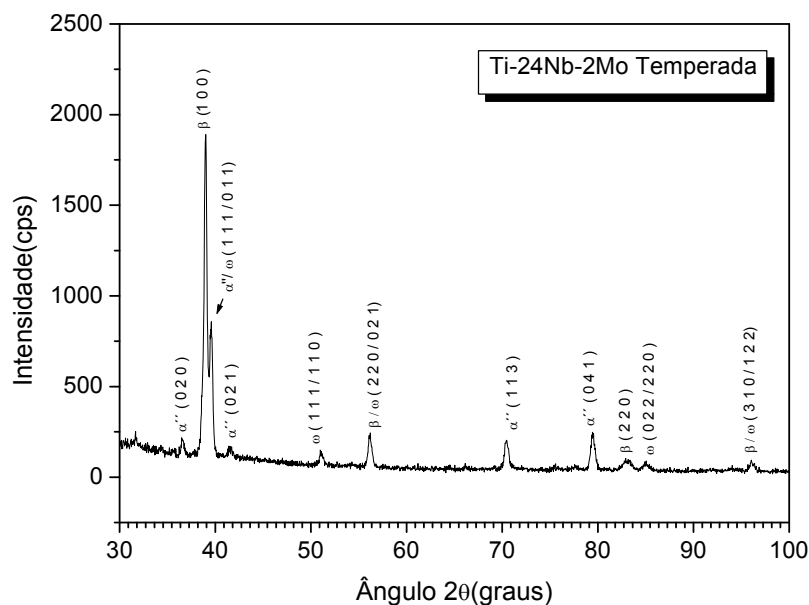
**Figura 1.** Difratoograma da liga Ti-28%Nb-1%Mo.**Figura 2.** Micrografias da liga Ti-28%Nb-1%Mo em (a) CC, 200x, (b) ID, 200x.

É possível observar através das micrografias apresentadas na Figura 2, que esta liga temperada possui uma microestrutura predominantemente bifásica,

constituída de grãos da fase  $\beta$  e grãos com a fase martensítica  $\alpha''$ , que é revelada por sua morfologia típica.

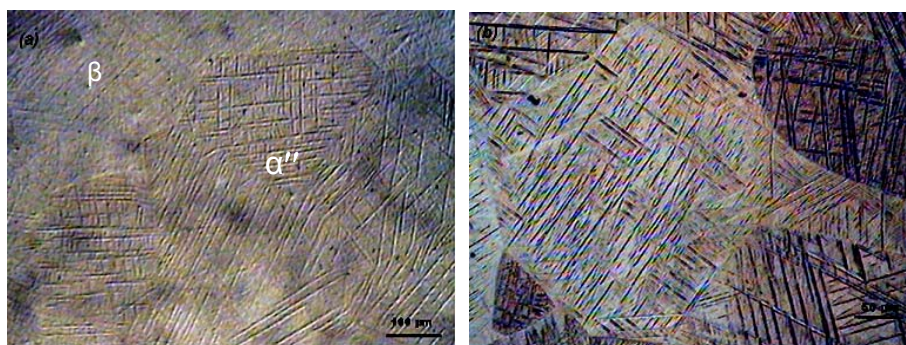
### 3.2.2 Liga Ti-24%Nb-2%Mo

De acordo com a análise do difratograma obtido da liga Ti-24%Nb-2%Mo, exposto na Figura 3, a estrutura é composta pela fase  $\beta$ (CCC), que foi identificada pelo pico característico de alta intensidade  $(110)_{\beta}$  e pela fase martensítica  $\alpha''$ , cujos picos característicos são  $(111)_{\alpha''}$ ,  $(113)_{\alpha''}$ , e  $(041)_{\alpha''}$ . Além destas, a fase  $\omega$ , em menor quantidade, também foi notada. A fase  $\omega$  foi identificada pelos picos característicos  $(011)_{\omega}$ ,  $(021)_{\omega}$  e  $(022/220)_{\omega}$ .



**Figura 3.** Difratograma da liga Ti-24%Nb-2%Mo.

As micrografias, apresentadas na Figura 4 mostram que a microestrutura da liga Ti-24%Nb-2%Mo é constituída de grãos da fase  $\beta$  (Figura 4a) e  $\alpha''$  (Figura 4(a,b)). A morfologia, típica para a martensita  $\alpha''$ , formada nos grãos da fase  $\beta$  transformada, revela a posição aleatória dos grãos.



**Figura 4.** Micrografias da Liga Ti-24%Nb-2%Mo no (a) centro, CC, 125x, (b) na borda, CC, 200x.

### 3.2.3 Liga Ti-20%Nb-3%Mo

O difratograma da liga Ti-20%Nb-3%Mo é apresentado na Figura 5. Observa-se que esta liga possui uma estrutura composta pela fase  $\beta$ , majoritária, que foi identificada pelos picos característicos  $(110)_\beta$ ,  $(220)_\beta$ ,  $(310)_\beta$ . Além da fase principal, também foram determinados traços da fase  $\omega$  e  $\alpha''$ , sendo esta identificada através dos respectivos picos  $(111)_{\alpha''}$ ,  $(113)_{\alpha''}$ .

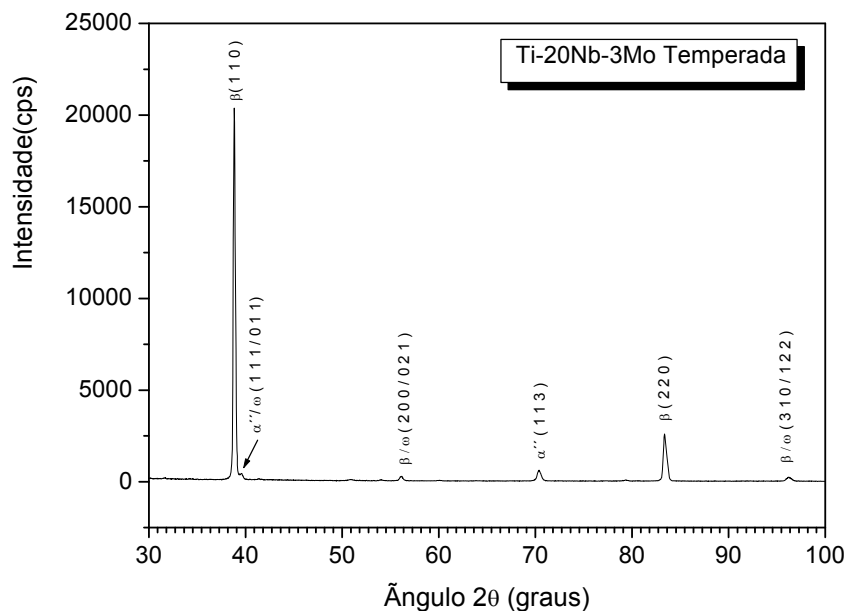


Figura 5. Difratograma da liga Ti-20%Nb-3%Mo.

As micrografias, apresentadas na Figura 6, confirmam que a liga Ti-20%Nb-3%Mo possui em sua microestrutura grãos martensíticos  $\alpha''$  e grãos da fase  $\beta$ .

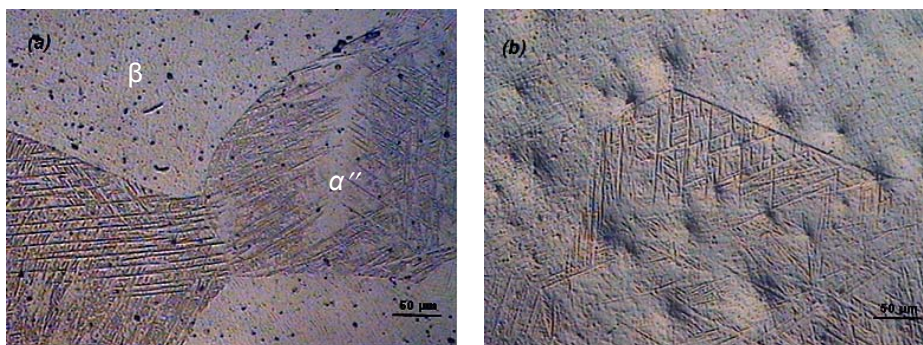
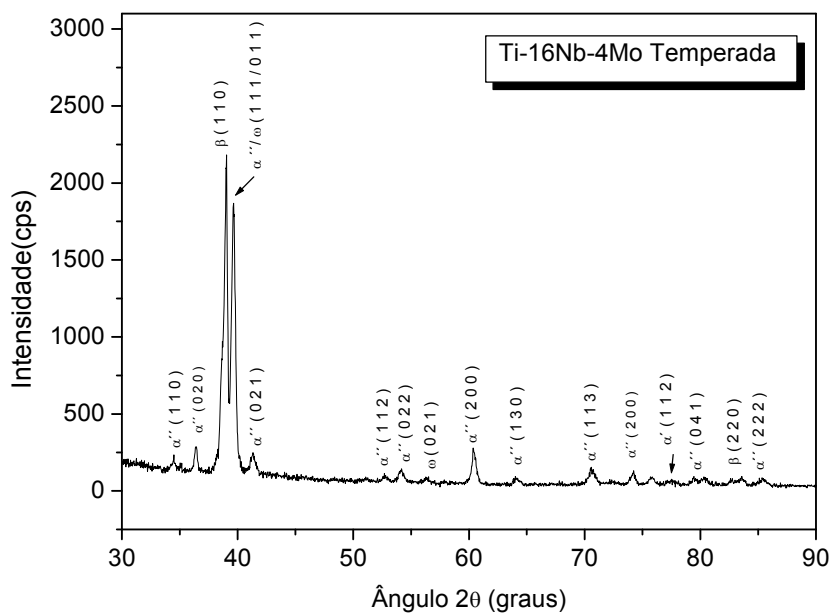


Figura 6. Micrografias da liga Ti-20%Nb-3%Mo em (a,b) CC, 200x.

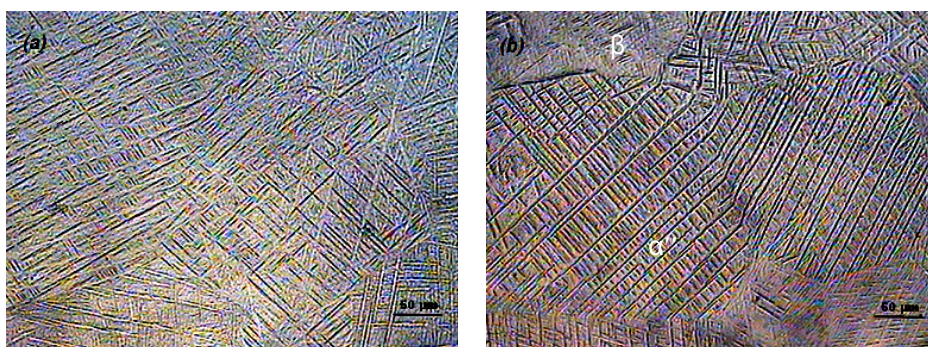
### 3.2.4 Liga Ti-16%Nb-4%Mo

Através da análise de difração de raios X da liga Ti-16%Nb-4%Mo, apresentada na Figura 7, é possível detectar que a estrutura desta liga é composta pelas fases principais  $\beta$ (CCC) e martensita  $\alpha''$ , além de apresentar traços das fases martensita  $\alpha'$ (HC) e ômega  $\omega$ (HCC). A fase martensítica  $\alpha''$  foi identificada por seus picos característicos  $(110)_{\alpha''}$ ,  $(020)_{\alpha''}$ ,  $(111)_{\alpha''}$  e  $(200)_{\alpha''}$ . A fase  $\beta$  foi identificada pelo pico característico de alta intensidade  $(110)_\beta$ . A presença da fase  $\omega$ (HCC) foi comprovada pelos pico  $(021)_\omega$ .



**Figura 7.** Difratoograma da liga Ti-16%Nb-4%Mo.

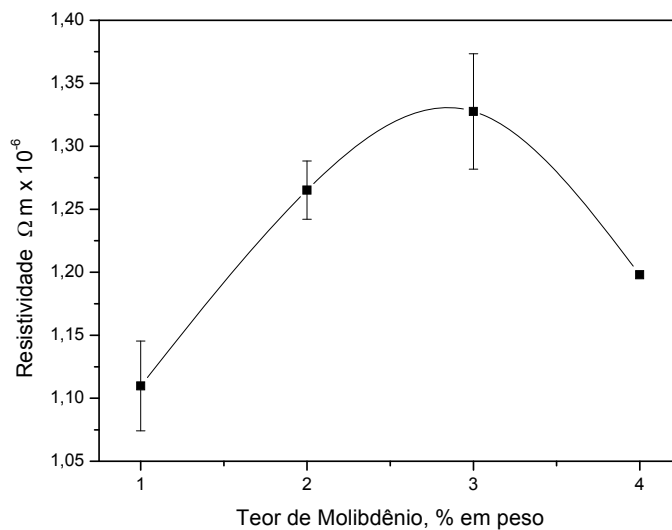
A análise por microscopia ótica da liga Ti-16%Nb-4%Mo revelou que a sua microestrutura é composta pela fase  $\alpha''$ , obtendo-se regiões da amostra que apresentam uma morfologia completamente martensítica, com lamelas distribuídas em grãos da fase  $\beta$  com orientação espacial aleatória (Figura 8a). Outra região da amostra apresenta microestrutura formada pelas fases  $\beta$  e  $\alpha''$  (Figura 8b).



**Figura 8.** Micrografias da Liga Ti-16%Nb-4%Mo em (a,b) CC, 200x.

### 3.3 Análise de Resistividade Elétrica

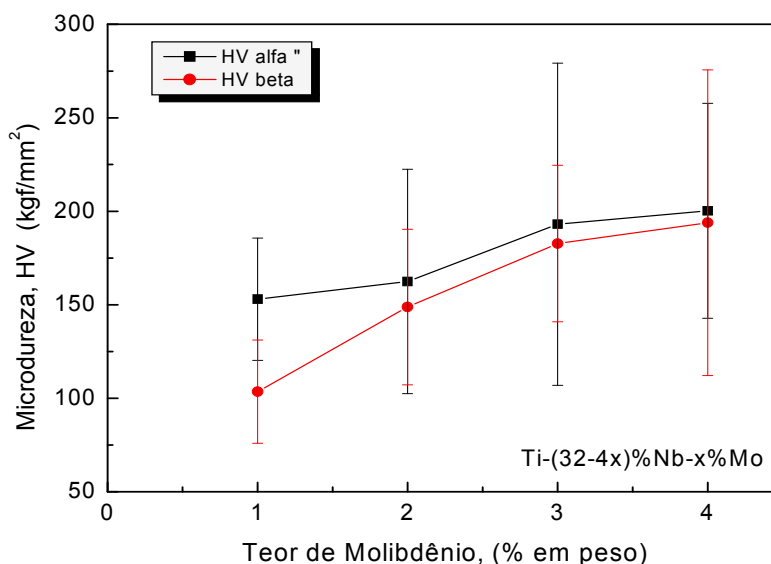
A Figura 9 apresenta a variação da resistividade elétrica das ligas em função do teor de Mo. Observa-se que o aumento do teor de Mo de 1% a 3%, com a proporcional diminuição de Nb de 28% a 20% respectivamente, provoca um aumento na resistividade dessas ligas. A resistividade na liga Ti-28%Nb-1%Mo, determinada como  $1,11 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ , aumentou para  $1,33 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ , na liga Ti-20%Nb-3%Mo. O aumento da resistividade elétrica nestas ligas é concomitante ao aumento da participação da fase  $\beta$  na estrutura (Figuras 1, 3, 5). Nota-se ainda uma diminuição do valor da resistividade elétrica da liga Ti-16%Nb-4%Mo, para  $1,20 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$  (Figura 9), quando na estrutura, além da fase  $\beta$ , reaparece a martensita  $\alpha''$  (Figura 7).



**Figura 9.** Resistividade elétricas das ligas do sistema Ti-(32-4x)%Nb-x%Mo.

### 3.4 Análise de Microdureza Vickers

O gráfico na Figura 10 apresenta como alteram os valores da microdureza (HV) determinada nas ligas investigadas em regiões diferentes (com fases  $\alpha''$  e  $\beta$ ). Os resultados mostram que com o aumento do teor de Mo e diminuição de Nb, os valores de HV aumentam tanto na fase  $\alpha''$  (de  $153,0 \pm 32,6 \text{ kgf/mm}^2$  até  $200,2 \pm 57,5 \text{ kgf/mm}^2$ ) quanto na fase  $\beta$  (de  $103,6 \pm 27,6 \text{ kgf/mm}^2$  até  $194,0 \pm 81,7 \text{ kgf/mm}^2$ ). Observa-se ainda que a HV da fase  $\beta$  aumenta quase linearmente com aumento de Mo de 1% a 3%.



**Figura 10.** Representação gráfica da variação da microdureza.



## 4 DISCUSSÃO

Os resultados da difração de raios X, apresentados na Tabela 2, revelam que a estrutura das ligas do sistema Ti-Nb-Mo estudado, onde o Mo substitui o Nb em proporção de 1:4, é composta principalmente pelas fases  $\beta$  e  $\alpha''$ , apresentando também, em menor participação, as fases  $\alpha'$  e  $\omega$ .

**Tabela 2.** Composição física das ligas do sistema Ti-(32-4x)-%Nb-x%Mo

Liga	Fases presentes
Ti-28%Nb-1%Mo	$\beta + \alpha'' + ((\alpha'))$
Ti-24%Nb-2%Mo	$\beta + \alpha'' + (\omega)$
Ti-20%Nb-3%Mo	$\beta + ((\alpha'' + \omega))$
Ti-16%Nb-4%Mo	$\beta + \alpha'' + ((\omega + \alpha'))$

Nas ligas investigadas, o aumento do teor de Mo de 1 a 3%, substituindo o Nb em proporção 1:4, contribui para a estabilização da fase  $\beta$ , sendo que na liga Ti-20%Nb-3%Mo, a fase  $\beta$  é dominante. Entretanto, aumento posterior de Mo até 4%, não é suficiente para manter a estrutura de  $\beta$  monofásica, na liga Ti-16%Nb-4%Mo, a estrutura é bifásica, composta por  $\alpha''$  e  $\beta$  fases.

Segundo Fedotov et al.<sup>(5)</sup> e Fedotov, Konstantinov e Sinodova,<sup>(6)</sup> as ligas do sistema Ti-Nb temperadas a partir de 1000°C em água e contendo até 12%Nb possuem a estrutura martensítica  $\alpha'$ (HC). Acima deste teor, até 16%Nb, aparece a martensita  $\alpha''$ . Nas ligas com até 28%Nb, a estrutura é composta por fases  $\alpha'' + \omega + (\beta)$ . Em ligas com 30%Nb a 40%Nb, a participação das fases  $\alpha''$  e  $\omega$  diminui e a da  $\beta$  aumenta até que acima de 40%Nb, a estrutura é composta somente pela fase  $\beta$ .<sup>(6)</sup> A estrutura das ligas é sensível ao método de tratamento térmico aplicado. Assim, as ligas fundidas do sistema Ti-Nb, segundo Lee, Ju e Chern,<sup>(8)</sup> revelam outra variação da estrutura metaestável com o teor de Nb. As ligas contendo até 15%Nb possuem estrutura essencialmente martensítica  $\alpha'$ (HC). Ao se elevar tal teor, junto à faixa de valores entre 17,5 e 25%Nb, o resfriamento rápido conduz à formação de martensita  $\alpha''$ . Quando tal teor atinge valores próximos a 27,5%Nb, a microestrutura dessa liga é constituída pela fase  $\beta$  metaestável.

Segundo Williams e Lütjering,<sup>(9)</sup> Bania,<sup>(10)</sup> Weiss e Semiatin<sup>(11)</sup> e Collings,<sup>(3)</sup> o Mo é um elemento  $\beta$  estabilizador isomórfico bastante efetivo. Para estabilizar a fase  $\beta$  metaestável, é suficiente conter 10% de Mo na liga temperada, enquanto o teor de Nb tem que ser maior, de 36%<sup>(10,11)</sup> a 40%.<sup>(5,6)</sup>

Nas ligas investigadas, contendo de 1%Mo a 3%Mo, a substituição de Mo pelo Nb em proporção 1:4 facilita a estabilização da fase  $\beta$  metaestável até que esta fase aparece como a principal na liga Ti-20%Nb-3%Mo. Com aumento da participação da fase  $\beta$ , aumentam os valores de resistividade elétrica. O aumento do teor de Mo promove não somente a estabilização da fase  $\beta$ , mas também a formação da fase  $\omega$  que é o maior agente fragilizador das ligas de Ti- $\beta$ , proporcionando, entre outras conseqüências, o aumento da resistividade elétrica destas ligas.<sup>(3,5)</sup>

Nas ligas analisadas, contendo de 1%Mo a 3%Mo, com a estabilização da fase  $\beta$  ainda aumentam os valores da microdureza (HV), medida nos grãos da fase  $\beta$  e da martensita. Nota-se, então, que os valores HV da fase martensítica são



superiores da fase  $\beta$ , em todas as ligas investigadas. Além disso, a diferença em HV entre as duas fases diminui com maior participação na composição de Mo.

No trabalho de Fedotov et al.,<sup>(5)</sup> a resistividade ( $\rho$ ) das ligas Ti-Nb temperadas aumenta com aumento do teor de Nb na solução sólida até 28%Nb, acompanhando a formação das fases martensíticas  $\alpha'$  e  $\alpha''$ , atingindo maiores valores com a estrutura complexa de  $\alpha''+(\beta/\omega)$ . Com maior teor de Nb e diminuição da participação das fases  $\alpha''$  e  $\omega$ , os valores de  $\rho$  diminuem até um mínimo, mas voltam a aumentar com a estabilidade posterior da fase  $\beta$ .

No que tange a microdureza, o valor de HV, determinado nas fases formadas nas ligas Ti-Nb fundidas, segundo Lee, Ju e Chern,<sup>(8)</sup> evolui de acordo com a seqüência:  $\omega > \alpha' > \alpha'' > \beta > \alpha$ . Entretanto, vale notar que a fase  $\omega$  não pode ser identificada através de microscopia óptica, não sendo possível, portanto, calcular o valor de HV desta fase isoladamente. No trabalho de Santos, Matlakhova, e Matlakhov,<sup>(12)</sup> o valor da microdureza (HV) das ligas temperadas Ti-Nb-2%Al, com aumento do teor de Nb de 15% a 40%, evolui em seqüência  $\alpha' < \alpha'' > \beta$ , a saber, maiores valores de HV foram determinadas nas ligas com estrutura  $\alpha''$ .

Os resultados obtidos no presente trabalho revelam boa concordância com a literatura, pois confirmam que as fases martensíticas apresentam dureza maior que a da fase  $\beta$ .

Entretanto, na liga com 4%Mo e 16%Nb, a fase da martensita  $\alpha''$  reaparece, revelando que essa quantidade de Mo e Nb possa não ser suficiente para estabilizar completamente a fase  $\beta$ . Nessa liga, diminui o valor da resistividade elétrica, enquanto que os valores da microdureza, determinada nos grãos da fase  $\beta$  e da martensita  $\alpha''$ , ficam muito próximos entre si, e são ligeiramente mais altos, comparando com a liga Ti-20%Nb-3%Mo.

## 5 CONCLUSÕES

As microestruturas das ligas temperadas do sistema Ti-(32-4x)-%Nb-x%Mo, onde o Nb é substituído pelo Mo em proporção 1:4, apresentam as fases:  $\beta$  metaestável, martensítica  $\alpha''$  e  $\omega$ , em proporções dependentes de suas composições. A adição de 1 até 3%Mo, com a diminuição proporcional de Nb, favorece a estabilização da fase  $\beta$  até que a mesma é predominante na liga com 3%Mo.

Aumento dos valores da microdureza e da resistividade elétrica, observado nas ligas com 1 a 3%Mo, pode ser correlacionado com maior enriquecimento da solução sólida à base de Ti com elementos  $\beta$ -estabilizadores, Nb e Mo, e com estabilização da fase  $\beta$ . Um acréscimo adicional dos valores de  $\rho$  e HV podem ser atribuídos a uma pequena participação da fase  $\omega$ , endurecedora, determinada nas ligas com participação de Mo de 2% a 4%.

Com o aumento do teor de Mo de 1 até 3% e estabilização da fase  $\beta$ , a resistividade elétrica das ligas aumenta de  $1,11 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$  a  $1,33 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ . Determinou-se que as ligas com 2% e 3%Mo apresentam maiores valores de resistividade elétrica:  $1,26 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$  e  $1,33 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ , respectivamente, devido ao maior enriquecimento da solução sólida, maior estabilização da fase  $\beta$  e ainda à presença de fase  $\omega$  em sua estrutura. Na liga com 4%Mo, com a estrutura  $\beta + \alpha''$ , com a diminuição da estabilidade da fase  $\beta$ , o valor de resistividade elétrica diminui para  $1,20 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ .



A microdureza tanto da fase  $\alpha''$ , quanto da  $\beta$ , aumentou seu valor com o aumento do teor de Mo, de  $153,0 \pm 32,6$  kgf/mm<sup>2</sup> até  $200,2 \pm 57,5$  kgf/mm<sup>2</sup> ( $\alpha''$ ) e de  $103,6 \pm 27,6$  kgf/mm<sup>2</sup> até  $194,0 \pm 81,7$  kgf/mm<sup>2</sup> ( $\beta$ ), revelando a correlação entre a composição das ligas, estrutura e propriedade. Conclui-se também que a fase martensítica  $\alpha''$  apresenta valores de HV mais elevados que os da fase  $\beta$  metaestável em todas as ligas investigadas.

Na liga com 4%Mo e 16%Nb, a fase da martensita  $\alpha''$  reaparece, revelando que essa quantidade de elementos  $\beta$  estabilizadores, Mo e Nb, não é suficiente para estabilizar completamente a fase  $\beta$ . Entretanto, esse fato ainda tem que ser investigado com maior atenção.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da FAPERJ, CAPES e PIBIC/UENF pelo financiamento desta pesquisa. Agradecimentos especiais a equipe do Laboratório 8 do IMET (Moscou) e do Setor de Metalurgia Física do LAMAV/UENF pela preparação das ligas e realização dos ensaios.

## REFERÊNCIAS

- 1 DONACHIE, M.J Junior. **Titanium: a technical guide**. 2ed. United States of America: ASM International, 2000.
- 2 LEYENS, C.; PETERS, M. **Titanium and Titanium Alloys**. Germany: Wiley-VCH GmbH & Co. KGaA, 2003.
- 3 COLLINGS, E.W. **The Physical Metallurgy of Titanium Alloys**. ASM. Ed. Metals Park, 1984.
- 4 AI-ZAIN, Y., KIM, H.Y., HOSODA, H., NAM, T.H., MIYAZAKI, S. Shape memory properties of Ti-Nb-Mo biomedical alloys. **Acta Materialia**, v. 58, p. 4212–4223, 2010.
- 5 FEDOTOV, S.G. KONSTANTINOV, K.M., KOKNAEV, R.G., SINODOVA, E.P. Estrutura, Propriedades e decomposição da martensita nas ligas de titânio - nióbio. In: **Ligas de Titânio com Propriedades Especiais**. Moscou: Nauka, p. 29-32, 1982.
- 6 FEDOTOV, S.G. KONSTANTINOV, K.M., SINODOVA, E.P. Propriedades, estruturas e transformações nas ligas temperadas de titânio - nióbio com estruturas ( $\alpha'+\omega+\beta$ ), ( $\omega+\beta$ ) e  $\beta$ . In: **Ligas de Titânio com Propriedades Especiais**. Moscou: Nauka, p. 78-82, 1982.
- 7 GIROTTI, E.M., SANTOS, I.A. Medidas de Resistividade Elétrica dc em Sólidos: Como Efetuá-las Corretamente. **Química Nova**, Vol. 25, No.4, p. 639-647, 2002.
- 8 LEE, C.M.; JU, C.P E CHERN LIN, J.H. Structure-property relationship of cast Ti-Nb alloys. **Journal of Oral Rehabilitation**, 29, p. 314-322, 2002.
- 9 WILLIAMS, J.E., LÜTJERING, C. **Titanium**, Berlin: Springer-Verlag Heidelberg, 2003.
- 10 BANIA, P. J. Beta titanium alloys and their role in the titanium industry. **Journal of Metals**, v.46, n.7, p.16-19, 1994.
- 11 WEISS, I., SEMIATIN, S.L. Thermo-mechanical processing of beta titanium alloys—an overview. **Materials Science and Engineering**, A243, p. 46–65, 1998.
- 12 SANTOS, L.C.O., MATLAKHOVA, L.A., MATLAKHOV, A.N. Influência do teor de Nb na microdureza das ligas Ti-Nb-2Al temperadas. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 62<sup>o</sup>, 2007, Vitória – ES. Anais ... São Paulo, 2007, fasc. 12428, p. 1-9.