

INFLUÊNCIA DE TRATAMENTOS TÉRMICOS NA ESTRUTURA E MICRODUREZA DO Ti (TITÂNIO) GRAU 4

José Claudio Lopes, Fábio Bossoi Vicente, Luciano Monteiro da Silva

Resumo - Os recentes avanços científicos permitiram um aumento significativo na qualidade de vida e por consequência, na longevidade. Como consequência disso, a população de idosos aumentou consideravelmente e com isso, doenças relacionadas à idade, como osteoporose. Este fato, aliado aos acidentes de trânsito, por exemplo, fazem com que o governo invista consideráveis quantias na produção e no implante de próteses ortopédicas. As ligas mais utilizadas na manufatura de próteses são divididas em três grupos: aços inoxidáveis, ligas a base de Cr-Co (Cromo-Cobalto) e ligas a base de Ti (Titânio). Dentre estes três grupos, os biomateriais com melhor resposta clínica são aqueles a base de Ti, pois apresentam excelente biocompatibilidade, boas propriedades mecânicas e elevada resistência à corrosão. Estudos evidenciam o titânio a inúmeras aplicações devido a combinações de propriedades mecânicas muitas vezes encontradas apenas nesse material, o que faz indispensável utilizar-se de tratamentos térmicos específicos para realizar transformações alotrópicas no material e consequentemente adequá-lo aos fins necessários. Desta forma, este trabalho possui a finalidade de analisar os efeitos de tratamentos térmicos convencionais na microestrutura e microdureza do Ti-cp Grau 4, compreendendo a metalurgia física por trás das transformações de fase no estado sólido do titânio.

Palavras chave – Titânio, Tratamentos Térmicos, Microscopia Óptica, Microdureza Vickers.

I. INTRODUÇÃO

O titânio é o nono elemento mais abundante da Terra, estando presente em 0,8% da crosta terrestre, sendo desta forma o quarto metal existente mais abundante, atrás do alumínio, ferro e magnésio [1].

José Claudio Lopes é graduando do curso de Bacharelado em Engenharia de Produção Mecânica da Universidade Paulista - UNIP, campus de Bauru – SP, onde é bolsista de Iniciação Tecnológica do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, e mestrando (aluno especial) do programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” FEB/UNESP, campus de Bauru – SP. (e-mail: jclaudio.lopes@hotmail.com).

Fábio Bossoi Vicente possui graduação em Licenciatura Plena em Física pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” e Mestrado e Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais. Atualmente é professor Titular da Universidade Paulista UNIP. (e-mail: fabiobossoi@gmail.com).

Luciano Monteiro da Silva possui graduação em Licenciatura Plena em Física pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” e Mestrado e Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais. Atualmente é professor Titular das Faculdades Integradas de Ourinhos – FIO. (e-mail: monteiro.unesp@gmail.com).

Ocupa a 22ª posição da classificação periódica, foi descoberto por William Justin Gregor em 1791 a partir do mineral conhecido como ilmenita (FeTiO_3). Quatro anos depois, Henrich Klaproth o redescobriu a partir do rutilo (TiO_2), batizando-o de titânio, originado do latim titans, os filhos da Terra, numa referência à mitologia grega (Titãs, filhos de Urano e Gaia) [2].

O titânio não é encontrado na natureza de forma pura, os minérios que apresentam interesse econômico são: ilmenita, leucóxeno, rutilo, anatásio, perovskita e rutilo sintético. O Brasil é detentor das maiores reservas de titânio na forma de anatásio, concentrados nos Estados de Minas Gerais e Goiás, representando cerca de 6% das reservas mundiais de titânio [3].

A Tabela 1 apresenta algumas das principais características do titânio [4].

Tabela 1 – Característica do Titânio [3]

Nome do Elemento	Titânio
Símbolo	Ti
Número Atômico	22
Peso Atômico (u.m.a.)	47,88
Densidade do Sólido (g/cm ³)	α : 4,51 a 20 °C β : 4,35 a 885 °C
Estrutura Cristalina	HCP, para T < 882 °C CCC, para T > 882 °C
Raio Atômico (nm)	0,145
Raio Iônico (nm)	0,068
Valência mais comum	+4
Ponto de Fusão	1670 ± 5 °C

Apesar da descoberta das propriedades biocompatíveis do titânio datarem desde meados do século passado, sua maior utilização ocorre na indústria aeronáutica e aeroespacial, em dispositivos nucleares, computadores, na indústria automobilística, na engenharia civil, na indústria petroleira e na indústria naval [1], [2] e [5]. O titânio reúne ao mesmo tempo excelentes propriedades mecânicas e elevada razão resistência mecânica e densidade [2], [6] e [7].

As plausíveis empregabilidades do titânio nos setores como o biomédico e aeronáutico deve-se as suas propriedades mecânicas diferenciadas no quesito de tração, resistência à penetração (dureza), alto ponto de fusão (1668 °C) e uma densidade baixa (4,507 g/cm³) [6] em comparação ao aço (aproximadamente 7,8 g/cm³). O titânio é muito utilizado

nesses setores industriais quando há extrema necessidade de alto desempenho e resistências superior aos aços.

As etapas de processamento são fundamentais para determinar o conjunto de propriedades apresentadas pelo material. O tratamento térmico pode alterar a microestrutura de uma liga, alterando de maneira significativa as propriedades mecânicas da mesma. Dentre os tipos de tratamento térmico, pode-se destacar o recozimento, a normalização e a têmpera [8].

Um tratamento térmico do tipo recozimento visa remover tensões internas oriundas de processos mecânicos, diminuir a dureza, aumentar a ductilidade, regularizar a textura bruta de fusão, eliminar finalmente os efeitos de quaisquer tratamentos térmicos ou mecânicos a que o titânio tenha sido submetido anteriormente. A normalização visa refinar a granulação grosseira de peças, laminado ou forjado. A têmpera tende a aumentar ou diminuir (dependendo de adição de elementos intersticiais e ou substitucionais) a dureza e consequente resistência dos mesmos [9] e [10].

O objetivo deste trabalho é através de tratamentos térmicos de recozimento, normalização e tempera em Ti-cp grau 4 observar alterações microestruturais e de microdureza com a finalidade de entender as transformações físicas no estado sólido para este material.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica necessária para o entendimento dos efeitos de transformação alotrópica do titânio e do respectivo tratamento térmico será compreendido com base nos tópicos a seguir

A. Propriedades físico-químicas do titânio

Conforme o posicionamento dos átomos, muitas propriedades podem ser alteradas, como capacidade em resistir à tração, torção, compressão e etc. Assim, os processos de tratamentos térmicos têm a finalidade de modificar essas estruturas, fazendo com que as mesmas possam se adequar a cada propósito [10].

Todo material cristalino é caracterizado por sempre seguir um padrão, ou seja, se os átomos estiverem ordenados de uma determinada forma em um ponto específico, essas mesmas ordenações serão encontradas na extensão de toda a estrutura, desde que essa tenha passado por um processo termomecânico homogêneo [4], [8] e [10].

Assim, surge o conceito de célula unitária (cela unitária), que compõe uma estrutura simples que indica a posição geométrica dos átomos, com determinados comprimentos (parâmetro de rede) e ângulos das arestas [4].

No geral, existem 7 tipos de redes cristalinas – básicas – podendo ser expandidas até 14 estruturas diferentes, foi determinado em 1948 pelo cristalógrafo francês Auguste Bravais (1811-1863); redes essas que levam hoje o seu nome – Redes de Bravais. São constituídas pelas redes: Cúbica, Monoclínica, Triclínica, Tetragonal, Ortorrômbica, Romboédrica e Hexagonal [4].

Alguns materiais podem transformar suas estruturas cristalinas decorrente da temperatura (alotropia), assim o titânio é um metal de transição que possui uma transformação alotrópica em torno de 883 °C. Abaixo desta temperatura sua estrutura cristalina é da forma hexagonal compacta (Figura 1), sendo denominada fase α . A fase β possui uma estrutura cúbica de corpo centrado (Figura 2), sendo formada em temperaturas acima de 883 °C e permanecendo estável até a fusão do metal [11].

A estrutura hexagonal compacta (hcp) é caracterizada por possuir o máximo fator de empacotamento (0,74) enquanto a cubica de corpo centrado (ccc) possui menor fator de empacotamento (0,68). Desta forma pode-se dizer que quantidade de volume livre existente dentro de cada cela unitária é maior para estrutura ccc do que para a hcp. Este volume livre pode ser preenchido com intersticiais durante os processos de tratamentos térmicos a fim de otimizar as mudanças e aperfeiçoar suas características. Alguns gases são normalmente utilizados para ocupar esses sítios. Este processo é denominado dopagem. As dopagens mais comuns são as com nitrogênio e oxigênio e é efetuado em forno com atmosfera controlada.

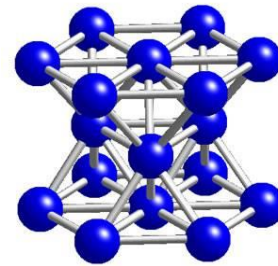


Figura 1 – Cella unitária de rede hexagonal

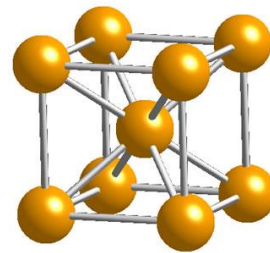


Figura 2 – Cella unitária de rede cúbica de corpo centrado

Estes gases ou elementos de liga alteram a temperatura de transformação alotrópica e são classificados de acordo com essas características. Elementos que aumentam a temperatura alotrópica são denominados de α -estabilizadores. Pertencem a este grupo os elementos Alumínio, Gálio e Germano, além dos intersticiais: Carbono, Oxigênio e Nitrogênio [12]. Os β -estabilizadores são elementos que diminuem a temperatura de transformação alotrópica do titânio, eles podem ser divididos em β -isomorfos ou β -eutetóides de acordo com a formação ou não de um composto intermetálico. Os elementos β -isomorfos constituem o Molibdênio, Vanádio, Tântalo e Nióbio, enquanto os β -eutetóides são o Ferro, Maganês, Cromo, Cobalto, Níquel, Cobre e Hidrogênio [4] e [11].

Os metais Zircônio, Háfio, Silício e Estanho não provocam grandes alterações na temperatura alotrópica, sendo classificados como elementos neutros [11].

B. Densidade

As medidas de densidade foram efetuadas com base no Princípio de Arquimedes, que afirma que todo corpo sólido imerso parcial ou totalmente em um fluido recebe neste uma força denominada empuxo, cujo módulo é igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo [12]. O peso de um corpo qualquer é dado por:

$$P = m \cdot g \tag{1}$$

onde: m é a massa do corpo e g é a aceleração da gravidade.

Ao imergir um corpo no fluido, a resultante das forças que estarão agindo no corpo é dada pela expressão:

$$P = P_{liq} + E_P \tag{2}$$

com:

$$P_{Liq} = m_{liq} g \tag{3}$$

$$E_P = \rho_{liq} v g \tag{4}$$

$$v = \frac{m}{\rho_{amostra}} \tag{5}$$

onde: P_{liq} é o peso do corpo imerso no liquido, m_{liq} é a massa do corpo medida com este imerso no fluido, E_P é o empuxo, ρ_{liq} é a densidade do fluido, V é o volume do fluido deslocado e $\rho_{amostra}$ é a densidade do corpo

Assim, substituindo as equações (1), (2), (3) e (4) na equação (5) e reescrevendo-a, tem-se:

$$\rho_{amostra} = \frac{m}{(m - m_{liq})} \rho_{liq} \tag{6}$$

Essa equação fornece a densidade de um corpo sólido utilizando a massa do objeto no ar e imerso em um liquido e a densidade do liquido.

C. Microdureza Vickers

O teste de dureza Vickers consiste em endentar o material em teste com um endentador de diamante, na forma de uma pirâmide reta de base quadrada e um ângulo de 136° entre as faces opostas, utilizando uma carga de 1 a 100 kgf [13].

A carga plena é aplicada normalmente durante um tempo de 10 a 15 segundos. As duas diagonais da endentação deixadas

na superfície do material depois da remoção da carga são medidas usando-se um microscópio. Com os valores lidos calcula-se a média aritmética e posteriormente calcula-se a área da superfície inclinada da endentação. A dureza Vickers é o quociente obtido dividindo a carga (em kgf) pela área da endentação [15]. Desta forma, denomina-se a dureza Vickers através da seguinte equação 8:

$$HV = \frac{2F \text{sen}(136^\circ / 2)}{d^2} \tag{8}$$

onde: F é a carga em Kgf, d é a média aritmética entre as duas diagonais d_1 e d_2 em mm e HV é a dureza Vickers.

III. METODOLOGIA

A. Amostras

O Ti-cp grau 4 utilizado para a pesquisa foi adquirido em formato cilíndrico de aproximadamente 100mm de comprimento e 10mm de diâmetro. Cada amostra foi submetida a um tratamento térmico distinto a fim de analisar e comparar as consequências de cada tratamento na estrutura do material.

A composição foi fornecida pelo doador dos corpos de prova, e são apresentadas na seguinte tabela:

Tabela 2 - Componentes químicos da amostra Titânio Grau 4

Elemento Químico	Peso (%)
Nitrogênio	0,05
Carbono	0,08
Hidrogênio	0,02
Ferro	0,50
Oxigênio	0,40
Titânio	Base

Fonte: Bionnovation

B. Tratamentos Térmicos

Foram realizados tratamentos térmicos de recozimento, normalização e têmpera, da seguinte forma:

- Recozimento realizado numa temperatura de 1000°C (1273 K) durante 120 minutos, com resfriamento lento ao forno.

- Normalização realizada numa temperatura de 1000°C (1273 K) durante 120 minutos, com resfriamento lento ao ambiente.

- Têmpera realizada numa temperatura de 1000°C (1273 K) durante 120 minutos, com resfriamento rápido em água.

Todos os tratamentos térmicos foram realizados em um forno tipo mufla da marca QUIMIS, pertencente ao Laboratório de Materiais de Construção Mecânica – UNIP de Bauru.

Para efeito de comparação das possíveis alterações ocasionadas pelos tratamentos térmicos, foi estabelecida como

base uma amostra denominada amostra recebida, sem quaisquer tratamentos.

Após as amostras terem sido submetidas aos respectivos tratamentos térmicos, com o auxílio de uma cortadora metalográfica de precisão foram extraídas amostras de 5mm de comprimento.

C. Densidade

Em seguida, utilizando uma balança analítica, juntamente com seu kit de determinação de densidade pertencente ao Laboratório de Anelasticidade e Biomateriais - Unesp de Bauru, foram realizadas pesagens dos corpos de prova. A mensuração das amostras seguiu-se primeiramente medindo-se as massas dos corpos e posteriormente com o auxílio de um béquer contendo água e do kit de medida de densidade, sua massa imerso ao líquido. O procedimento foi realizado 5 vezes visando confiabilidade estatística aos resultados. As densidades foram obtidas utilizando a equação (6).

D. Microscopia

As amostras foram embutidas usando uma embutidora semi-automática modelo PRE 30Mi da Arotec pertencente ao Laboratório de Anelasticidade e Biomateriais - Unesp de Bauru. As amostras foram embutidas à quente em baquelite sob pressão de aproximadamente 110 kg/cm².

Após este procedimento, foi realizado a preparação metalográfica com um lixamento com lixas d'água com granulação de 360, 400, 500, 600, 1200 e 1500. Posteriormente foi realizado polimento nas amostras com suspensão de diamante de 1mm em um pano de polimento, ambos da marca Buehler. Para revelar a estrutura, as amostras foram atacadas quimicamente utilizando um composto de H₂O, HNO₃ e HF.

Após as amostras terem sido atacadas quimicamente, utilizando um microscópio ótico Olympus BX51M, pertencente ao Laboratório de Anelasticidade e Biomateriais - Unesp de Bauru, foram realizadas as micrografias.

E. Dureza Vickers

As medidas de dureza Vickers foram realizadas no laboratório de Bioquímica da Faculdade de Odontologia da USP, campus de Bauru. O microdurômetro utilizado foi um Shimadzu HMV-2 que está acoplado a um microcomputador e fornece o valor conferido pelo microdurômetro através do software Newage Testing Instruments C.A.M.S. Testing System.

As amostras utilizadas para esta análise são as mesmas que foram preparadas metalograficamente para a microscopia ótica.

Para cada amostra, foram realizadas 5 endentações distribuídas aleatoriamente, com carga de 1,961 N (0,20 kgf) durante 60s. Foi considerada média dos valores obtidos.

IV. RESULTADOS

A. Densidade

As medidas de densidade foram realizadas utilizando água como fluido, cuja densidade a 22°C (temperatura no momento das medições) consiste em 0,9978 g/cm³ [14].

Na tabela abaixo, são mostrados os valores de densidade para cada amostra com seus devidos tratamentos.

Tabela 3- Densidades calculadas através do método de Arquimedes.

Condição do Ti-cp grau 4	Densidade calculada (g/cm ³)
Recebida	4,53 ± 0,05
Recozida	4,48 ± 0,04
Normalizada	4,50 ± 0,01
Temperada	4,54 ± 0,01

Percebe-se que há uma pequena variação entre os valores das densidades das amostras após consequentes tratamentos térmicos. Tendo como valor teórico a densidade do Titânio (Ti-CP) de aproximadamente 4,51 g/cm³ na tabela 4 é apresentado o erro a fim de estabelecer um desvio percentual médio decorrente do valor teórico e dos respectivos tratamentos térmicos.

Tabela 4- Densidades experimentais e teórica comparadas

Condição	Densidade experimental (g/cm ³)	Densidade esperada (g/cm ³)	Erro (%)
Recebida	4,53	4,51	0,54
Recozida	4,48	4,51	0,54
Normalizada	4,50	4,51	0,25
Temperada	4,54	4,51	0,76

A figura 3 por meio de gráfico de comparação entre as densidades demonstra com clareza as respectivas diferenças relacionadas a cada tratamento, assim podendo estabelecer comparativos e seus erros mediante aos valores encontrados nas medições.

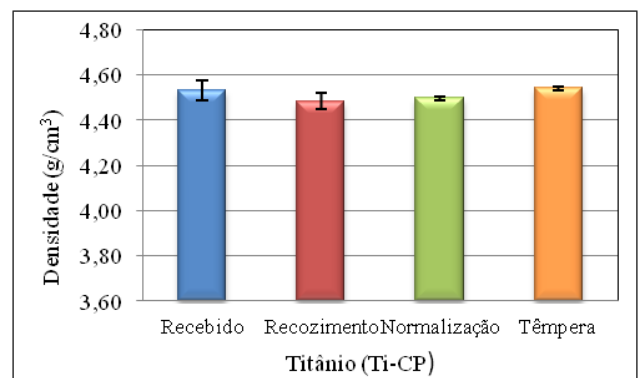


Figura 3 - Gráfico de comparação dos valores da densidade relacionados a cada tratamento

De acordo com os dados obtidos, pode-se afirmar que não houve mudanças drásticas na densidade do material devido aos processos térmicos realizados, ou seja, conclui-se com as medidas de densidade do material estudado que este não absorveu grandes quantidades de impurezas durante seu forjamento e durante os processos de tratamento térmico sem controle de atmosfera.

B. Microscopia

Nesse capítulo serão discutidos os efeitos encontrados em cada amostra, submetidas aos tratamentos recozimento, normalização e têmpera, visando uma discussão sobre os diferentes comportamentos apresentados pelo material.

Observando a figura 4(a), vale ressaltar que em geral, a amostra recebida passou por processo de conformação industrial, ou seja, foi submetida a processo onde houve forjamento rotativo e outros meios que evidenciam certa tensão interna no material, tensões que prejudicam as propriedades como módulo elástico e dificulta a conformação de peças, por isso, a necessidade dos demais tratamentos térmicos a fim de melhorar suas propriedades mecânicas.

Na figura 4(b) é apresentada a amostra que foi aquecida até 1000°C (1273 K) mantida por 120 minutos e logo após resfriada no próprio forno, assim sendo arremetido o efeito de recozimento sobre a amostra. Em comparação com a amostra recebida, nota-se um refinamento dos grãos. Esse refinamento diz respeito ao fato do material ter sido corrigido de forma térmica, o que significa que a maior parte dos danos estruturais ocorridos durante o processo de fabricação foram corrigidos, melhorando assim sua usinagem e elasticidade. No geral, para que seja possível trabalhar com o titânio na indústria, na grande maioria das vezes é necessário fazer uso das técnicas de alívio de estresse e de recozimento do metal. O titânio, quando não passa por recozimento, têm grandes chances de apresentar fissuras e rachaduras quando soldado e até mesmo depois da solda, por exemplo. De todos os aspectos mecânicos melhorados pelo alívio de tensão decorrente do recozimento, ressalta-se uma melhora na ductilidade, usinabilidade, estabilidade dimensional e estrutural (especialmente no caso de ligas alfa-beta processadas em condições que não favorecem boa combinação de propriedades mecânicas)

A normalização, processo cujo qual a amostra foi submetida a um aquecimento de 1000°C (1273 K) mantido por 120 minutos e logo após resfriado em atmosfera ambiente, em geral, visa refinar a granulação grosseira, como pode ser visto quando comparado à figura 4(c) com a figura 4(a), onde os grãos da amostra normalizada tende a ser mais homogêneos e estruturados quando comparado à outra. Esse tipo de estrutura explica o motivo pelo qual é praticamente indispensável a utilização desse processo antes da têmpera, pois a estrutura sendo uniforme reduz a tendência ao empenamento melhorando algumas das propriedades mecânicas já ressaltadas no item anterior.

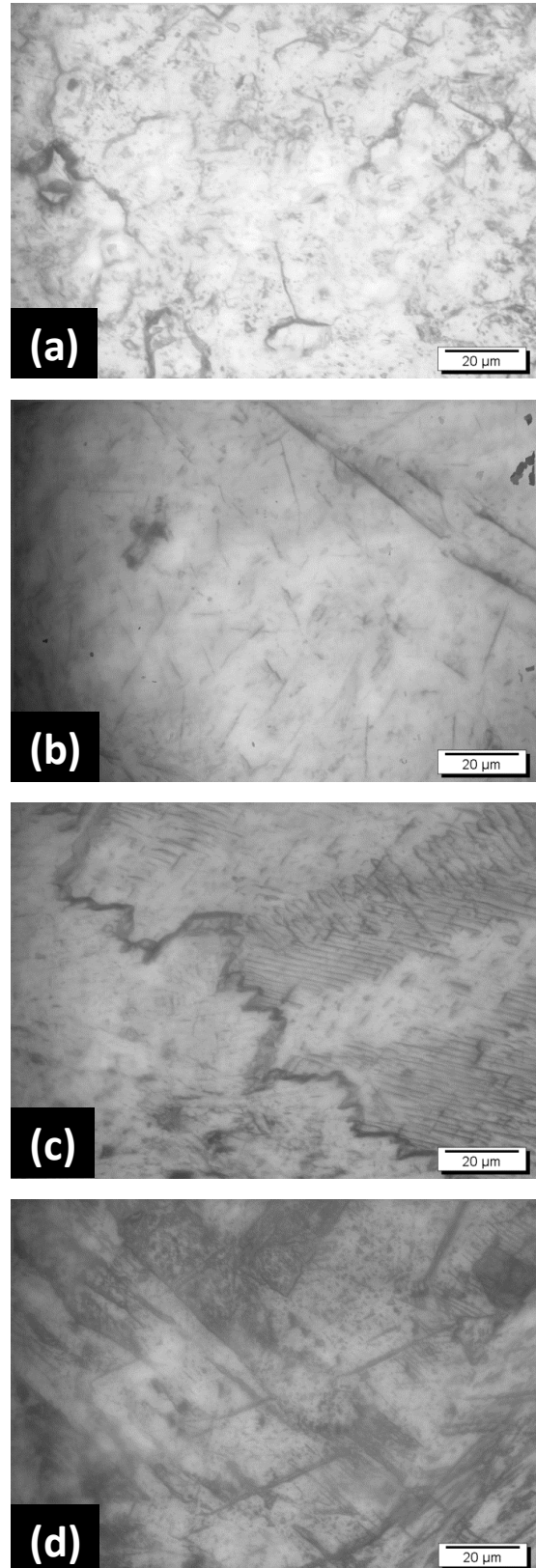


Figura 4 - Microscopia por meio de microscópio ótico do Titânio Grau 4; (a) Condição como recebida; (b) Condição após recozimento; (c) Condição após normalização; (d) Condição após têmpera

A figura 4(d) representa uma amostra que foi aquecida à temperatura 1000°C (1273 K) mantido por 120 minutos e logo após resfriado em água, ou seja, com uma rápida taxa de resfriamento. O propósito geral desse tratamento é obter uma estrutura martensítica do titânio, o que exige um resfriamento rápido, assim evitando que a estrutura cúbica de corpo centrado seja transformada em hexagonal compacta de forma termodinamicamente estável.

Devido ao fato da fase α (hexagonal compacta) do titânio grau 4 manter-se estável até a temperatura de 883 °C (1156 K), todos os processos cujo não ultrapassam esta temperatura, tendem a não modificar algumas propriedades mecânicas, como a dureza por exemplo. Porém, quando o tratamento térmico ocorre acima de 883 °C (1156 K), o reticulado hexagonal compacto se transforma em cúbico de corpo centrado, o que significa uma diminuição do fator de empacotamento dos átomos; assim, tal diminuição corresponde a um maior espaço entre os átomos o que pode ser utilizado para adição forçada ou não de elementos intersticiais como oxigênio e nitrogênio, por exemplo. A adição de elementos intersticiais ocorre quando o material em fase β recebe de forma controlada tais elementos, de forma que há nesse momento um ambiente de atmosfera controlada no forno [14].

Outra característica da tempera, é que esta congela as estruturas cristalinas fora da condição de equilíbrio, mantendo o titânio em uma condição com a coexistência de duas fases. Normalmente, a coexistência das fases α e β causam um endurecimento por solução sólida [14] e [16].

C. Dureza Vickers

A estrutura cristalina de um material é um dos fatores mais relevantes no quesito de resistência e aplicação de um material, diz respeito à dureza do mesmo, pois quanto maior o fator de empacotamento (acomodação dos átomos em uma estrutura) maior será a resistência quanto à penetração.

Tabela 5 - Comparação dos valores da densidade experimental com o valor da densidade teórica

		Dureza (HV)							
		Recebido		Recozimento		Normalização		Tempera	
Teste	1°	159,00	1°	192,00	1°	194,00	1°	197,00	
	2°	179,00	2°	182,00	2°	175,00	2°	182,00	
	3°	175,00	3°	180,00	3°	191,00	3°	179,00	
	4°	193,00	4°	185,00	4°	204,00	4°	179,00	
	5°	182,00	5°	175,00	5°	179,00	5°	196,00	
	Média	177,60	-	182,80	-	188,60	-	186,60	

Analisa-se através das tabelas que os valores de dureza após os respectivos tratamentos térmicos não se alteram de forma significativa, ou seja, mesmo sendo submetidas a altas temperaturas, as amostras se mantiveram praticamente estáveis.

Tal fenômeno pode ser arremetido ao fato de o mesmo ter sido tratado termicamente em forno sem qualquer controle de atmosfera, sendo assim submetido a quantidades

incontroláveis de oxigênio em sua estrutura, quantidade estas que fariam com que não houvesse a transformação de estrutura hexagonal compacta para cúbica de corpo centrado.

A fase α (hexagonal compacto) para fase β (cúbica de corpo centrado), diz respeito quando realizado sob atmosfera controlada e inserção de elemento intersticial como o oxigênio, por exemplo, acarretaria em um aumento dos valores de dureza, sendo compatíveis a valores de cerca de 250 HV em uma amostra submetida ao processo de tempera [12].

Os valores de dureza se mostraram muito próximos, sendo o valor de normalização o maior. Mediante ao tratamento térmico de normalização que visa o aquecimento acima da fase de transição e logo um resfriamento à taxa lenta, sendo o mesmo resfriado em atmosfera ambiente, comportou-se de forma natural, sendo apenas a amostra submetida à tempera com um menor valor e fora do esperado.

No entanto, a inadequação da tempera como material com maior valor de dureza dentre as amostras tratadas é claramente justificado pelos inúmeros fatores acima que visam uma possibilidade muito grande de uma não transformação de fase, correlacionado diretamente a um valor de dureza abaixo do esperado.

V. CONCLUSÃO

Uma vez que há o conhecimento dos limites cabíveis a cada material, o emprego do mesmo para diversas finalidades em que estão sujeitos na engenharia é considerado positivo, minimizando os possíveis erros por conta de um material inadequado para tal função. O estudo comportou-se de forma a explorar os benefícios gerados por conta de cada tratamento térmico, as devidas modificações em suas estruturas e o quão isso poderia beneficiar ou não no emprego da mesma em campo, sendo assim, devido aos tratamentos, determinado material tende a resistir de maneira mais eficaz a esforços como tração, compressão e fadiga, por exemplo, estabelecendo uma maior relação no quesito versatilidade, custo e segurança. Além dos citados acima, outro aspecto analisado foi a não alteração das características de densidade do material, havendo uma diferença de menos de 1 %, pode-se dizer que o material não sofreu apenas oxidação superficial durante os processos térmicos. Quanto a análise de dureza, o estudo comportou-se forma a comprovar que o material necessita de ambiente com atmosfera controlada para haver consideráveis diferenças nos resultados, no entanto, mesmo em ambiente não favorável, houve mudanças na estrutura e pequenas alterações nas propriedades, podendo assim determinar eficaz os métodos de análises utilizados.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e a FAPESP pelo apoio financeiro, e aos professores Dr. Carlos Roberto Grandini e Dr.ª Marília Afonso Rabelo Buzalaf pela disponibilidade dos laboratórios utilizados.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] LÜTJERING, G.; Influence of processing on microstructure and mechanical properties of (α + β) titanium alloys. Materials Science and Engineering A, 1998.
- [2] TITANIUM TECHNOLOGIES LLC Disponível em: <<http://www.titaniumllc.com>> último acesso em 5 de fevereiro de 2015.
- [3] DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br>> último acesso 5 de fevereiro de 2015.
- [4] CALLISTER Jr, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução. 3ª edição, Editora LTC, Rio de Janeiro, 2002.
- [5] COLLINGS, E.W. The Physical Metallurgy of Titanium Alloys, ASM, Ohio, USA, 1984.
- [6] JAFEE, R.I.; PROMISEL, N.E. The Science, Technology and Application of Titanium, Pergamon Press, London, 1970.
- [7] LIDE, D.R. Handbook of Chemistry and Physics, 80th Edition 1999-2000, CRC Press, 1999.
- [8] ABBASCHIAN, R.; ABBASCHIAN L.; REED-HILL, R. E.; Physical Metallurgy Principles, 4 ed., Cengage Learning, 2009.
- [9] ASM HANDBOOK, 10ª edição, 1993.
- [10] SHACKELFORD, JAMES F. Ciência dos Materiais, 6ª Edição, Editora Pearson Education - Br, São Paulo, 2008.
- [11] DONACHIE, M.J. Titanium - A Technical Guide, ASM, Ohio, 1988
- [12] VICENTE, F. B. 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, p. 542-553, 2014.
- [13] HALLIDAY, D.; RESNICK, R. MERRIL, J. Fundamentos de Física 2, LTC Editora, 7ª edição, Rio de Janeiro, 2006.
- [14] BANERJEE, D. MUKHOPADHYAY, P. Phase transformations, Examples from Titanium and zirconium alloys, Elsevier, Oxford (UK), 2007.
- [15] CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6559-teste-de-dureza-vickers#.Vzn-j5ErLIU> último acesso em 15 de março de 2015.
- [16] BANERJEE, D. WILLIAMS, J.C. Perspectives on titanium science and technology, Acta Materialia, v.61, p 844-879, 2013.