

Estudo da influência do tratamento térmico na microestrutura do Ti (Titânio) grau 2

Guilherme Antônio Carvalho¹, José Cláudio Lopes², Fábio Bossoi Vicente³

^{1, 2}Universidade Paulista – UNIP, Bauru – SP, guilhermecarvalho2005@hotmail.com, jclaudio.lopes@hotmail.com

³Doutor em Ciência e Tecnologia de Materiais, Professor da Universidade Estadual Paulista – UNESP, Bauru – SP, fabiobossoi@gmail.com

Resumo – Os recentes avanços científicos permitiram um pioneiro estudo na área de materiais, sendo assim, descobriu-se novas aplicabilidades e versatilidade para materiais metálicos. Dentre os materiais metálicos destaca-se o titânio para aplicação de próteses ortopédicas por ser um material biocompatível, não-cancerígeno, resistente à corrosão e possui baixo desgaste. O titânio também se destaca na indústria aeroespacial, naval e civil por ser muito resistente a altas temperaturas, ter excelentes propriedades mecânicas e elevada razão resistência mecânica/densidade. Neste trabalho foi estudada a microestrutura do titânio grau 2, tratado termicamente e avaliando-se os efeitos em sua dureza, comparando e identificando os pontos fortes e fracos existentes para cada tipo de processamento. Para fundamentar a discussão as amostras foram submetidas a tratamentos térmicos (tempera e homogeneização) e comparadas entre si e com resultados prévios na literatura. Para o relacionamento entre propriedades mecânicas e microestrutura foram realizadas medidas de difração de raios X e microscopia óptica. Sendo assim pode-se verificar que as amostra temperada e bruta apresentaram fase $\alpha+\beta$, uma devido ao tratamento térmico e a outra por ter passado por processamento termomecânico agressivo. Quanto à dureza mais elevada da temperada em relação à homogeneizada já era esperado, pois ocorre o endurecimento em solução sólida devido à estrutura ser polifásica. As densidades das amostras não se alteraram com os tratamentos efetuados estando condizente aos estudos bibliográficos.

Palavras chaves: Titânio, tratamentos térmicos, microscopia óptica, difração por raios X.

Abstract – Recent scientific advances have allowed a large study in the area of materials, so it was discovered several applicability and versatility for metallic materials. Among the metallic materials highlight the titanium for applying orthopedic prostheses to be a biocompatible material, non-carcinogenic, corrosion resistant and has low wear. Titanium also stands in the aerospace, naval and defense industry to be very resistant to high temperatures, have excellent mechanical properties and high ratio mechanical/density resistance. In this research the was studied microstructure of titanium grade 2 heat treated and was valued the effects on its hardness, compared and it was

identified the strengths and weaknesses that exist for each type of processing. To support the discussion samples were subjected to heat treatment (quenching and homogenization) and compared with each other and previous results in the literature. For the relationship between microstructure and mechanical properties were conducted measurements of X-ray diffraction and optical microscopy. Thus it can be seen that the temperate sample and crude sample showed $\alpha + \beta$ phase, the first, due to the heat treatment and the second, for having gone through aggressive thermomechanical processing. As for the higher hardness of the temperate sample compared to homogenized sample already was expected, as is hardening in solid solution due to the structure be polyphase. The densities of the samples did not change with treatment being consistent to bibliographic studies.

Keywords: titanium cp, microstructure, heat treatment, X-ray diffraction.

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]. Ocupando a 22^o 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, perouskita e rutilo sintético. O Brasil é detentor das maiores reservas de titânio na forma de anatásio, concentradas nos Estados de Minas Gerais e Goiás, representando cerca de 6 % das reservas mundiais de titânio [3].

Embora seja abundante na crosta terrestre, a produção de titânio puro esbarra em grandes empecilhos devido à forte tendência de reação como oxigênio e nitrogênio. Em 1937, Kroll desenvolveu um processo para a obtenção de titânio, consistindo na redução no $TiCl_4$ com magnésio numa atmosfera de argônio, para evitar oxidação. Este foi o primeiro processo que permitiu a obtenção de quantidades apreciáveis de titânio puro e é o processo utilizado até hoje [4].

Embora desde meados do século passado conhece-se sobre as propriedades biocompatíveis do titânio, 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 [2] e [5]. O titânio reúne ao mesmo tempo excelentes propriedades mecânicas e elevada razão resistência mecânica/densidade [2], [6], [7], [8], [9] e [10].

A partir da década de 1960, passou a ser empregado na indústria química, devido a sua excelente resistência à corrosão. Esta resistência é causada por uma camada de óxido de titânio, que se forma espontaneamente na superfície do titânio ao entrar em contato com a atmosfera. Outras aplicações do titânio e suas ligas são as aplicações estruturais em ambientes salinos [6]. Cabe destacar que somente 10% da produção total de titânio se destinam à obtenção do material na forma metálica. Os outros 90% se destinam à fabricação de dióxido de titânio, o qual é usado como proteção antioxidante. Dentre os 10%, metade é utilizada para a produção de ligas biocompatíveis [7].

O objetivo deste trabalho é estudar o efeito de tratamentos térmicos com diferentes taxas de resfriamento na microestrutura de amostras de Titânio grau 2. Para tanto, as amostras serão caracterizadas por intermédio de difração de raios X (DRX) e microscopia óptica (MO). Desta maneira possibilitando uma melhor análise dos efeitos do tratamento térmico no material, constituindo parâmetros de avaliação dos resultados em comparação com a amostra bruta sem quaisquer tratamentos.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica necessária para o entendimento dos efeitos dos respectivos tratamentos térmicos a diferentes temperaturas é apresentada nos tópicos a seguir.

A. Propriedades e características do Titânio

O estudo da influência do tratamento térmico na microestrutura do Ti Grau 2 permite uma catalogação das propriedades mecânicas em função do histórico térmico do material, facilitando a escolha para determinada aplicação dependendo do tipo da finalidade desejada.

Sabe-se que suas propriedades permitem usos como biomateriais e sua capacidade dúctil e de resistência a altas temperaturas, corrosão e alta condutividades elétricas permitem o uso em diversos outros ramos, como aeroespacial, por exemplo.

O titânio puro possui baixa densidade ($4,51 \text{ g/cm}^3$), cerca de 60 % da densidade do aço, um elevado ponto de fusão ($1668 \text{ }^\circ\text{C}$) e um módulo de elasticidade de 107 GPa [10] e [11]. A maior limitação do titânio está na sua reatividade química com outros materiais a temperaturas elevadas.

Na Tabela 1 são listadas as principais propriedades físico-químicas do titânio comercialmente puro, tendo como base [10].

Apesar da dificuldade de processamento, a resistência à corrosão em temperatura ambiente, somadas com suas características físicas, impulsiona o uso do titânio, principalmente nas indústrias aeroespaciais e petrolíferas.

Tabela 1 – Características físico-químicas do Titânio.

Nome do Elemento	Titânio
Símbolo	Ti
Número Atômico	22
Peso Atômico (u.m.a)	47,88
Densidade do Sólido, 20°C (g/cm^3)	4,51
Estrutura Cristalina a 300K	HC
Raio Atômico (nm)	0,145
Ponto de Fusão $^\circ\text{C}$	1668

Fonte: LIDE, 1999, [10].

O titânio puro é um metal de baixa densidade que apresenta dimorfismo, isto é, sofre uma transformação alotrópica à temperatura de $882,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Tal transformação alotrópica está associada à mudança da estrutura cristalina hexagonal compacta (fase α) para a cúbica de corpo centrado (fase β) [11]. Na figura 1 pode-se observar um diagrama esquemático em que se pode observar diferenças de estrutura cristalina da fase α e fase β .

Figura 1 - Estrutura cristalina do titânio (fase α) e (fase β).



Fonte: LEYENS e PETERS, 2003, [6].

B. Tratamentos térmicos

Ligas de titânio normalmente são submetidas a tratamentos térmicos com as seguintes finalidades: Redução das tensões internas devido a processos termomecânicos; alteração de propriedades mecânicas, como a ductilidade, dureza e módulo de elasticidade e aumento da resistência mecânica, resistência à fadiga e a fraturas.

A taxa de resfriamento em ligas de titânio é um parâmetro fundamental na determinação de suas propriedades mecânicas.

Se a taxa de resfriamento é lenta, uma grande difusão ocorre durante o resfriamento, e a estrutura na qual se deseja que o metal fique, é alterada lentamente [11].

A têmpera, portanto, é um tratamento térmico realizado normalmente acima da temperatura de transformação de fase, e resfriado rapidamente para manter a estrutura em um estado de não equilíbrio. Esse tratamento em aços visa aumentar sua dureza e no caso do titânio esse tratamento pode favorecer a concentração de uma fase em ligas bifásicas [12] e [13].

Ligas de titânio podem ser tratadas termicamente para alívio de tensões sem afetar algumas propriedades como excelente resistência mecânica e ductilidade. Este tratamento elimina as tensões internas provenientes de uma deformação plástica, ou resfriamento rápido de altas temperaturas. A remoção das tensões internas ajuda a manter o material com propriedades uniformes, reduzindo seu módulo de elasticidade [12] e [13].

Várias combinações de tempo e temperatura são encontradas na literatura para o alívio de tensões. As temperaturas não precisam ser superiores a temperatura de transição de fase para o tratamento ser efetivo. Normalmente, altas temperaturas realizam o alívio de tensões em um período menor de tempo. De modo geral, o alívio de tensão ocorre com maior intensidade nos primeiros minutos se estabilizando após 15 minutos. O resfriamento de forma lenta em forno é necessário para que novas tensões internas não surjam no resfriamento.

Recozimento é um tratamento térmico realizado com o objetivo de reduzir ou eliminar os efeitos da deformação plástica sobre a estrutura de um material metálico, tem o principal papel de homogeneizar a estrutura cristalina do material. O processo consiste na eliminação de grãos deformados e no crescimento de grãos mais uniformes [12] e [13].

O recozimento acontece em três etapas bem distintas: recuperação, recristalização e crescimento de grão. A recuperação é um processo de eliminação das tensões internas sem modificar a microestrutura em geral, exatamente o mesmo papel que tem o tratamento térmico de alívio de tensões [11], [12] e [13].

A recristalização é um processo pelo qual os grãos deformados são substituídos por um novo conjunto de grãos que formam núcleos e crescem até que os grãos originais sejam totalmente consumidos.

A etapa final é o crescimento do grão, onde ocorre o aumento do volume dos grãos e conseqüente diminuição do número destes. A força motriz do processo é a energia superficial, e todo material em equilíbrio tende a permanecer no estado de menor energia possível. Podemos fazer a seguinte relação entre a tensão superficial e a área de superfície. Quanto menor o grão, maior é a razão área superficial/volume, e por conseqüência maior é a energia associada ao estado. Deste modo, por difusão os átomos presentes nesse estado de maior energia migram para grãos maiores com menor tensão superficial [12].

C. Densidade

Define-se massa específica ou densidade de uma substância como a razão entre sua massa m e seu volume v .

A densidade relativa a um padrão, por sua vez, é a razão entre a massa específica do material em estudo e a massa específica do padrão. Geralmente adota-se como padrão a água pura a 4 °C, cuja densidade é 1,0 g/cm³ [14]. Sendo assim, a densidade relativa e a densidade de um corpo na unidade g/cm³ são numericamente iguais.

Na obtenção da densidade de sólidos muitas vezes não encontramos meios para determinar corretamente o seu volume, devido a vários fatores experimentais.

Pelo princípio de Arquimedes, todo corpo, parcialmente ou totalmente submerso em um líquido, fica sujeito a uma força de empuxo E , do líquido, de direção vertical, de baixo para cima, e com intensidade igual ao peso do líquido deslocado [15].

D. Dureza

A dureza da superfície é uma importante propriedade física dos materiais. Pode ser definida como sendo a resistência oferecida pelos sólidos à penetração de uma ponta, podendo ser considerada como um indicativo indireto da resistência do material ao desgaste, resistência à abrasão, além da capacidade do material de resistir a esforços [16].

A dureza é uma propriedade mecânica do material a qual está relacionada à facilidade ou dificultando de deformação plástica localizada, ou seja, é a resistência que o material oferece às pequenas impressões ou riscos [5] e [16].

Outra perspectiva indica que a dureza é uma propriedade na qual se utilizam procedimentos específicos de medição e é definida como resistência à deformação permanente de uma superfície submetida a uma penetração. Os testes Brinell e Rockwell são muito usados como medidas de dureza de materiais [16].

O ensaio de dureza é um dos ensaios mecânicos mais usados, pois apresenta vantagens interessantes sobre os demais. Dentre essas razões está sua simplicidade e praticidade a um custo relativamente baixo, pois os corpos de prova não precisam de preparação complexa (no máximo lixar e polir) e o equipamento é relativamente barato, comparado aos vários ensaios e testes que podem ser feitos com amostras metálicas. E ainda, o ensaio é considerado não-destrutivo, pois não há deformação, e tampouco fratura da amostra. E por fim, é um ensaio que pode gerar outras informações tais como módulo de elasticidade, limite de resistência, tensão residual, dentre outras [16].

Os testes mais frequentemente utilizados para se determinar a dureza dos materiais são denominados de: Brinell, Rockwell, Vickers e Knoop. As durezas Brinell e Rockwell, também chamadas de macrodurezas, utilizam áreas extensas de um determinado material para análise da dureza. Por estas causas, a dureza Brinell e

Rockwell são comumente empregada para análise da dureza de materiais nas indústrias de modo geral [16].

A dureza dos materiais pode ser obtida através de várias escalas que, diretamente ou indiretamente, estão relacionadas à pressão aplicada para deformar uma superfície testada. Os indentadores podem ser esféricos, piramidais ou cônicos, de acordo com alguns trabalhos [16].

A determinação da dureza dos metais constitui um método rápido, que permite avaliar as condições de fabricação e tratamento das ligas metálicas, as diferenças estruturais locais e a influência de elementos de liga. Embora a dureza não seja utilizada como parâmetro de projeto de peças, correlaciona-se com razoável aproximação com algumas propriedades mecânicas como resistência à tração, particularmente no caso dos aços [16].

O ensaio de dureza está bem difundido e fundamentado, devido à existência de vários estudos na área a fim de personalizar o material nas mais amplas áreas, sendo assim, o ensaio de dureza está sendo usado para determinar as propriedades mecânicas, tensões residuais, resistência à fraturas, dentre outros estudos conforme necessidades de cada caso.

Para metais, a dureza é diretamente proporcional à tensão de escoamento para a deformação imposta pela indentação. Propriedades como tenacidade, resistência ao desgaste e usinabilidade, podem ser estimadas pela medição de dureza [8], [12] e [16].

E. Difração por raios X

A difração de um feixe de raios-X por um material cristalino é constituída pelo processo de interferência construtiva causada pela incidência de um feixe de raios-X em direção a um material com estrutura atômica periodicamente arranjada. Essa interferência construtiva ocorre apenas nas direções de espalhamento dos feixes que satisfazem a Lei de Bragg, quando o espalhamento e a radiação incidente possuem o mesmo comprimento de onda [17] e [18].

A lei de Bragg expressa que a difração acontecerá quando a diferença dos caminhos percorridos por dois feixes distintos for um múltiplo do comprimento de onda, d . A interferência construtiva ocorre quando o ângulo de incidência e o ângulo de espalhamento do feixe difratado, θ , satisfaz a lei de Bragg. A medida da direção de espalhamento dos feixes difratados permite a determinação de propriedades fundamentais de materiais no estado cristalino, bem como das propriedades da unidade celular do cristal e sua simetria [17]. Baseados na descoberta desta técnica sugeriram dois campos de estudo em análise de materiais: monocristal e difração do pó. Para este trabalho foi considerado apenas o método de análise de difração do pó, que foi o método utilizado para obter os resultados com o método de análise de difração por raios X.

Com a difração do pó, materiais orgânicos e inorgânicos são analisados pelos seguintes métodos: análise qualitativa de fases, análise quantitativa de fases, determinação dos parâmetros e rede cristalina, refinamento estrutural, determinação do tamanho de cristalito, tensão residual, análise de textura e estudo de defeitos cristalinos. Muitos dos métodos podem ser aplicados na análise de filme fino cristalino e em materiais sob atmosfera controlada com ajuda de acessórios de alta ou baixa temperatura e câmera para controle ambiental.

Para as aplicações industriais, a difração por raios X, é uma ferramenta muito poderosa e pode ser aplicada em várias análises e indústrias dentre elas valem ressaltar o emprego nas indústrias eletroeletrônicas para auxílio e desenvolvimento de semicondutores, dentre eles destacam-se os diodos, transistores, microprocessadores e nano circuitos baseados na nanotecnologia. Na indústria aeronáutica e espacial a difração de raios-X é uma ferramenta analítica crítica usada na análise e desenvolvimento de uma classe de materiais, as superligas (*Ni*, *Co* ou *Fe*) necessárias na fabricação de turbinas a gás.

A indústria automobilística utiliza-se desse conjunto de técnicas para caracterizar e estudar o comportamento e desempenho de peças, por exemplo, partes dos escapamentos, catalisadores e resíduos na superfície de chapas de aço galvanizado [17], [18].

III. METODOLOGIA

A. Amostras

O material utilizado para os corpos de prova é o Titânio Puro – Ti-CP Grau 2, em formato cilíndrico, de aproximadamente 100 mm de comprimento e 5 mm de diâmetro. As amostras foram submetidas a processos de tratamento térmico a fim de analisar as diferenças nas estruturas do mesmo, quando comparado com uma amostra bruta, sem quaisquer tratamentos.

B. Tratamentos Térmicos

Foram realizados tratamentos térmicos de recozimento e têmpera utilizando um forno tipo mufla, aplicando os seguintes métodos:

- Têmpera, tratamento realizado em uma temperatura acima de 900°C (acima da transição β) durante 120 min com resfriamento rápido (amostra temperada).
- Recozimento, tratamento realizado em uma temperatura abaixo de 700°C (abaixo da transição β) durante 120 minutos com resfriamento lento fora do forno (amostra homogeneizada).

Para efeito de comparação das possíveis alterações ocasionadas pelo tratamento térmico, será estabelecida como base uma amostra bruta sem qualquer tratamento.

Após as amostras terem sido submetidas ao respectivo tratamento térmico, com o auxílio de uma cortadora metalográfica de precisão CM 40, foram extraídas discos de 5 mm de espessura.

C. Densidade das amostras

Em seguida, utilizando uma balança analítica Ohaus Corporation, modelo Explorer, juntamente com seu kit de determinação de densidade, foram mensuradas as massas dos corpos de prova, primeiramente medindo-se as massas do corpo ao ar e 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 uma confiabilidade estatística.

D. Difração por raios X

As medidas de difração de raios-X foram realizadas em um difratômetro Rigaku D/max-2100PC, pertencente ao Laboratório de Anelasticidade e Biomateriais - UNESP de Bauru, controlado por um microcomputador e os dados coletados automaticamente. Os difratogramas foram obtidos pelo método do pó, utilizando-se os seguintes parâmetros: radiação Cu-K α = 1,544 Å, corrente de 20 mA, tensão de 40 kV, no modo de tempo fixo, com 0,0125°/s, no intervalo de 10° a 100°.

E. Microscopia

As amostras foram embutidas em baquelite, usando uma embutidora semi-automática modelo PRE 30Mi da Arotec. As amostras foram embutidas a quente em resina sob pressão de aproximadamente 110 kg/cm².

Após o embutimento, foram realizados os procedimentos de polimento mecânico com lixas d'água marca 3M com granulação de 150, 320, 400, 600, 1200, 1500 e 2200 a fim de obter uma melhor superfície polida. Posteriormente ao processo de lixamento, foi realizado polimento nas amostras com suspensão de diamante de 1µm em um pano de polimento, ambos da marca Buehler. Os processos de lixamento e polimento foram realizados numa politriz Arotec modelo Aropov – 2V. Com propósito de visualização do contraste das estruturas, foi realizado um ataque químico, utilizando uma solução contendo H₂O, HNO₃ e HF. Após toda a preparação metalográfica as imagens foram obtidas utilizando um microscópio Olympus BX51M.

F. Dureza

Para a determinação da dureza das amostras foi usado um durômetro analógico Mitutoyo onde foram determinadas as durezas das amostras na escala Rockwell B (HRB). Para uma maior precisão na determinação das medidas foram realizadas 10 indentações em regiões aleatórias de cada amostra.

O método de determinação de dureza na escala Rockwell, consiste em um sistema de pré-cargas, onde se é trocado o peso padrão da máquina para a obtenção dos resultados em uma escala pré-determinada. O método Rockwell nos permite determinar a dureza de todos os tipos de materiais dos mais moles aos mais duros, sendo o método mais utilizado.

IV. RESULTADOS

A. Densidade

A tabela abaixo apresenta os resultados da determinação das densidades das amostras.

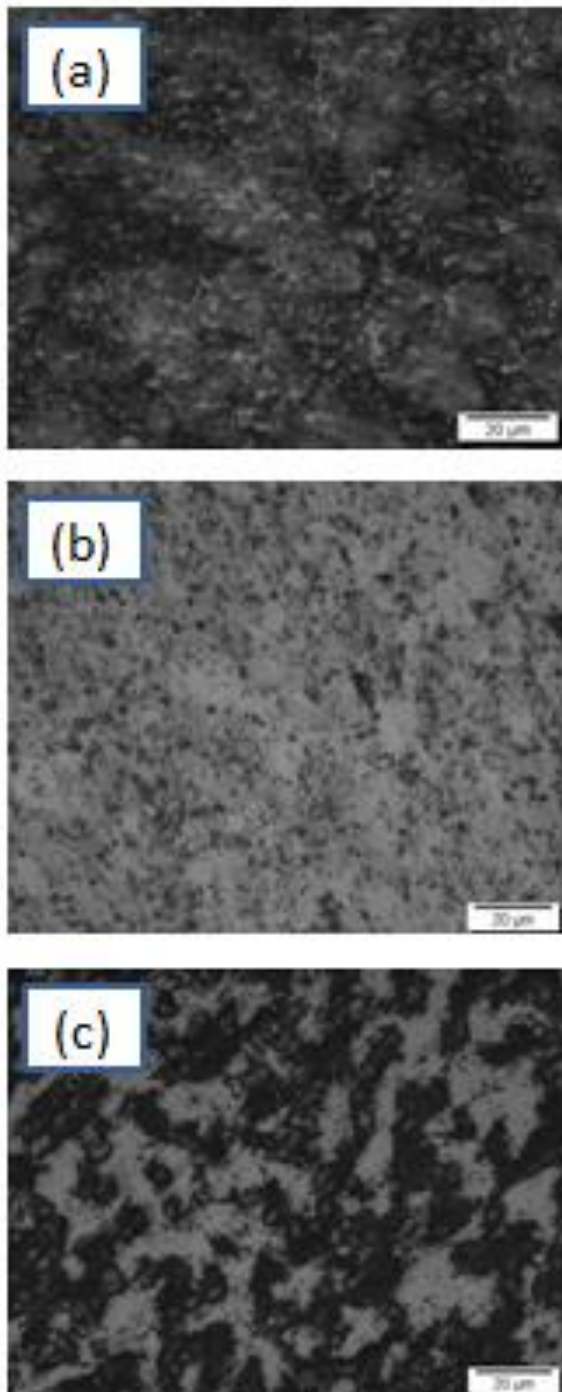
Tabela 2 – Densidade das amostras.

Amostras	Densidade experimental (g/cm³)	Densidade teórica (g/cm³)	Desvio (%)
Bruta	(4,51 ± 0,01)	4,51	0,1
Têmpera	(4,54 ± 0,01)	4,51	0,3
Homogênea	(4,50 ± 0,01)	4,51	0,1

Com a análise dos resultados podemos observar que as amostras são de excelente qualidade, apresentando densidades muito próximas da densidade teórica, o que já era esperado. Na literatura encontramos que os tratamentos térmicos não devem alterar as densidades das amostras e com os resultados obtidos conseguimos constatar que estão muito próximos à densidade teórica, condizente com o aceito pela literatura [12], [13].

B. Microscopia

Figura 2 – Micrografias para as amostras de Titânio: (a) microscopia óptica para a amostra bruta; (b) microscopia óptica para a amostra homogeneizada e (c) Microscopia óptica para a amostra temperada.



Fonte: Autores.

Com as micrografias apresentadas na Figura 2, pode-se constatar que na amostra bruta (Figura 2^a) há predominância da (fase α), porém observamos também uma mínima presença da (fase β), os resultados de difração de raios X corroboram com isso.

Foi possível observar uma micrografia escura, indicando que o ataque químico foi agressivo às estruturas martensíticas e discordâncias, indicativo de excesso de tensões internas no material bruto. Geralmente na literatura, encontramos amostras brutas do titânio comercialmente puro com a presença somente da fase α , mas existem algumas amostras, que para alguns fins mais específicos, sofrem tratamentos termomecânicos agressivos, no caso um forjamento rotativo a quente o que pode se explicar a presença da fase β na amostra bruta.

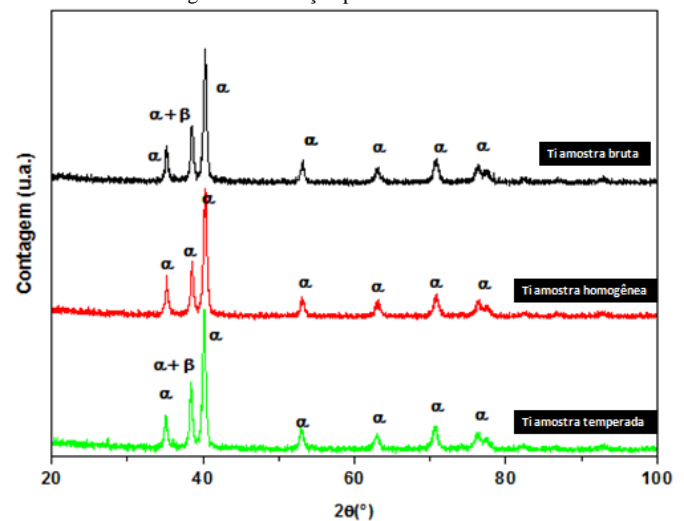
Já a amostra homogeneizada, (Figura 2b) observa-se somente a presença das estruturas lamelares referentes à fase α (hexagonal compacta) estando de acordo com as literaturas, e com o método do experimento, pois a tratamos com a temperatura de 700° C abaixo da transição da (fase β).

Na amostra temperada (Figura 2c), é perceptível uma predominância da fase α e uma boa presença da fase β na microestrutura. Isso se deve ao tratamento térmico realizado acima da transição da fase β . O surgimento da fase α com essa taxa de resfriamento, se dá através da transformação adifusional martensítica, comum nos aços e presente também nas ligas de titânio [19] e [20].

C. Difração por raios X

A Figura 3 apresenta os difratogramas comparados para todas as amostras estudadas. Pela resolução dos picos, pode-se observar que o método do pó foi adequado para o estudo.

Figura 3 – Difração por raios X.



Fonte: Autores.

Os picos foram indexados através dos padrões de difração ICSD [21]. Pela difração de raios X percebe-se a predominância da fase α (hexagonal compacta) em todas as condições. O segundo pico (39,1 °C) apresentado na Figura 2 tem um aumento relativo em relação à amostra homogênea. Isso pode ser atribuído ao aumento da fase β (cúbica de corpo centrado). Esse

resultado já era esperado pelo tratamento ter sido feito a 900 °C acima da fase de transição β .

Como foi constatado também nas micrografias, a amostra homogeneizada não apresenta a fase β como já era esperado, pois o tratamento térmico realizado nessa amostra foi a uma temperatura de 700 °C abaixo da fase de transformação para a fase β , estando em total acordo com a literatura.

Já no caso das amostras, temperada e bruta, existe a presença da fase β , no caso da amostra temperada é facilmente explicado por ter sofrido tratamento térmico acima da transição da fase β , e já era esperado e está em total acordo com a literatura, quando se trabalha sem atmosfera controlada. No caso da amostra bruta, como já foi mencionado na literatura, geralmente encontra-se somente a fase α , porém a amostra de titânio na condição bruta provavelmente sofreu um forjamento rotativo que é um tratamento termomecânico agressivo, explicando o aparecimento da fase β [13] e [20].

D. Dureza

A dureza foi determinada em HRB, a tabela abaixo mostra os valores obtidos.

Tabela 3 – Valores de dureza para as amostras.

Amostra	Dureza (HRB)
Bruta	80 ± 2
Temperada	76 ± 2
Homogeneizada	70 ± 2

De acordo com os resultados obtidos pela Tabela 3, amostra bruta apresenta a maior dureza entre as condições estudadas, indicando que o seu processo de forjamento induziu a tensões internas que dificultam o movimento de discordâncias, elevando a dureza do material. As micrografias corroboram para a identificando as estruturas decorrentes dessas tensões internas.

A amostra temperada tem dureza superior que a homogeneizada devido ao tratamento realizado estar acima da transição da fase β e o um resfriamento rápido aumenta a quantidade de tensão gerando uma fase metaestável martensítica causando um endurecimento por solução sólida. A amostra homogeneizada apresentou a menor dureza entre as demais amostras estudadas por ter sofrido um tratamento que geralmente serve para aliviar tensões, abaixo da fase β sendo assim os resultados apresentados estão de acordo com o encontrado nas bibliografias especializadas [5], [6], [11] e [13].

V. CONCLUSÃO

A análise de densidade evidencia que as amostras de Ti-cp grau 2 trabalhadas são de excelente qualidade, pois os resultados obtidos experimentalmente estão muito próximos aos valores teóricos e tratamentos térmicos não alteram a densidade.

A Difração de raios X evidencia a predominância da fase α em todas as condições estudadas, porém, o pico atribuído a fase β tem um aumento na condição temperada.

Na microscopia houve a constatação de manchas negras devidas às tensões internas na amostra. Este fato evidencia que a amostra bruta sofreu um tratamento termomecânico agressivo, provavelmente um forjamento rotativo a quente, processo comum em ligas de titânio comerciais. A amostra homogênea apresentou uma imagem comum para amostras α (CCC), indicando que as tensões internas da amostra bruta foram corrigidas com o tratamento térmico.

A têmpera produziu uma dureza superior à amostra homogeneizada, justamente pelo “congelamento” da fase metaestável martensítica.

De certa forma, foi possível observar que o Ti-cp grau 2 é suscetível aos tratamentos térmicos realizados. Comparando-se a amostra homogeneizada com a amostra temperada foi possível observar a diferença na micrografia e difração de raios X, além de uma variação na dureza, todas devidamente fundamentadas na literatura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao professor Dr. Carlos Roberto Grandini pela disponibilidade dos laboratórios utilizados.

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>>. Acesso em 5 de fevereiro de 2015.
- [3] DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br>> Acesso 5 de fevereiro de 2015.
- [4] LÜTJERING, G.; WILLIAMS, J. C. **Titanium – Engineering Materials and Processes**, Springer, New York, 2003.
- [5] COLLINGS, E.W. **The Physical Metallurgy of Titanium Alloys**, ASM, Ohio, USA, 1984.

- [6] LEYENS, C.; PETERS, M. **Titanium and Titanium Alloys – Fundamentals and Applications**, Wiley-VCH, Köln, 2003.
- [7] BOYER, R.; WELSCH, G.; COLLINGS, E.G. **Materials Properties Handbook: Titanium Alloys**, ASM, USA, 2003.
- [8] CALLISTER Jr, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 3ª ed., Editora LTC, Rio de Janeiro, 2002.
- [9] JAFEE, R.I.; PROMISEL, N.E. **The Science, Technology and Application of Titanium**, Pergamon Press, London, 1970.
- [10] LIDE, D.R. **Handbook of Chemistry and Physics**, 80th Edition 1999-2000, CRC Press, 1999.
- [11] DONACHIE, M.J. **Titanium - A Technical Guide**, ASM, Ohio, 1988.
- [12] ABBASCHIAN, R.; ABBASCHIAN L.; REED-HILL, R. E.; **Physical Metallurgy Principles**, 4 ed., Cengage Learning, 2009.
- [13] 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.
- [14] ASM HANDBOOK, 10ª ed., 1993.
- [15] HALLIDAY, D.; RESNICK, R. MERRIL, J. **Fundamentos de Física 2**, LTC Editora, 7ª ed, Rio de Janeiro, 2006.
- [16] BERTOLDI, E. *et al.* **Análise de Ensaios de Dureza Rockwell e Brinell em corpo de prova.** (Artigo da 4ª Semana Internacional de Engenharia) FAHOR, Horizontina, 2014.
- [17] PUC CERTIFICAÇÃO DIGITAL N° 0511103/CA Disponível em: <http://www2.dbd.pucrio.br/pergamum/tesesabertas/0511103_07_cap_04.pdf>. Acesso em 29 de julho de 2016.
- [18] WASEDA, Y., MATSUBARA, E. e SHIMODA, K. **X-Ray Diffraction Crystallography**. New York: Springer, 2011.
- [19] BANERJEE, D. MUKHOPADHYAY, P. **Phase transformations, Examples from Titanium and zirconium alloys**, Elsevier, Oxford (UK), 2007.
- [20] BANERJEE, D. WILLIAMS, J.C. *Perspectives on titanium science and technology*, *Acta Materialia*, v. 61, p. 844-879, 2013.
- [21] Inorganic Crystal Structure Database (ICSD) Disponível em: <www.portaldapesquisa.com.br/databases/sites> Acesso em: 10/09/2016.