



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP  
Escola de Minas  
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de  
Materiais  
Campus Morro do Cruzeiro  
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil



Gabriela Araújo Gois

# **Revisão bibliográfica e caracterização estrutural de juntas da liga Ti-6Al-4V obtidas pelo processo laser**

Ouro Preto

2018

Gabriela Araújo Gois

Revisão Bibliográfica e Caracterização Estrutural de Juntas da Liga Ti-6Al-4V  
Obtidas Pelo Processo Laser

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Engenharia Metalúrgica, da Escola  
de Minas da Universidade Federal de Ouro  
Preto, como parte dos requisitos para a  
obtenção do Grau de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Prof. D.Sc. Rodrigo Rangel Porcaro

Ouro Preto

2018

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G616r Gois, Gabriela Araujo.  
Revisão bibliográfica e caracterizações estrutural e mecânica de juntas da liga Ti-6Al-4V obtidas pelo processo laser. [manuscrito] / Gabriela Araujo Gois. - 2019.  
37 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Rangel Porcaro.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Ligas (Metalurgia) - Liga Ti-6Al-4V. 2. Metais - Solda e soldagem - Soldagem a laser. 3. Ligas (Metalurgia) - Solda e soldagem. I. Porcaro, Rodrigo Rangel. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 669.01

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Gabriela Araújo Gois**

**Revisão bibliográfica e caracterização estrutural e mecânica de juntas da liga Ti-6Al-4V obtidas pelo processo laser**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico

Aprovada em 03 de julho de 2019

### Membros da banca

[Dr.] - Rodrigo Rangel Porcaro - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)  
[Engenheira] - Aparecida Silva Magalhães - (Universidade Federal de Ouro Preto)  
[Engenheira] - Jacqueline de Oliveira Cota - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Rodrigo Rangel Porcaro, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 08/08/2025



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Rangel Porcaro**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/08/2025, às 08:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0956174** e o código CRC **35BC4E39**.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ter me fortalecido para chegar ao final do curso;

Aos meus pais pelo apoio durante esses anos de graduação;

Ao meu orientador por suas contribuições ao longo da realização do mesmo;

Ao Prof. Milton Sérgio Fernandes de Lima pelo apoio no fornecimento das amostras.

*“O correr da vida embrulha tudo, a vida é assim: esquenta e esfria, aperta e daí afrouxa, sossega e depois desinquieta. O que ela quer da gente é coragem. O que Deus quer é ver a gente aprendendo a ser capaz de ficar alegre a mais, no meio da alegria, e inda mais alegre ainda no meio da tristeza! A vida inventa!”*

*Guimarães Rosa*

## RESUMO

A liga de titânio com 6%Al e 4%V em peso, denominada Ti-6Al-4V é amplamente utilizada na indústria aeronáutica e em aplicações biomédicas, devido a suas excelentes propriedades, tais como alta resistência mecânica, boa resistência à corrosão, tenacidade e biocompatibilidade. Todavia, os métodos convencionais de soldagem não se aplicam, pois geralmente resultam em problemas como oxidação das faces unidas pela solda, porosidade e superaquecimento dos metais de união. O método de soldagem a laser, no entanto, é um dos processos indicados para solda desta liga de titânio, devido a alta penetração, alta velocidade, fácil manuseio e exatidão. No presente estudo, avaliou-se a microestrutura e as propriedades mecânicas da liga após o processo de soldagem a laser, por meio de metalografia e perfil de microdureza Vickers. Os resultados indicam que, mesmo utilizando o processo de soldagem laser, há grandes alterações microestruturais na ZTA e ZF do material, com formação de martensita e aumento significativo da microdureza.

Palavras-chave: Liga Ti-6Al-4V. Soldagem a laser. Metalurgia da soldagem.

## **ABSTRACT**

The titanium alloy with weight percentages of 6%Al and 4%V called Ti-6Al-4V is widely used in aeronautics industries and biomedical applications because of its excellent properties, as high mechanical strength, good corrosion resistance, toughness and biocompatibility. However, due to their high cost, conventional welding methods do not apply to the alloy in study because they generally cause problems such as oxidation of weld-joined faces, porosity and overheating of the joining metals. The laser welding method is the most appropriate because it has high penetration, high speed, easy handling and accuracy. The microstructure and mechanical properties of the alloy after laser welding were evaluated by means of metallography and Vickers microhardness profile. The results indicate that, even using the laser welding process, there are substantial structural changes in ZTA and ZF of the material, with martensite formation and a significant increase in microhardness.

Key words: Ti-6Al-4V alloy. Laser welding. Welding metallurgy

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Elementos de uma solda.....   | 21 |
| Figura 2 - Estrutura do tipo Widmanstätten do Ti-6Al-4V.....   | 23 |
| Figura 3 - Diagrama de fases das ligas.....  | 24 |
| Figura 1 - Cordão de solda da liga Ti-6Al-4V com as regiões: MB, ZTA e ZF.....   | 27 |
| Figura 5- Representação esquemática do perfil de microdureza Vickers na seção transversal do cordão de solda em amostra da liga Ti-6Al-4V.....   | 30 |
| Figura 6 - Região central da amostra do metal base (Ti-6Al-4V), atacada com Kroll por 10s, indicando uma matriz de fase alfa e ilhas de fase beta nos contornos dos grãos. Aumento: 500x.....  | 31 |
| Figura 7 - Região central da amostra do metal base (Ti-6Al-4V), atacada com Kroll por 10s, indicando uma matriz de fase alfa e ilhas de fase beta nos contornos dos grãos. Aumento: 1000x..... | 32 |
| Figura 8 – Junta soldada da liga Ti-6Al-4V, visão geral: MB – ZTA – ZF. Ataque com Kroll por 15s. Aumento: 100x.....   | 33 |
| Figura 9 – Junta soldada da liga Ti-6Al-4V, visão geral: MB – ZTA. Ataque com Kroll por 15s. Aumento 200x.....   | 33 |
| Figura 10 – Junta soldada da liga Ti-6Al-4V, ZF com presença de martensita. Ataque com Kroll por 15s. Aumento: 100x.....   | 34 |
| Figura 11 – Junta soldada da liga Ti-6Al-4V, ZF com destaque para martensita. Ataque com Kroll por 15s, aumento: 1000x.....  | 34 |
| Figura 12 - Perfil de microdureza Vickers em junta soldada a laser da liga Ti-6Al-4V.....  | 36 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Comparação de alguns metais e suas propriedades .....                | 17 |
| Tabela 2 – Propriedades do titânio.....   | 19 |
| Tabela 3 – Composição da liga Ti-6Al-4V que será caracterizada (% em peso)..... | 28 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$ ,  $\beta$  e  $\alpha + \beta$ : fases constituintes da liga Ti-6Al-4V

$\alpha'$ : martensita

## LISTA DE SIGLAS

|               |  |
|---------------|--|
| <b>ASTM</b>   | <i>American Society of Testing and Materials</i>               |
| <b>AWS</b>    | <i>American Welding Society</i>                                |
| <b>CCC</b>    | Cúbica de Corpo Centrado                                       |
| <b>CFC</b>    | Cúbica de Face Centrada  |
| <b>CNC</b>    | Controle Numérico Computadorizado                              |
| <b>CIMM</b>   | Centro de Informação Metal Mecânica                            |
| <b>DEMET</b>  | Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais          |
| <b>HC</b>     | Hexagonal Compacta   |
| <b>HV</b>     | <i>Hardness Vickers</i>  |
| <b>IEAv</b>   | Instituto de Estudos Avançados                                 |
| <b>LASER</b>  | <i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> |
| <b>LBW</b>    | <i>Laser Beam Welding</i>                                      |
| <b>LTM</b>    | Laboratório de Tratamentos Térmicos e Microscopia Óptica       |
| <b>MB</b>     | Metal Base   |
| <b>Nd:YAG</b> | Neodímio dopado com ítrio-alumínio                             |
| <b>PMC</b>    | <i>Polymer Matrix Composite</i>                                |
| <b>UFOP</b>   | Universidade Federal de Ouro Preto                             |
| <b>ZF</b>     | Zona Fundida   |
| <b>ZTA</b>    | Zona Termicamente Afetada                                      |

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO .....  | 13 |
| OBJETIVOS .....   | 15 |
| 2.1 Objetivo Geral.....   | 15 |
| 2.2 Objetivos Específicos.....                                  | 15 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                                   | 16 |
| 3.1 O Titânio e Sua Liga Principal Ti-6Al-4V.....               | 16 |
| 3.1.1 Propriedades mecânicas .....                              | 18 |
| 3.1.2 Propriedades físicas e químicas .....                     | 19 |
| 3.2 Processo de soldagem a laser.....                           | 20 |
| 3.2.1 Soldagem da liga Ti-6Al-4V.....                           | 22 |
| 3.3 Análise Microestrutural .....                               | 24 |
| 3.3.1 Microestrutura da liga Ti-6Al-4V .....                    | 24 |
| 3.3.2 Microestrutura de juntas soldadas da liga Ti-6Al-4V ..... | 26 |
| 4 MATERIAIS E MÉTODOS.....                                      | 28 |
| 4.1 Materiais .....   | 28 |
| 4.2 Caracterização Estrutural .....                             | 29 |
| 4.3 Ensaio de Microdureza .....                                 | 30 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....                                   | 31 |
| 5.1 Caracterização Estrutural do Metal Base.....                | 31 |
| 5.2 Caracterização Estrutural da Junta Soldada.....             | 33 |
| 5.3 Microdureza Vickers .....                                   | 36 |
| 6 CONCLUSÕES .....  | 38 |
| 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....                         | 39 |
| 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                               | 40 |

## 1 INTRODUÇÃO

Em 1791, o inglês Willian Gregor observou a presença de um elemento no mineral ilmenita. Algum tempo depois, em 1795, este mesmo elemento foi denominado titânio pelo químico alemão Martin Heinrich Klaproth ao ser também encontrado no mineral rutilo. Mas somente em 1938 foi possível extrair o titânio de modo economicamente viável, graças ao “Processo Kroll”, desenvolvido por William Justion Kroll (Oliveira, 2010).

Na década de 1950, pesquisadores Russos desenvolveram a liga Ti-6Al-4V para aplicação no setor aeroespacial, tendo em vista a elevada resistência mecânica na faixa de temperatura dos equipamentos aeronáuticos, ótima resistência a corrosão e tenacidade, propriedades que chamaram a atenção fazendo a liga ser mais usada em outras áreas a partir de então (Simoni, 2015).

Atualmente, essa liga com a nomenclatura referente aos seus 6%Al e 4%V em massa, é a liga de titânio mais utilizada, sendo também conhecida como liga Ti-64 (Yang et al, 2019). Suas excelentes propriedades devem-se a sua estrutura cristalina hexagonal compacta (fase alfa), a temperatura ambiente; e cúbica de corpo centrado (fase beta), a 883°C. Outra característica importante da liga é a baixa densidade do titânio ( $4.2\text{g/cm}^3$ ), menor que a do aço (Rocha et al., 2006). Além disso, o titânio é galvanicamente compatível com fibras de carbono, enquanto o alumínio tem um potencial galvânico significativo (Henriques *et al*, 2005). Por esse motivo, as ligas de titânio se aplicam na odontologia, na medicina e também nas indústrias aeronáutica e automotiva (Oliveira, 2010).

A respeito das desvantagens de se trabalhar com o titânio, um aspecto importante a ser observado é o custo mais elevado que do alumínio, porém é possível fabricar peças do metal com geometrias complexas e dimensões definidas através da metalurgia do pó (Henriques *et al*, 2005). No entanto, é necessário sempre estudar a união das ligas de titânio em busca de melhorias a serem aplicadas, uma vez que este apresenta uma alta reatividade em elevadas temperaturas com elementos encontrados na atmosfera, induzindo a formação de descontinuidades que provocam a fragilização do material (Melo, 2007).

A respeito da soldagem a laser das ligas Ti-6Al-4V, pode-se observar várias vantagens, como por exemplo um aporte de energia concentrado, responsável por produzir uma solda mais profunda; menores distorções, podendo-se ajustar

alguns parâmetros como potência e taxa de pulso; soldagens em um único passe; não requer metal de adição; facilidade em soldar locais da peça que são mais difíceis de serem alcançados e em soldar peças muito finas, sendo que não há contato com a peça; e possibilidade de automatização do processo (Infosolda, 2013).

A indústria aeroespacial determina que a soldagem deve ser feita pelo método laser ou por feixe de elétrons. No entanto, é esperado que a soldagem a laser ocasione modificações estruturais indesejáveis, como a perda da fração relativas entre as fases alfa e beta (Simoni, 2015).

Neste contexto, neste trabalho foi realizada uma revisão bibliográfica sobre a liga Ti-6Al-4V, com foco na relação estrutura-propriedades e no seu processo de soldagem a laser. Além disso, as juntas soldadas de amostras desta liga obtidas pelo processo laser passaram por caracterização estrutural e ensaios de microdureza Vickers.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Realizar uma revisão bibliográfica sobre a liga Ti-6Al-4V, com foco na relação entre estrutura-propriedades e seu processo de soldagem a laser. Caracterizar juntas soldadas pelo processo laser a partir de metalografia e microdureza Vickers.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Revisão bibliográfica sobre a liga Ti-6Al-4V;
- Revisão bibliográfica sobre a soldagem a laser das ligas Ti-6Al-4V;
- Caracterização estrutural por meio de microscopia óptica de juntas soldadas a laser da liga Ti-6Al-4V;
- Caracterização mecânica por meio de perfis de microdureza Vickers em juntas soldadas a laser da liga Ti-6Al-4V.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma fundamentação teórica presente na literatura que serviu como base para a realização deste trabalho.

#### 3.1 O Titânio e Sua Liga Principal Ti-6Al-4V

O titânio tem várias características importantes, dentre elas destacam-se: comportamento não-magnético, elevada resistência mecânica específica, alta resistência à corrosão, biocompatibilidade, ponto de fusão a 1670°C, densidade de 4.5g/cm<sup>3</sup>, raio atômico 0.147nm, transformação alotrópica em 882.5°C e reações com O, N, C e H. Tendo em vista as características vantajosas citadas, por qual motivo o Ti é menos utilizado que o Al e o aço? A resposta é que isso ocorre devido ao custo do Ti ser vinte vezes maior do que o do Al, além das dificuldades de extração, de processamento e de fabricação (Caram, 2010). De acordo com Simoni (2015), o custo do titânio é bastante elevado se comparado ao de outros metais, porém seu emprego é justificado quando é fundamental utilizar um material com melhor desempenho e com peso reduzido, sendo assim o material é escolhido preferencialmente para peças com elevada temperatura operacional, que não poderiam ser de alumínio ou de materiais compósitos.

A liga Ti-6Al-4V é a liga de titânio mais amplamente usada em vários setores: aeroespacial, engenharia química, medicina, odontologia, dentre outros, devido às suas boas propriedades mecânicas, baixa densidade, excelente resistência à corrosão e biocompatibilidade (Yang *et al*, 2019). Como a liga é empregada na indústria aeronáutica e biomédica, deve ser realizado o ensaio de fadiga, que consiste em ensaiar o material sob condições de solicitações cíclicas de carregamento até ocorrer uma falha. Os estudos realizados por Simoni (2015) apontam que o comportamento em fadiga dessa liga depende de vários fatores, como os elementos de liga, a estrutura e textura cristalográfica, o estado da superfície, o nível da carga e o modo de aplicação desta carga. Tipicamente, o material é considerado resistente à fratura em fadiga quando não ocorre a fratura e o número de ciclos atinge 10<sup>6</sup> ciclos (Simoni, 2015). A elevadas temperaturas, a fase  $\beta$  se transforma em uma estrutura lamelar  $\alpha+\beta$ . Quanto mais finas as lamelas, maior será sua resistência em fadiga (Donachie, 1988).

Segundo Silva *et al* (2006), essa boa resistência à corrosão em muitos ambientes, inclusive em soluções salinas, é atribuída à formação de uma camada passiva de óxido de titânio na liga. Esta camada passiva é um filme aderente de TiO<sub>2</sub> que retarda a corrosão posterior. Além disso, a superfície mecânica pode ser melhorada pela implantação de processos assistidos de nitretação a plasma, íons de imersão, ou ambos os processos, haja vista que na presença de desgaste local pode haver intensa corrosão.

A Tabela 3.1 compara as propriedades de Ti, Al e aço, ressaltando o melhor desempenho do titânio em comparação com esses outros metais. É importante salientar também que algumas ligas de titânio são usadas em aplicações criogênicas devido ao seu baixo teor de elementos intersticiais, não apresentando transição dúctil-frágil (Melo, 2007).

Tabela 1 – Comparação de alguns metais e suas propriedades (Melo, 2007)

| <b>Propriedade</b>                  | <b>Titânio</b> | <b>Alumínio</b> | <b>Aço</b> |
|-------------------------------------|----------------|-----------------|------------|
| <b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b> | 4,54           | 2,70            | 7,87       |
| <b>E (10<sup>6</sup> MPa)</b>       | 0,11           | 0,06            | 0,20       |
| <b>T<sub>fusão</sub> (°C)</b>       | 1668           | 660             | 1536       |
| <b>Estrutura cristalina</b>         | a HC           | CFC             | CCC        |
| <b>T<sub>amb</sub><sup>1</sup></b>  |                |                 |            |

Elementos de liga podem ser adicionados e parâmetros de processamento podem variar para que propriedades específicas sejam alcançadas e para estabilizar as fases presentes. O alumínio estabiliza a fase alfa, portanto é alfa-gênico, enquanto o vanádio estabiliza a fase beta, portanto é beta-gênico (Simoni, 2015).

<sup>1</sup> As siglas se referem às estruturas cristalinas CCC (Cúbica de Corpo Centrado), CFC (Cúbica de Face Centrada) e HC (Hexagonal Compacta).

### 3.1.1 Propriedades mecânicas

As classificações do titânio ASTM são de acordo com sua estrutura cristalina e fases presentes: titânio com diferentes níveis de pureza (não-ligados), ligas a, ligas a-b e ligas b. A nomenclatura da liga faz alusão aos elementos presentes, portanto a Ti-6Al-4V contém 6%Al e 4%V, em que a quantidade desses elementos é suficiente para estabilizar as fases  $\alpha + \beta$ . Estes elementos adicionados ao titânio lhe conferem uma maior resistência mecânica, ótima resistência à fadiga, maior dureza, boa resistência a fluência, mas baixa ductilidade em comparação ao titânio comercialmente puro. Segundo Melo (2007), a excelente resistência mecânica do titânio varia de 480 MPa a 1180 MPa em casos de liga de uso estrutural, mas pode ultrapassar 1725 MPa quando na forma de fios e molas.

A respeito da corrosão, observou-se previamente em um estudo que para o titânio ocorre o fenômeno de passivação no metal base, pois ao checar tal região no processo de soldagem, esta apresentava um intervalo de potencial de 0,085V a 3V, com corrente passiva que varia de 10A/cm<sup>2</sup> a 20A/cm<sup>2</sup>. Isso somente confirmou que o filme de TiO<sub>2</sub> que protege o metal nesse fenômeno é resistente à corrosão em ambiente oxidante (Ramires, 1998 apud Bezzerra, 1999).

Um fator que tem grande influência nas propriedades mecânicas é a temperatura. O trabalho a quente ocasiona diminuição das resistências à fluência, fadiga, tração, escoamento e também redução da dureza. Por outro lado, não interfere no valor do módulo de elasticidade, mas aumenta a ductilidade e a tenacidade. De modo contrário, o trabalho a frio aumenta a resistência mecânica e a dureza (Infomet, 2013). De acordo com Melo (2007), a elevadas temperaturas, o titânio apresenta alta reatividade com certos elementos presentes na atmosfera, o que gera defeitos e descontinuidades e provoca fragilização do material.

### 3.1.2 Propriedades físicas e químicas

Segundo Rocha et al. (2006), a massa específica do titânio, que é  $4.51\text{g/cm}^3$ , permite uma economia de peso. É um metal de transição, seu número atômico é 22 e sua massa atômica é  $47,88\text{u.m.a}$ . A Tabela 3.2 resume bem essas propriedades.

Tabela 2 – Propriedades do titânio (Metals Handbook, 1990)

| Propriedades            |  |
|-------------------------|--|
| Número atômico          | 22   |
| Peso atômico            | $47.88\text{u.m.a}$ .                          |
| Densidade               | $4.51\text{g/cm}^3$ (60% menor que o ferro)    |
| Ponto de fusão          | $1668^\circ\text{C}$                           |
| Ponto de ebulição       | $3260^\circ\text{C}$                           |
| Configuração eletrônica | $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^2$           |
| Módulo elástico         | Tração= $105\text{GPa}$ Alongamento: 20% a 40% |
| Ductilidade             | Redução da área: 45% a 65%                     |
| Resistência à tração    | $315\text{MPa}$ a $660\text{MPa}$              |
| Tensão de escoamento    | $215\text{MPa}$ a $530\text{MPa}$              |
| Dureza                  | $100\text{HV}$ a $300\text{HV}$                |

A estrutura do titânio é hexagonal compacta (HC) quando à temperatura ambiente e cúbica de corpo centrado (CCC) quando puro acima de  $882^\circ\text{C}$ . Por ser um metal de transição, é paramagnético. Pode formar os íons  $\text{Ti}^{+2}$ ,  $\text{Ti}^{+3}$  e  $\text{Ti}^{+4}$ . Além disso, apresenta grande afinidade com o oxigênio, com o qual pode formar óxidos, mas também pode reagir com o hidrogênio e formar hidretos (Rocha et al, 2006).

### 3.2 Processo de Soldagem a Laser

Em 1917, Albert Einstein analisou fenômenos físicos de emissão espontânea e estimulada de luz (Melo, 2007), muito embora o desenvolvimento de sistemas a laser tenha se dado ao longo dos anos, mais significativamente durante o período da Segunda Guerra Mundial, quando Townes e Schawlow propuseram que a emissão estimulada nas regiões do espectro da faixa do infravermelho e do visível fosse usada (Ready, 1997). No início da década de 1970, o laser chamou a atenção das indústrias para aplicações de corte e furação, quando perceberam que este ao fundir era capaz de vaporizar porções de metal. E desde a década de 1990 até os dias atuais, o laser vem sendo utilizado amplamente nas linhas de produção devido a sua praticidade e exatidão (Melo, 2007).

A sigla LASER provém da abreviação das palavras *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, que significa amplificação de luz por emissão estimulada de radiação (Migliore, 1996). De acordo com Melo (2007), os lasers são compostos por: cavidade ressonante, meio ativo (sólido, gasoso ou líquido), sistema excitador e trocadores de calor.

Em relação aos parâmetros, conforme a AWS C7.2 (1998), os lasers que operam em modo contínuo ou pulsado são capazes de soldar chapas finas e produzir feixes de 1kW a 2kW de energia. O laser gasoso pode executar corte em chapas mais espessas, com energia que varia de 25kW a 40kW. O comprimento de onda dos lasers varia de 0,2 $\mu$ m a 10 $\mu$ m, duração de pulso inferior de um nanosegundo para onda contínua. De acordo com Melo (2007), os lasers de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e Neodímio dopado com ítrio-alumínio (Nd:YAG) são os mais utilizados devido ao baixo custo e alta eficiência.

A luz carrega energia, mas para aquecer um metal é necessário que a luz seja mais absorvida do que transmitida ou refletida, portanto um modo de garantir esse efeito desejado é cobrindo a parte do metal que é mais reflexiva com um revestimento dielétrico que absorve e transfere o calor ao metal (Migliore, 1996). O balanço de energia do sistema depende da constante de absorção da radiação laser e da contínua dissipação de calor da peça (Du *et al.*, 2002). Quando os metais são fundidos, seu grau de desordem aumenta causando alta interação

entre átomos e moléculas que vibram, isso faz com que haja mais absorção, pois a refletividade cai de 90% para 50% para metais comuns (Migliore, 1996).

Durante alguns milissegundos, o laser produz calor com tamanha intensidade que é capaz de fundir o metal-base sem que haja difusão de calor para a região adjacente à solda, o que provoca um elevado gradiente de temperatura; um rápido resfriamento quando retirada a fonte de calor, da ordem de  $10^3\text{K/s}$  a  $10^8\text{K/s}$ ; e induz a velocidades de solidificação de  $1\text{m/s}$  a  $10\text{m/s}$  (Ierardi, 1995 apud Bezerra *et al*, 1999).

Como pode ser observado na Figura 3.1, a soldagem a laser produz três regiões distintas na peça: o metal base (MB), que é o metal que permanece inalterado durante a soldagem; a zona fundida (ZF), composta do metal que fundiu durante a soldagem; e a zona termicamente afetada (ZTA), composta do metal base que se alterou devido ao calor da soldagem (Migliore, 1996).

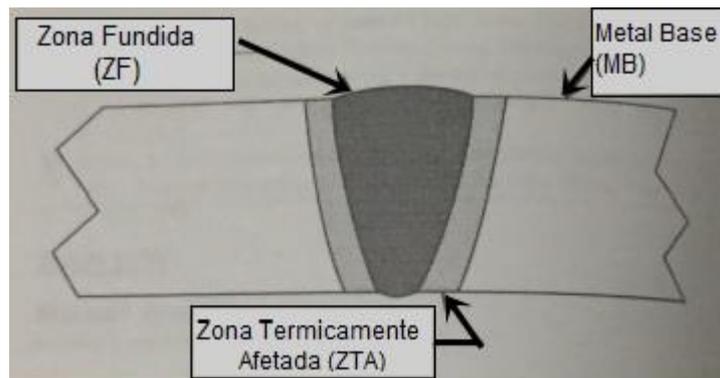


Figura 1 - Elementos de uma solda (Migliore, 1996).

### 3.2.1 Soldagem da liga Ti-6Al-4V

A soldagem a laser (*Laser Beam Welding* – LBW) minimiza os possíveis problemas de contaminação, pois a energia é concentrada em uma área pequena na qual há fusão e resfriamento em um tempo relativamente curto, o que evita uma grande dissipação de calor no sólido e também limita a mudança microestrutural no metal base. No entanto, mesmo a soldagem a laser provoca modificações microestruturais indesejáveis, como perda da fração relativa entre as fases  $\alpha$  e  $\beta$ , o que provoca o decréscimo das suas propriedades mecânicas (Simoni, 2015).

O vácuo do processo de soldagem por feixe de elétrons garante improvável contaminação, já que em qualquer processo de soldagem, o titânio e sua liga Ti-6Al-4V é sensível à contaminação e absorve carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio. Além da utilização do vácuo, a absorção desses elementos é possível de ser evitada através de uma proteção gasosa utilizando uma mistura de gás argônio e hélio, com elevada pureza e ponto de condensação abaixo de 50°C, aplicada na região a ser soldada (Migliore, 1996).

Estudos previamente realizados por Gao et al. (2013) permitiram comparar a soldagem TIG com a soldagem a laser da liga Ti-6Al-4V. Observou-se que o alto aporte térmico da soldagem TIG causou empenamento da chapa, enquanto nada ocorreu com a chapa soldada a laser. A explicação para este fato é que durante a soldagem ocorre uma transformação de fases influenciada pela taxa de resfriamento, pelo processo de soldagem e seus parâmetros. A solda TIG tem baixa taxa de resfriamento, por isso a ZTA ocasionada é maior do que a da solda a laser. Como a ZTA é um concentrador de tensões, pode haver fragilização da liga neste ponto. Deste modo, se forma uma estrutura de Widmanstätten com frações de fase  $\beta$  retida (Simoni, 2015), como mostra a figura 3.2.

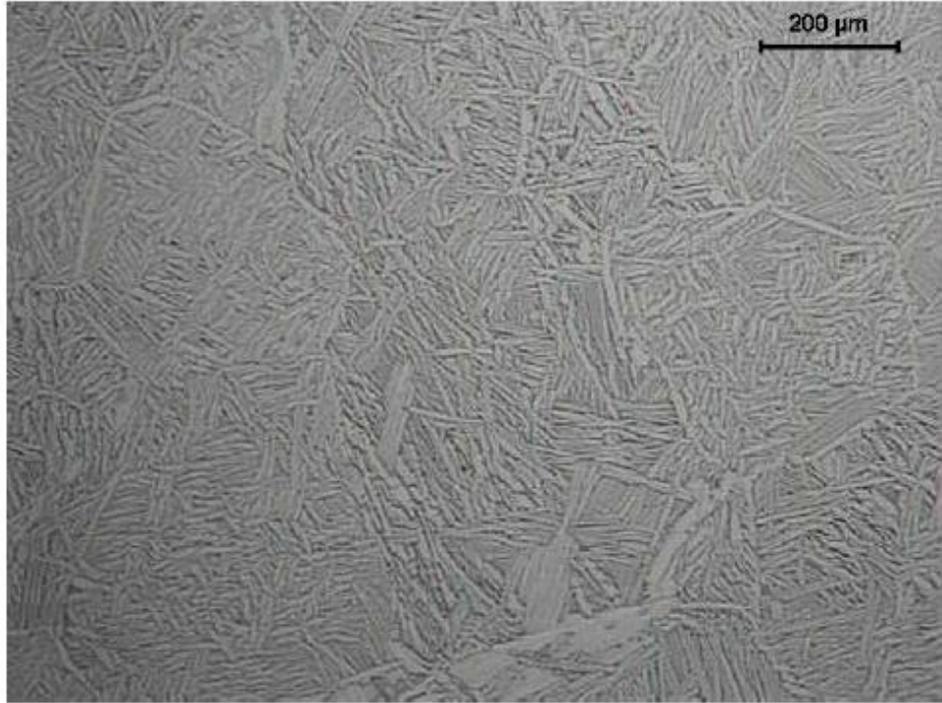


Figura 2 - Estrutura do tipo Widmanstätten do Ti-6Al-4V (Silva *et al.*, 2009).

### 3.3 Análise Microestrutural

#### 3.3.1 Microestrutura da liga Ti-6Al-4V

A transformação alotrópica do titânio da fase  $\alpha$  (HC) para a fase  $\beta$  (CCC) depende do tipo e do teor dos elementos de liga adicionados, ocasionando uma diversidade de microestruturas possíveis (Melo, 2007).

De acordo Caram (2010), a liga Ti-6Al-4V tem microestrutura bifásica e a Figura 3.3 ilustra bem as transformações de fase que ocorrem nas principais ligas de titânio.

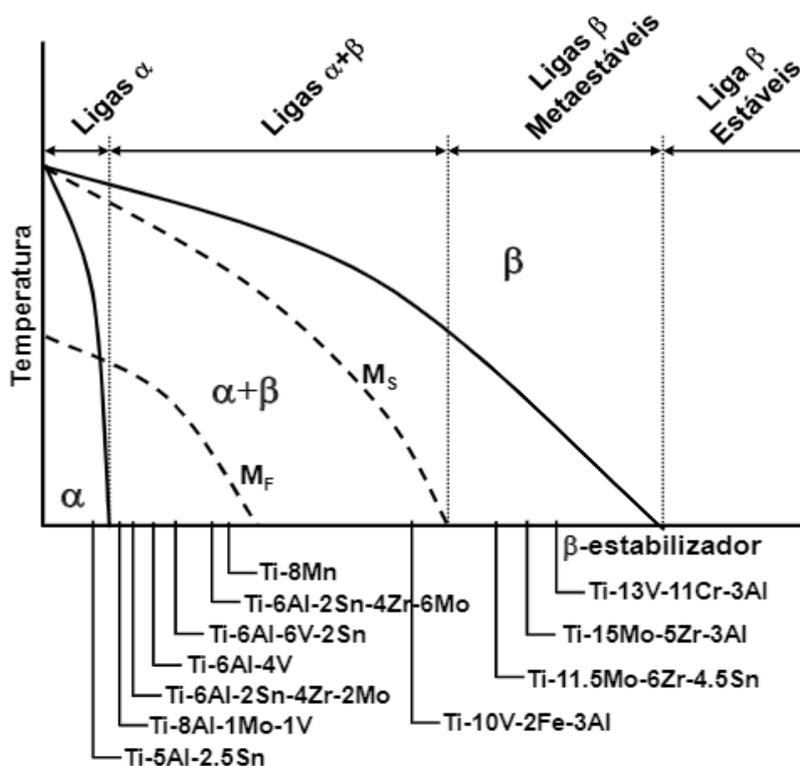
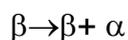


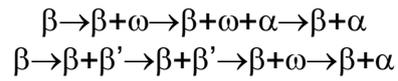
Figura 3 - Diagrama de fases das ligas (Caram, 2010).

Em consoante, Markovsky (1995 apud JESUÍNO et al., 2001) afirmam que as ligas de titânio em seu estado as-cast possuem grãos  $\beta$  grandes, regiões com finas estruturas lamelares dentro dos grãos e, em consequência disso, modestas propriedades mecânicas. Caram (2010) indica as possíveis transformações de fases que podem ocorrer nas ligas de titânio:

Transformação da liga Ti-6Al-4V:



Transformações de outras ligas de Ti:



Além disso, tratamentos térmicos rápidos são capazes de reverter a estrutura das ligas de titânio, causando uma mudança no arranjo das fases dentro dos grãos  $\beta$ , portanto, um aumento na resistência mecânica. A formação de martensita é proveniente de resfriamentos rápidos a partir do campo  $\alpha + \beta$  (Markovsky, 1995 apud Jesuíno *et al.*, 2001). A fase  $\beta$  se transforma em  $\alpha + \beta$  na temperatura de 1000°C e quanto mais finas as lamelas da liga Ti-6Al-4V, maior a sua resistência à fadiga (Donachie, 1985).

### 3.3.2 Microestrutura de juntas soldadas da liga Ti-6Al-4V

Na soldagem a laser, pode-se formar uma fase  $\alpha'$  martensítica na ZTA (região de transição). Quando se forma martensita na ZF, fica inibida a formação de trincas (Tsay *et al*, 1997). A transformação martensítica aumenta a energia de deformação interna do sistema, sendo assim a região da solda possui uma energia interna maior do que a microestrutura do metal base, o que possivelmente é a causa da baixa resistência a corrosão desta região (Bezerra *et al*, 1999). A elevadas taxas de aquecimento as fases  $\alpha + \beta$  se transformam totalmente em uma microestrutura fina  $\beta$ , enquanto o mesmo não ocorre a baixas taxas de aquecimento, pois esta favorece o crescimento do grão após a decomposição da fase  $\alpha$  primária (Jesuino *et al*, 2001).

Durante a soldagem a arco convencional e a laser desta liga bifásica, as estruturas formadas na região da zona fundida (ZF) e na zona termicamente afetada (ZTA) são diferentes do metal base (MB). Assim, a soldagem a laser é mais adequada visto que a energia é concentrada em uma pequena área onde a fusão e o resfriamento ocorrem em um curto intervalo tempo, evitando a dissipação de calor no sólido e alterando menos a microestrutura (Simoni, 2015). Além disso, quando soldados a laser, tanto o titânio quanto sua liga mais comum Ti-6Al-4V, apresentam um bom acoplamento e melhor penetração da solda graças a baixa condutividade térmica do metal e sua alta absorção da luz (Migliore, 1996).

A microestrutura da ZTA se altera em função da condução de calor no estado sólido a partir da interface ZF/ZTA. A região da ZTA pode possuir concentradores de tensão, que podem diminuir a resistência mecânica da liga em aplicações que exijam comportamento mecânico similar ao MB (Simoni, 2015).

O limite que delimita a interface entre a ZF e ZTA da liga Ti-6Al-4V é a temperatura liquidus da liga (1697°C). Enquanto a temperatura transus  $\beta$  de 1000°C delimita a região entre a ZTA e o MB. A Figura 3.4 mostra um cordão de solda com as três regiões presentes (Simoni, 2015).

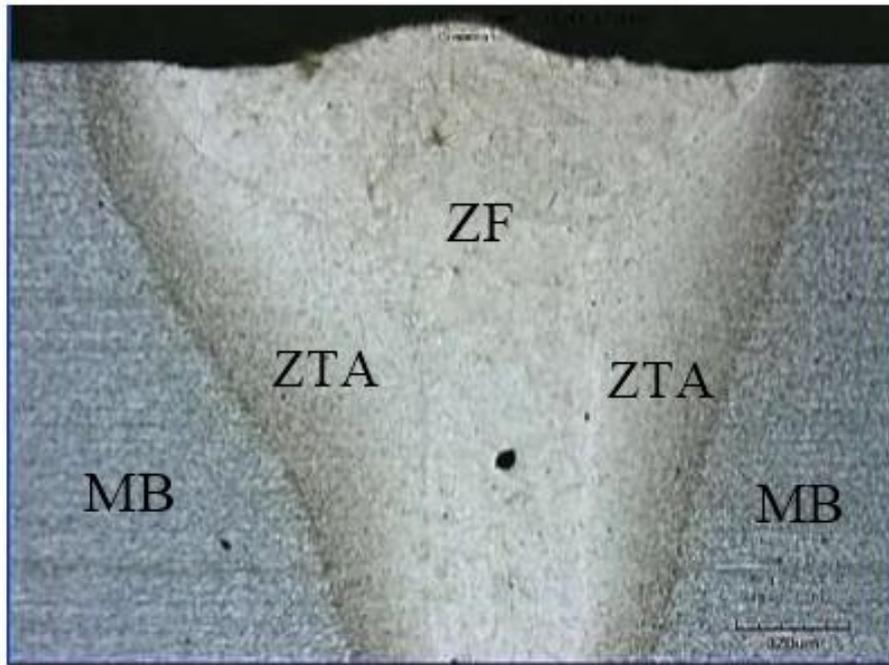


Figura 1 - Cordão de solda da liga Ti-6Al-4V com as regiões: MB, ZTA e ZF (Simoni, 2015).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir será apresentado o material que foi analisado neste estudo bem como um detalhamento de como foram realizados a caracterização estrutural e o ensaio de microdureza Vickers.

### 4.1 Materiais

Amostras da liga Ti-6Al-4V foram fornecidas na forma de chapas com 2mm de espessura, com composição química mostrada na Tabela 4.1 (Simoni, 2015). Como o material é o mesmo utilizado por Simoni (2015), as composições são as mesmas que lhe foram cedidas pela empresa Embraer.

Tabela 3 – Composição da liga Ti-6Al-4V que foi caracterizada (% em massa) (Simoni, 2015).

| Ti   | Al   | V    | Fe   | C     | N     | H     | O     | Y      |
|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Bal. | 6,58 | 4,13 | 0,21 | 0,025 | 0,003 | 0,002 | 0,178 | <0,001 |

Segundo Simoni (2015), fornecedor das amostras, a preparação antes de realizar a soldagem a laser consistiu em realizar um lixamento com lixa de 1200 mesh para remover a camada de óxido na região a soldar. Em seguida, removeu-se os resíduos com esponja e álcool isopropílico. Após a soldagem, que foi realizada em um passe único, observou-se que nas primeiras soldas ocorreu oxidação na região da sangria, devido à proteção gasosa presente apenas no topo da solda, o que fragilizou a região da solda. A fim de minimizar o problema, foi aplicada proteção gasosa em ambos os lados da chapa, diminuindo assim a formação de óxidos na região da ZF.

Essas amostras passaram por soldagem a laser com atmosfera protetora de argônio e utilizando-se um laser de fibra YLR-2000 da marca IPG, com potência de 2000W e diâmetro focal de 0,1mm. A chapa foi movimentada por meio de uma mesa de Controle Numérico Computadorizado (CNC). As juntas foram obtidas no Instituto de Estudos Avançados (IEAv), em São José dos Campos/SP.

Os parâmetros de soldagem a laser aplicados foram: 1300W de potência, velocidade igual a 40mm/s e fluxo de argônio para proteção igual a 60L/min (Simoni, 2015).

## 4.2 Caracterização Estrutural

As amostras foram embutidas em resina, depois passaram pelas lixas com a sequência de numerações: 400, 600, 800 e 1200. Em seguida, os polimentos foram realizados em pano com alumina de  $1\mu\text{m}$  e em pano com pasta de diamante de  $0,25\mu\text{m}$ . O ataque químico realizado foi o Kroll (5% de  $\text{HNO}_3$ , 5% de HF e 90% de  $\text{H}_2\text{O}$ ) com os tempos variados de 5s, 10s e 15s. Os tempos variados de ataque com Kroll tem a função de revelar as microestruturas e zonas do cordão, sendo comprovado antes pela literatura que demais reagentes não conseguem surtir o mesmo efeito, chegando até mesmo a provocar corrosão excessiva (Danielson *et al*, 2003). As análises foram realizadas ao microscópio óptico trinocular (Marca Olympus), acoplado a uma microcâmara digital de captura de imagens interligada ao computador com um software específico (UMIAS), permitindo a caracterização estrutural do metal base e das regiões que compõem a junta soldada. O trabalho foi realizado nos Laboratórios de Tratamento Térmico e Microscopia Óptica (LTM), da Escola de Minas/UFOP.

### 4.3 Ensaio de Microdureza

Foram obtidos perfis de microdureza na escala Vickers na seção transversal dos cordões de solda (Figura 4.1), os ensaios foram realizados de acordo com a Norma ASTM E92 (2016). O espaçamento foi definido em função da largura da ZTA, sendo realizados pelo menos quatro pontos nessa região, a distância entre indentações foi igual a 0,15mm. A carga utilizada foi de 200gf e o tempo de indentações igual a 5s.

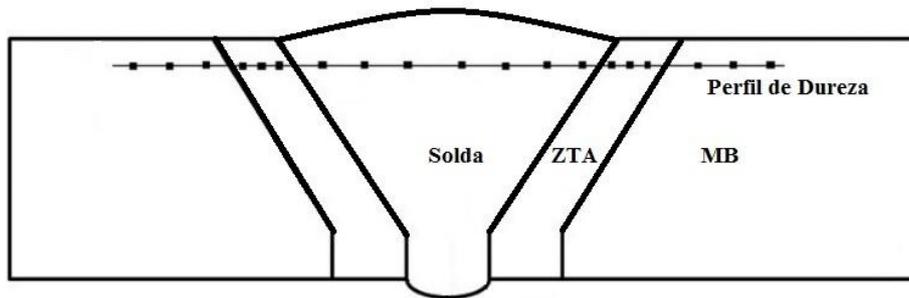


Figura 5 - Representação esquemática do perfil de microdureza Vickers na seção transversal do cordão de solda em amostra da liga Ti-6Al-4V.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Caracterização Estrutural do Metal Base

Na Figura 5.1 apresenta-se uma micrografia da seção transversal da liga Ti-6Al-4V, na qual pode-se observar uma matriz de fase  $\alpha$  e ilha de fase  $\beta$  nos contornos de grão. A microestrutura do MB mostra grãos alongados, que são devidos à laminação da chapa. Simoni (2015) obteve o tamanho médio dos grãos da fase  $\alpha$ , bem como a fração volumétrica das fases  $\alpha$  e  $\beta$ , através do uso de microscopia e *software* de análise de imagens ImageJ. Segundo Simoni (2015), cujas amostras utilizadas foram as mesmas do presente estudo, o tamanho médio de grão da fase  $\alpha$  é cerca de  $9\mu\text{m}$  e a fração relativa da fase  $\beta$  é de cerca de 13%. Esta fração de fase  $\beta$  é apontada pela literatura como largamente variável, conforme a história termomecânica do material. Isso já era de se esperar, pois de acordo com Markovsky (1995 apud Jesuíno et al., 2001), estas ligas de titânio possuem grãos  $\beta$  com finas estruturas lamelares dentro dos grãos. Micrografia com aumento maior (1000x) é apresentada na Figura 5.2.

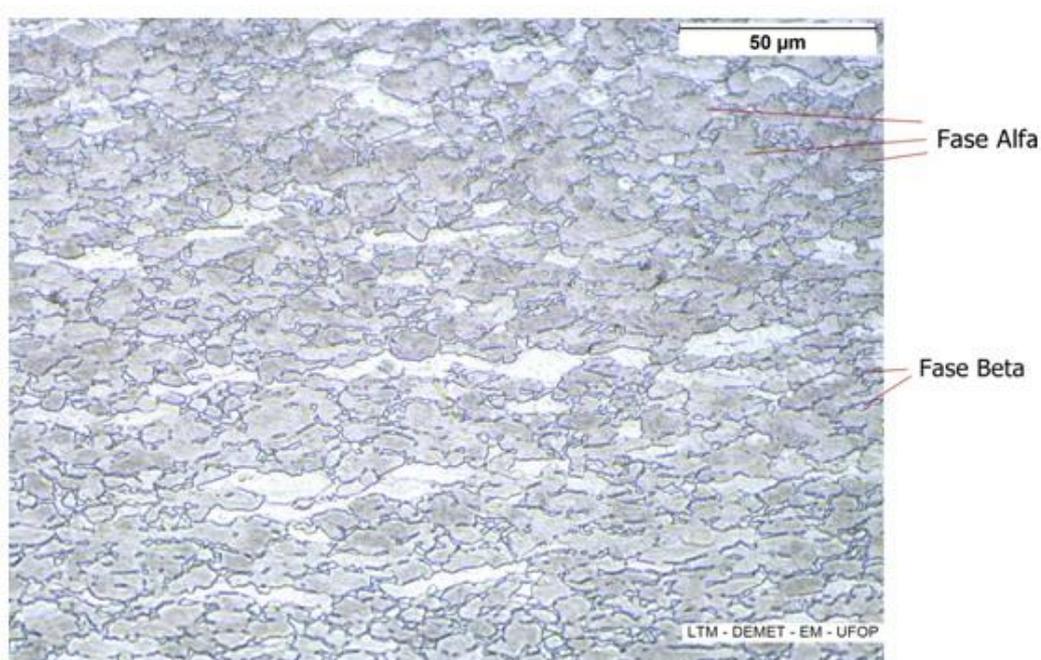


Figura 6 - Região central da amostra do metal base (Ti-6Al-4V), atacada com Kroll por 10s, indicando uma matriz de fase alfa e ilhas de fase beta nos contornos dos grãos. Aumento: 500x.

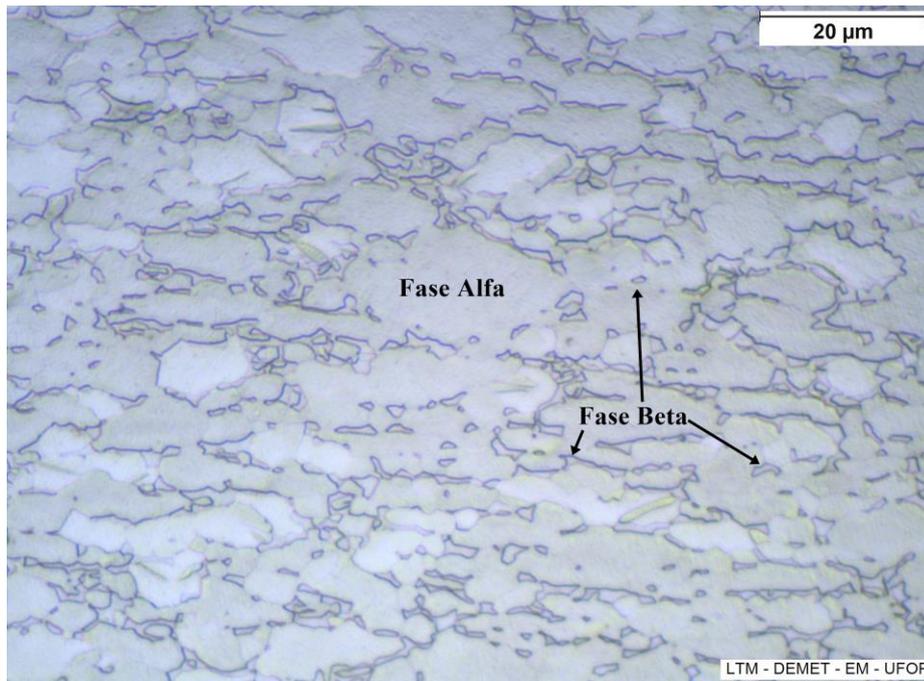


Figura 7 - Região central da amostra do metal base (Ti-6Al-4V), atacada com Kroll por 10s, indicando uma matriz de fase alfa e ilhas de fase beta nos contornos dos grãos. Aumento: 1000x.

## 5.2 Caracterização Estrutural da Junta Soldada

Micrografias obtidas em microscópio óptico na seção transversal da junta soldada são apresentadas nas Figuras 5.3 a 5.6.

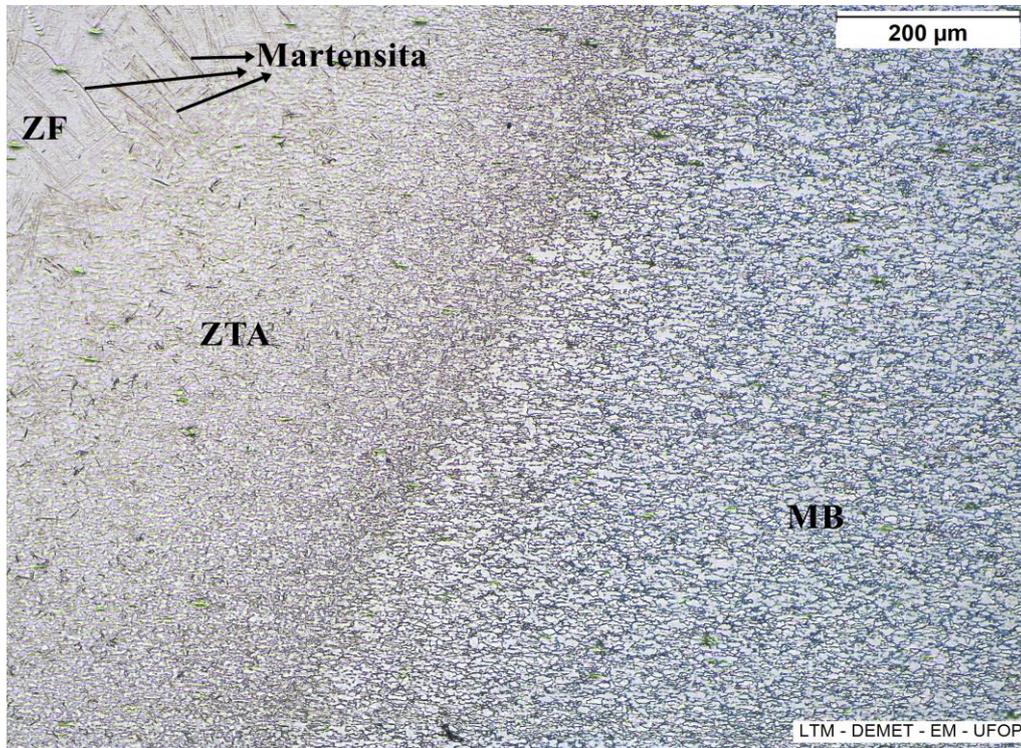


Figura 8 – Junta soldada da liga Ti-6Al-4V, visão geral: MB – ZTA – ZF. Ataque com Kroll por 15s. Aumento: 100x.

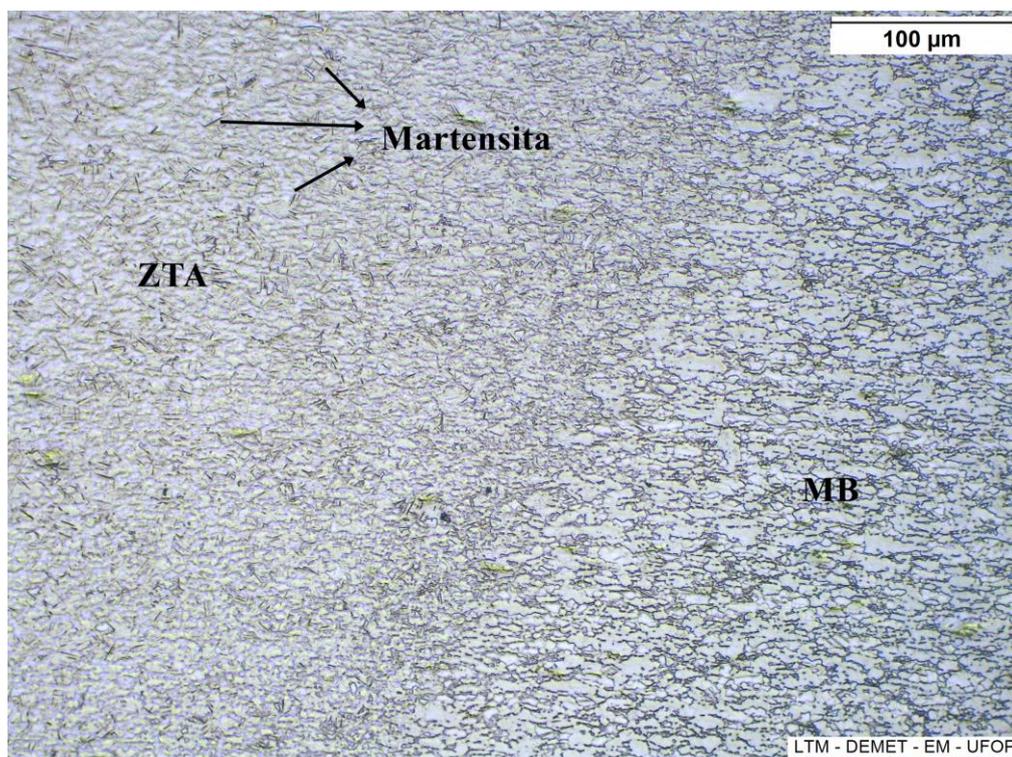


Figura 9 – Junta soldada da liga Ti-6Al-4V, visão geral: MB – ZTA. Ataque com Kroll por 15s. Aumento 200x.

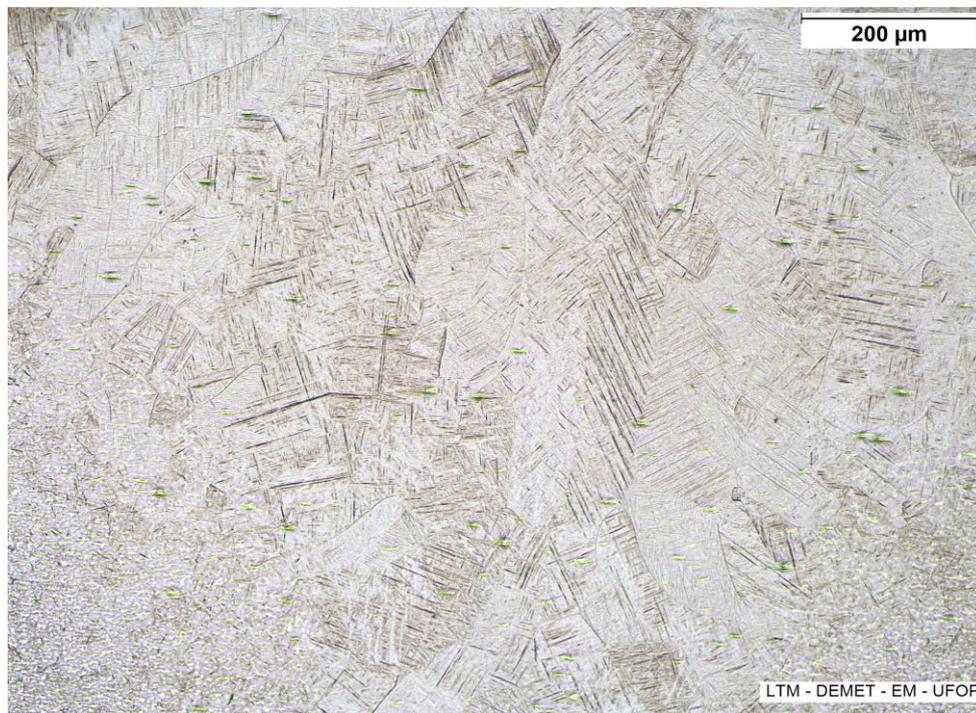


Figura 10 – Junta soldada da liga Ti-6Al-4V, ZF com presença de martensita. Ataque com Kroll por 15s. Aumento: 100x.

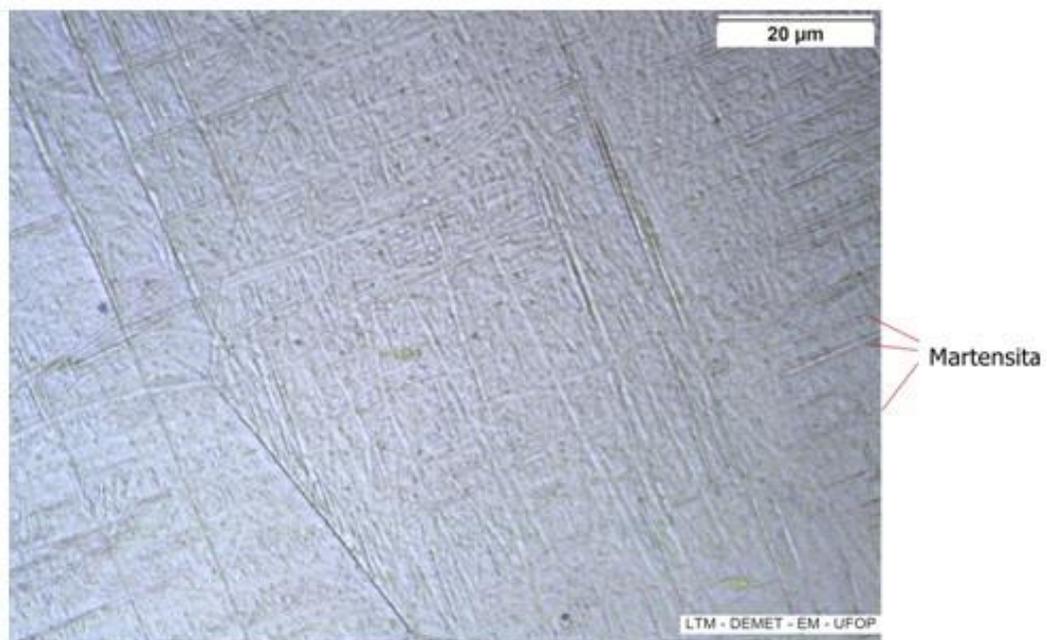


Figura 11 – Junta soldada da liga Ti-6Al-4V, ZF com destaque para martensita. Ataque com Kroll por 15s, aumento: 1000x.

A estrutura da junta soldada apresentou martensita na ZF e na ZTA, indicando que a microestrutura se alterou ( $\alpha + \beta \rightarrow \alpha'$ ) em função da condução de calor no estado sólido e posterior resfriamento. Isso significa que a estrutura sofreu muitas alterações mesmo com a soldagem a laser. Os resultados estão relacionados aos ciclos térmicos rápidos do processo (Simoni, 2015).

De acordo com os estudos de Melo (2007), a ZF é a região que mais formou fase  $\alpha'$ , enquanto que a ZTA formou  $\alpha'$  em menor potencial e também grãos  $\alpha$  equiaxiais. Outro ponto que merece destaque é a estrutura bruta de fusão na ZF (Figura 5.5), com uma grande quantidade de martensita dentro dos grãos colunares. Segundo Simoni (2015), esta estrutura deve ser tratada termicamente antes do seu uso de modo a recuperar um balanço entre as fases e suas propriedades mecânicas. Muito embora sejam muito eficientes no quesito de melhoria da peça, os tratamentos térmicos não são obrigatórios. Um exemplo disso é que Simoni (2015) realizou nitretação a plasma em suas amostras, formando nelas uma camada de nitreto de titânio com dureza elevada, buscando solucionar defeitos estruturais durante a soldagem causados por oxidação das faces unidas pela solda, porosidade na junta e superaquecimento do local de união. Simoni (2015) notou incongruências após a nitretação, pois embora as amostras apresentassem resistência ao desgaste, a morfologia martensítica da ZF passou a desenvolver placas de fase  $\alpha$  com fase  $\beta$  estrutural e a dureza diminuiu de cerca de 430HV a 300HV.

### 5.3 Microdureza Vickers

Os resultados do perfil de microdureza Vickers são apresentados na Figura 5.7. Analisando o perfil de microdureza, observa-se que as regiões em que a martensita se forma são as que apresentam maior dureza. Comparando o gráfico com as microestruturas, encontra-se maior quantidade de agulhas de martensita na ZF do que na ZTA, Figuras 5.4 e 5.5. Observa-se que a dureza foi aumentando ligeiramente da região do metal base para a região da zona fundida, passando pela ZTA. Isso comprova que à medida que a ZF se aproxima, a fração volumétrica da martensita aumenta e, conseqüentemente, acontece um endurecimento da liga.

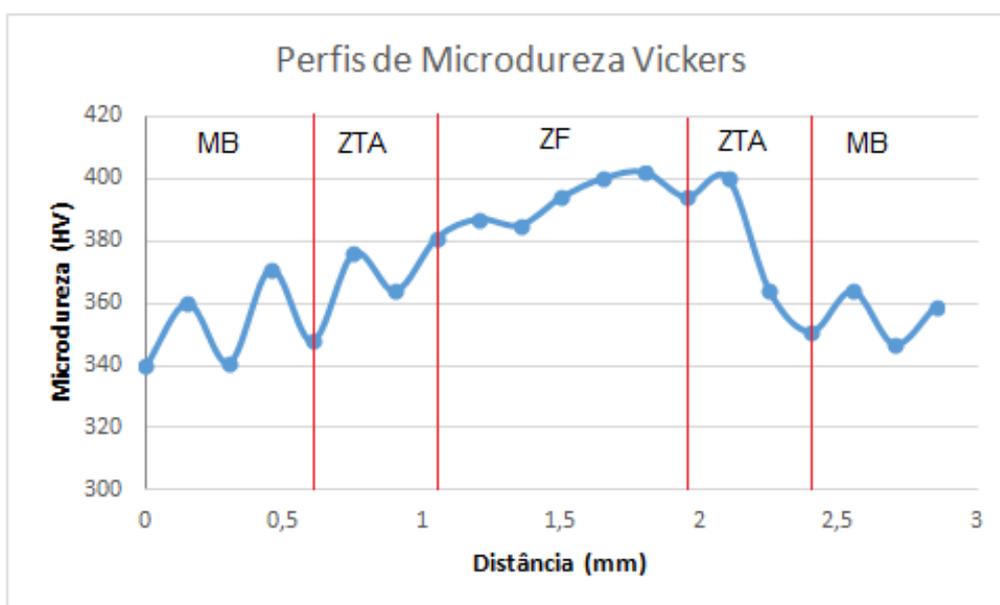


Figura 12 - Perfil de microdureza Vickers em junta soldada a laser da liga Ti-6Al-4V.

De acordo com Simoni (2015), a microestrutura da ZTA é uma mistura do metal base com presença de estruturas martensíticas. Dentro desta região corre a variação no tipo de microestrutura, quanto mais próximo da interface ZTA/ZF, mais agulhas de  $\alpha'$  (martensita) são encontradas. Isto ocorre porque a temperatura da ZTA próxima à ZF se situa próxima à temperatura de fusão e grande parte dos grãos da fase  $\alpha$  se transformam em  $\beta$ . Durante o resfriamento, ocorre a transformação martensítica da fase  $\beta$  para a estrutura  $\alpha'$ . Na região da ZTA relativamente mais fria e distante da ZF, não há tempo de difundir os solutos de forma gerar quantidade significativa de fase  $\beta$ , por isso há menos martensita

nesta região. Simoni (2015) estimou pelo software ImageJ que a fração relativa da fase  $\beta$ , tanto na ZF quanto na ZTA, é de cerca de 2%.

O perfil de microdureza traçado muito se assemelha ao de Melo (2007), segundo ele também houve formação de fase  $\alpha'$  na zona fundida; menor dureza na ZTA, em face da matriz apresentar menor fração de martensita transformada na matriz; e a dureza no metal de base (MB) é ainda menor devido à presença de grãos alfa e beta, por isso essa região é mais dúctil.

## 6 CONCLUSÕES

A revisão bibliográfica indicou que a liga Ti-6Al-4V possui muitas aplicações estruturais nas quais é importante associar alta resistência mecânica, resistência à corrosão e resistência à fluência.

A soldagem da liga Ti-6Al-4V geralmente é realizada por meio de processos com alta densidade de energia, como laser e feixe de elétrons. O material apresenta limitações de soldabilidade devido à sua elevada reatividade em altas temperaturas e transformações de fases, principalmente formação de martensita.

O metal base caracterizado apresentou grãos alongados devido a processo de laminação, com microestrutura formada por uma matriz de fase  $\alpha$  e ilhas de fase  $\beta$  nos contornos de grão.

A caracterização da junta soldada revelou uma proporção crescente de martensita da zona termicamente afetada até a zona fundida. Além disso, a zona fundida mostrou-se formada por grãos colunares com grande presença de martensita no seu interior.

Os resultados de microdureza foram coerentes com as análises metalográficas, indicando dureza crescente a partir do metal base até a zona fundida.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Para um melhor entendimento da influência da soldagem a laser na microestrutura da liga Ti-6Al-4V, será possível realizar futuramente ensaios mecânicos nas diferentes regiões soldadas das chapas para avaliar as suas propriedades mecânicas, bem como resistência mecânica, fluência, dentre outras. A coleta dessas informações agregará mais conhecimento ao trabalho, possibilitando o melhor entendimento sobre como a mudança na microestrutura influencia nas características do material nas regiões de solda.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM – American Society for Testing Materials. **ASTM E92 (2016) - Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials.** In: Annual Book of ASTM Standards, 2016.

AWS COMMITTEE ON HIGH-ENERGY BEAM WELDING AND CUTTING (EUA). **Recommended Practices for laser beam welding, Cutting, and drilling.** C 7.2:1998 Florida, 1998. 108 p.

BEZERRA, Roberto Messias; Souza, Paulo César Rioli Duarte de; Ramires, Ivan; Bottino, Marco Antônio; Guastaldi, Antonio Carlos. Microestrutura e resistência à corrosão do Ti c.p. soldado a laser utilizando em prótese sobre implantes. **Eclética Química.** Fundação Editora da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP, v. 24, p. 113-124, 1999.

CARAM, Rubens. **Recentes avanços em ligas de Ti do tipo  $\beta$ : Transformações de fase e aplicações.** In: 19° CBECIMAT 2010, Campos do Jordão. 21-25 de Novembro de 2010. Disponível em: <https://docplayer.com.br/8777515-Recentes-avancos-em-ligas-de-ti-tipo-transformacoes-de-fase-e-aplicacoes.html>. Acesso em: 13 de Outubro de 2018.

DANIELSON, Paul; WILSON, Rick; ALMAN, David. Plates of commercially pure titanium were welded and microscopically analyzed to understand the influence of joining variables on weld microstructures. **Advanced Materials & Processes.** Oregon - Usa, n. , p.39-42, fev. 2003.

DU, J.; LONGOBARDI, J.; LATHAN, W. P.; KAR, A. Laser marginal lap microwelding for ultra thin sheet metal. **Journal of Laser Applications.** V.14, n.1, p.4-8, 2002.

DONACHIE, M. J.; BOYER, H. E.; GALL, T. L. **Titanium.** Metals Handbook; ASM Metals Park; p. 91-99; 1985.

- DONACHIE, M.J. **Titanium: A technical guide**. ASM Metals Park, 1988.
- GAO, X. L.; ZHANG, L. J.; LIU, J.; ZHANG, J. X.; **A comparative study of pulsed Nd:YAG laser welding and TIG welding of thin Ti-6Al-4V titanium alloy plate**; *Materials Science & Engineering A*; v. 559; p.14-21; 2013.
- HENRIQUES, Vinícius André Rodrigues; CAMPOS, Pedro Paulo de; CAIRO, Carlos Alberto Alves; BRESSIANI, José Carlos. **Production of titanium alloys for advanced aerospace systems by powder metallurgy**. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN/CNEM, São Paulo, 2005.
- Garcia, A.; Ierardi, M.C.F.; Costa, A.R.; Vilar, R. **Aspectos Macro e Microestruturais Induzidos por Fusão Superficial com Laser em Aço Ferramenta**. *Metalurgia e Materiais*, n.51, 522-527, 1995.
- INFOMET. **Propriedades e Aplicações do Titânio**. 2013. Disponível em: <<https://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=93>> Acesso em: 13 de Outubro de 2018.
- INFOSOLDA. **Soldagem a laser: características do processo**. Artigo publicado em 22 de Fevereiro de 2013. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/190-soldagem-a-laser>>. Acesso em: 13 Outubro 2018.
- JESUÍNO, G.A.; RIBEIRO, L.M.F.; NAKAZATO, R.Z.; CODARO, L.R.O.H. Propriedades Mecânicas e Resistência à Corrosão da Liga Ti-4Al-4V Obtida da Reciclagem da Liga Ti-6Al-4V. **Materials Research**, v. 4, n. 2, p. 63-69, 2001.
- Markovsky, P.E. Improvement of structure and mechanical properties of cast titanium alloys using rapid heat treatment. **Materials Science and Engineering A**. V. 190, L9-L12, 1995.
- MELO, Alexandre Lyrio Viana de. **Análise das propriedades de chapas de titânio ASTM grau 5 (Ti6Al4V) soldadas a laser**. 2007. 119f. Dissertação

(Mestrado em Ciências dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro, 2007.

**METALS HANDBOOK. Properties and selection: nonferrous alloys and special purpose materials.** ASM International. Ed.10, p.3199-3200, 1990.

MIGLIORE, Leonard. **Laser Materials Processing.** Marcel Dekker, Inc. New York, 1996.

OLIVEIRA, V. M. C. A. **Estudo do Fenômeno da Fluência na Liga Ti-6Al-4V Submetida a Tratamentos de Nitretação e Carbonetação por Plasma.** 2010. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2010.

RAMIRES, I. **Estudo de Corrosão em Biomateriais.** 1998. Tese (Mestrado em Biotecnologia) - Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 1998.

READY J. F. **Industrial Applications of Lasers.** Academic Press. 2a ed., 1997.

ROCHA, Sicknan Soares da; ADABO, Gerson Luis; HENRIQUES, Guilherme Elias Pessanha; NÓBILO, Mauro Antônio de Arruda. Vickers Hardness of Cast Commercially Pure Titanium and Ti-6Al-4V Alloy Submitted to Heat Treatments. **Braz Dent Journal**, v. 17, n.2, p. 126 – 129, 2006.

SILVA, M. M.; OLIVEIRA, G. L. F. Avaliação microestrutural da liga refratária Ti6Al-4V com estrutura de Widmanstätten após ensaio mecânico de fluência. **Encontro de iniciação científica e pós-graduação do ITA.** 2009.

SILVA, M. M. da; VEDA, OTANI, C.; REUTHER, H.; LEPIENSKI, C. M.; JÚNIOR, P. C. S.; OTUBO, J. Hybrid processing of Ti-6Al-4V using plasma immersion ion implantation combined with plasma nitriding. **Materials Research**, v.9, n.1, p. 97 – 100, 2006.

SIMONI, H. R. S. **Estudo do comportamento mecânico da liga Ti-6Al-4V soldada a laser após aplicação de tratamento termoquímico a plasma.** 2015. 73f. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2015.

TSAY, L.W., TSAY, C. Y. The effect of microstructures on the fatigue crack growth in Ti-6Al-4V laser welds. **International Journal of Fatigue.** V.19; p.713; 1997.

YANG, F.; PI, Z.Q.; ZHAO, Q.Y.; RAYNOVA, S.; LIU, Q.; SHARP, K.; BRANDT, M.; BOLZONI, L.; QUIAN, M. Strong and Ductile Ti-6Al-4V Alloy Produced by Hot Pressing of Ti-6Al-4V Swarf. **The Minerals, Metals & Materials Society, JOM,** Pittsburgh, PA, v.71, n.3, p. 1056 – 1061, 2019.