

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

ANDREI DE SOUZA BONELLI

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA SOLDA A LASER NAS PROPRIEDADES DO  
TITÂNIO GRAU 1

Joinville

2017

ANDREI DE SOUZA BONELLI

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA SOLDA A LASER NAS PROPRIEDADES DO  
TITÂNIO GRAU 1

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Dr. Wagner Maurício Pachekoski

Coorientador: Dr. Alexandre Mikowski

Joinville

2017

## RESUMO

O titânio é um elemento metálico com grande interesse tecnológico devido a sua alta resistência a tração e à corrosão, por sua densidade relativamente baixa (comparada ao aço) e à capacidade relativa de resistir a altas temperaturas sem deformar. Este trabalho tem como objetivo esclarecer se o processo de solda a laser provoca algum efeito indesejado sobre as propriedades mecânicas do titânio, anteriormente descritas. Para que a soldagem sobre o titânio seja realizada com sucesso, é necessário que sua poça de fusão atinja uma temperatura aproximada de 1668°C, ao elevar o material a tão alta temperatura, tem-se a preocupação que este aquecimento mude a propriedade do local soldado, assim como a região vizinha, denominada como área termicamente afetada. Desta forma, foi feita uma pesquisa bibliográfica com base em publicações científicas nas áreas de materiais e soldagem, objetivando definir quais serão as prováveis reações que o titânio grau 1 possa apresentar depois de passar pelo processo de soldagem a laser. Assim, por meio de cruzamentos de informações pesquisadas com a do estudo de caso realizado será possível identificar possíveis falhas do material e erros na aplicação da solda a laser sobre o titânio grau 1.

**Palavras-chave:** Titânio Grau 1. Solda a laser. Ensaios Mecânicos. Metalografia.

## ABSTRACT

Titanium is a metal element of great technological interest due to its high tensile and corrosion resistance, its relatively low density (compared to steel) and the resistance to high temperatures without deformation. This work aims to clarify if the process of welding a laser causes some undesired effect on the mechanical mechanism of titanium described in English. What is a titanium welding with success, it is necessary that its melting puddle reaches a temperature of approximately 1668 °C, when raising the material to such a high temperature, it is a concern that this heating changes a property of the Local Soldado, a neighboring region, termed as thermally affected area. In this way, a bibliographical research was made based on scientific publications in the areas of materials and sales, aiming to define which are as probable reactions that titanium grade. Thus, through crosses of information researched with a case study performed and possible to identify possible material faults and errors in the application of the weld, a laser on titanium grade 1.

**Keywords:** Titanium Grade 1.Laser welding. Mechanical tests. Metallography.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>5</b>
1.1. OBJETIVOS .....	6
<b>1.1.1. Objetivo Geral</b> .....	<b>6</b>
<b>1.1.2. Objetivos Específicos</b> .....	<b>6</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>7</b>
2.1 TITÂNIO .....	7
2.1.1. ESTRUTURA CRISTALINA DO TITÂNIO E SUAS LIGAS (METALURGIA DO TITÂNIO) .....	8
<b>2.1.2. Titânio grau 1</b> .....	<b>11</b>
2.2. FUNDAMENTOS DA SOLDAGEM .....	12
<b>2.2.1. Propriedades da soldagem</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2.2. Solda a Laser</b> .....	<b>15</b>
2.3. SOLDA A LASER NO TITÂNIO.....	22
<b>2.3.1. Contaminantes gasosos</b> .....	<b>23</b>
<b>2.3.2. Contaminantes sólidos</b> .....	<b>24</b>
<b>2.3.3. Inspeção de soldagem</b> .....	<b>25</b>
<b>3. ESTUDO DE CASO</b> .....	<b>26</b>
3.1. METODOLOGIA.....	27
3.2. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
<b>4. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>33</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>34</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Novos processos e produtos são continuamente estudados e aplicados na indústria, o que causa impacto evidente no processo produtivo, na economia e na proteção ao meio ambiente (CARVALHO, 2012). A busca contínua das empresas pela inovação, trás a necessidade da troca do material das peças por um elemento que seja mais eficiente ao já utilizado, assim como da compatibilidade dos processos de fabricação com a nova matéria utilizada no produto, para que não haja modificações de suas principais características.

O titânio e suas ligas têm sido usados em diversas aplicações como na área médica, aeroespacial e petroquímica. A excelente relação entre resistência mecânica e peso, a alta resistência à corrosão, biocompatibilidade e resistência mecânica em altas temperaturas, são motivos pelos quais se substitui o alumínio em aplicações onde há temperaturas superiores a 180°C (SILVA, 2011). Por sua vasta gama de aplicações, o titânio tornou-se altamente comercializado no mundo.

Segundo Donachie (2000), o titânio puro funde a uma temperatura relativamente alta ( $1668 \pm 10^\circ\text{C}$ ). Para que a soldagem proceda com grande eficiência é necessário que no ponto de aplicação, o material chegue ao seu ponto de fusão. Os processos de soldagem a arco estão entre os mais usados para soldagem de titânio, entretanto, de maior eficiência térmica, como laser e feixe de elétrons, tem sido crescentemente empregados (YUNLIAN, 1993).

Ao expor a matéria à elevada temperatura, é possível que ocorra mudanças na sua estrutura cristalina e composição química, desta forma, podendo haver modificações em suas características. As propriedades mecânicas das ligas de titânio alfa-beta são significativamente alteradas pelo ciclo térmico oriundo da soldagem (DONACHEIE, 2000). Sabendo disso, há grande possibilidade que a região da solda esteja propensa a essas alterações, assim gerando na peça um local disposto a falhas.

Este trabalho busca estudar o comportamento do titânio grau 1 avaliando os níveis de influências térmicas geradas pela solda a laser. Para entender melhor este

problema, houve a necessidade de compreender a estrutura do titânio grau 1 e estabelecer a correlação entre suas mudanças de propriedade, falhas e processo de soldagem.

Para o desenvolvimento do presente trabalho será utilizada a pesquisa bibliográfica com base em publicações científicas nas áreas de materiais e soldagem. O estudo dos fenômenos físicos ocorrentes em um objeto de análise permite prever o comportamento futuro de análises semelhantes (KAVAMURA, 2007). O levantamento de ensaios de microdureza, tração e análises metalográficas encontrados na literatura mostrará como o titânio grau 1 responde após passar pelo processo de solda a laser.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo Geral

Estabelecer um estudo sobre os efeitos da solda laser nas propriedades físicas do titânio grau 1.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Definir as propriedades mecânicas do titânio grau 1;
- Descrever o processo de soldagem a laser;
- Esclarecer o comportamento da estrutura cristalina do titânio grau1 a exposição de temperaturas elevadas;
- Compreender a ocorrência de falhas em placas de titânio grau 1 após o processo de soldagem;
- Indicar as regiões com tendências a falha.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordados as principais definições sobre o titânio grau 1 e a solda a laser e também os principais conceitos da utilização deste tipo de soldagem aplicado.

### 2.1 TITÂNIO

Em 1791, William Gregor, reverendo, mineralogista e químico britânico descobriu o titânio. Ele examinou a areia magnética do rio local, Helford, no vale Menachan, na Cornualha, Inglaterra, e isolou uma *areia preta*, hoje conhecido como *ilmenite*. Ao remover o ferro com um ímã e tratar a areia com ácido clorídrico, ele produziu o óxido impuro de um novo elemento. Ele o chamou de *mechanite* (LEYENS; PETERS, 2003). Segundo o guia da Reactive Metals Inc. (RMI, 2000), a produção comercial de titânio não começou até a década de 1950. Naquela época, o titânio foi reconhecido por sua importância estratégica como um material leve, de alta resistência. Considerado um metal estruturalmente eficiente para aeronaves, de alto desempenho, servindo também para motores a jato e componentes de fuselagem, e assim foi considerado o metal da *Era espacial*. Com o aumento da capacidade de produção e da eficiência da obtenção do metal, hoje as ligas de titânio são comuns, facilmente disponíveis, competindo diretamente com aço inoxidável e aços especiais, ligas de cobre, ligas de níquel e compósitos.

Para Donachie (2000), há uma pequena lista de características que fazem o titânio ser um material estimado na indústria moderna:

- A densidade do Ti é 60% menor que a do aço. (40% da densidade do aço);
- Ti é excepcionalmente resistente à corrosão: muitas vezes supera o aço inoxidável como em ambientes de névoa e até mesmo no corpo humano;
- Ti pode ser forjado por meio de técnicas convencionais;
- Ti é refratário, embora o método de fundição seja o mais utilizado;



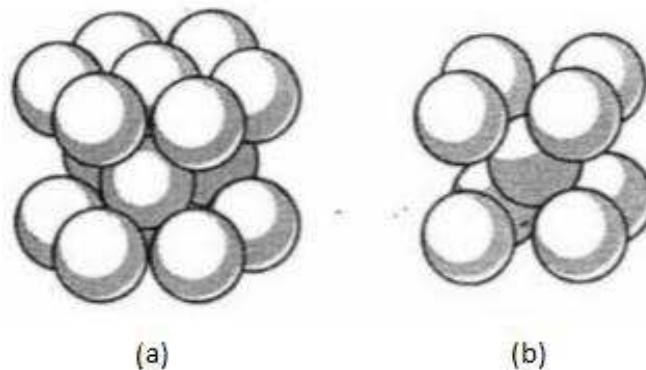
- Pode ser processado por meio de tecnologia de metal em pó;
- Ti é acoplável. (Isto pode ser conseguido por meio de soldadura por fusão, brasagem, adesivos, soldadura por difusão e fixadores.);
- Ti é moldável e facilmente usinado, tomando o devido cuidado.

Além de suas características atraentes de alta resistência à densidade para uso aeroespacial, a excepcional resistência à corrosão do titânio derivada de sua película de óxido protetor tem motivado uma extensa aplicação em água do mar, marinha, salmoura e serviço químico industrial agressivo nos últimos cinquenta anos (RMI, 2000). Devido a suas qualidades, o titânio vem ganhando amplo espaço nas seguintes indústrias: mísseis; espaçonave; produção química e petroquímica; produção e transformação de hidrocarbonetos; geração de energia; dessalinização; armazenamento de resíduos nucleares; controle de poluição, lixiviação de minérios e recuperação de metais; offshore, aplicações marítimas de profundidade e componentes navais da marinha; aplicações de placas de armadura; ânodos; componentes automotivos; alimentos e processamento farmacêutico; equipamento recreativo e desportivo; implantes médicos e dispositivos cirúrgicos; bem como muitas outras áreas.

#### 2.1.1. ESTRUTURA CRISTALINA DO TITÂNIO E SUAS LIGAS (METALURGIA DO TITÂNIO)

O titânio possui duas estruturas cristalinas elementares: uma cúbica de corpo centrado e outra hexagonal compacta (DONACHIE, 2000). O titânio puro, bem como a maioria das ligas de titânio, cristaliza a baixas temperaturas numa estrutura fechada, idealmente hexagonal, chamada  $\alpha$ -titânio. Em temperaturas elevadas, no entanto, a estrutura cúbica de corpo centrado é estável e é referida como beta titânio (LEYENS; PETERS, 2003). A Figura 1 ilustra as estruturas cristalinas.

Figura 1-Illustração das estruturas hexagonal compacta (a) e cúbica de corpo centrado (b).



Fonte: Donachie (2000, p. 21).

O titânio é um metal de transição que possui uma transformação alotrópica em torno de 883 °C (DONACHIE, 2000). Desta forma, quando o titânio puro estiver abaixo de 883° a fase  $\alpha$  estará em um estado estável, enquanto a fase  $\beta$ -estável ocorrerá se ultrapassar essa temperatura até o ponto de fusão do titânio (cerca de 1668°C) (RMI, 2000).

A existência das duas estruturas cristalinas diferentes e a temperatura de transformação alotrópica correspondente é de importância central, uma vez que elas formam a base para a grande variedade de propriedades alcançadas pelas ligas de titânio (LEYENS; PETERS, 2003). As fases  $\alpha$  e  $\beta$  denotam o tipo geral de microestrutura após processamento (DONACHIE, 2000). A partir das combinações possíveis a serem feitas, as ligas de titânio são classificadas em cinco fases:

- Alfa;
- Próximo de alfa (super alfa);
- Alfa-beta;
- Próximo de beta;
- Beta.


Segundo Donachie (2000), uma liga alfa não forma fase beta. Uma liga quase alfa forma apenas uma fase beta limitada durante o aquecimento e, portanto, pode parecer microestruturalmente semelhante a uma liga alfa a baixas temperaturas. Uma liga alfa-beta consiste em alfa e beta retida ou transformada.

Uma liga próxima a beta ou beta tende a reter a fase beta no arrefecimento inicial até a temperatura ambiente, mas precipita fases secundárias durante o tratamento térmico. Na Figura 2 destaca as principais ligas de titânio e as características das ligas próximas das fases  $\alpha$  e  $\beta$ .

Figura 2- Características das fases alfa e beta.


$\alpha$ (Alfa)	próximo de $\alpha$	$\alpha + \beta$	próximo de $\beta$	$\beta$ (Beta)
Ti (não ligado) Ti 5Al 2,5Sn	Ti 5Al 6Sn 2Zr 1Mo 0,2Si Ti 6Al 2 Sn 4Zr 2Mo Ti 8Al 1Mo 1V	Ti 6Al 4V Ti 6Al 6V 2Sn Ti 6Al 2Sn 4Zr 6Mo	Ti 8Mo	Ti 8Mo 8V 2Fe 3Al Ti 11,5Mo 6Zr 4,5Sn Ti 13V 11Cr 3Al



**Atributos favorecidos na propensão da fase  $\alpha$ :**

- Resistência a fluência;
- Melhor capacidade de soldabilidade;



**Atributos favorecidos na propensão da fase  $\beta$ :**

- Maior densidade;
- Boa resposta a tratamento térmico;
- Endurecimento;
- Resistência mecânica;
- Forjamento;

Fonte: Adaptado de Donachie (2000, p 21).

Pela Figura 2 nota-se a importância da metalurgia do titânio para obter características específicas desejáveis. Tanto a deformação plástica como a taxa de difusão estão intimamente ligadas à respectiva estrutura cristalina. Além disso, a rede cristalina hexagonal causa uma anisotropia distintiva do comportamento mecânico para o titânio alfa. O módulo de Young de monocristais de titânio variará entre 145 GPa para uma carga vertical ao plano basal e somente 100 GPa paralelo a este plano (LEYENS; PETERS, 2003).

### 2.1.2. Titânio grau 1

O titânio de grau 1 é o primeiro de quatro graus de titânio do sistema dos comercialmente puros (CP) ou *não ligados*. É o mais suave e mais dúctil deste grupo (SUPRA ALLOYS, 2017).

Segundo o manual da International Titanium Association (ITA, 2005), O titânio não ligado contém tipicamente entre 99% e 99,5% de titânio, sendo o restante constituído por ferro e os elementos de impurezas intersticiais hidrogênio, nitrogênio, carbono e oxigênio. A microestrutura do titânio não ligado consiste em grãos de fase alfa, com a possibilidade de pequenas quantidades de fase beta. As classes *não ligadas* de titânio são geralmente menos dispendiosas, e são mais fáceis de fabricar do que as ligas.

Graus de maior pureza (menor conteúdo intersticial) são menores em dureza, resistência e temperatura de transformação do que aqueles mais elevados no conteúdo intersticial. A alta solução dos elementos intersticiais oxigênio e nitrogênio tornam o titânio único entre os metais (DONACHIE, 2000). A Tabela 1 foi construída a partir de dados obtidos do manual (ITA, 2005) onde estão descritos os percentuais de impureza contidos no titânio conforme seu grau.

Tabela 1- Porcentagem de resíduos no CP.

Grau	N	C	Fe	H	O	Residuo Máximo
1	0,03	0,1	0,015	0,2	0,18	0,4
2	0,03	0,08	0,015	0,3	0,25	0,4
3	0,05	0,08	0,015	0,3	0,35	0,4
4	0,05	0,08	0,015	0,5	0,4	0,4

Fonte: Adaptado de ITA (2005).

O titânio de pureza comercial geralmente tem mais de 1000 partes por milhão (ppm) de suas impurezas principais. Como pequenas quantidades de impurezas intersticiais afetam muito as propriedades mecânicas do titânio puro, não é conveniente distinguir entre os vários graus de titânio CP com base em análises químicas. Os produtos da fábrica de titânio são mais facilmente distinguidos pelas propriedades mecânicas (BOYER; WELSCH; CODINGS, 2007). Por exemplo, os

quatro graus de titânio não ligado são agrupados da forma que esta descrita na Tabela 2:

Tabela 2: Propriedades mecânicas do titânio CP.

Grau	Resistência mínima à tração (MPa)	Resistência ao escoamento (MPa)
1	240	170-310
2	343	275-450
3	440	380-550
4	550	480-655

Fonte: Adaptado de Boyer (2007, p. 165).

O titânio grau 1 oferece ductilidade ideal para a conformação a frio. O material tem alta resistência ao impacto e é facilmente soldável. O material é capaz de grande desempenho. É usualmente fornecido em forma de chapas, frames e tubos (ITA, 2005).

## 2.2. FUNDAMENTOS DA SOLDAGEM

O Processo de soldagem teve seu grande impulso durante a II guerra mundial, devido à fabricação de navios e aviões soldados, apesar de o arco elétrico ter sido desenvolvido no século XIX (WAINER; BRANDI; MELO, 2013). Desde então foram criados outros métodos cada vez mais específicos para cada tipo de material e assim os tornando mais eficiente.

Atualmente, mais de 50 diferentes processos de soldagem têm utilização industrial e é o mais importante método para a união permanente de metais (MARQUES, 2011). A evidência da importância deste processo está no cenário industrial atual, onde a soldagem é tanto fundamental para a união de peças metálicas como também para o reparo.

Para definir o processo Wainer (2013), diz que denomina-se soldagem ao processo de união entre duas partes metálicas usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão. A solda é o resultado desse processo. Já Marques (2011), em uma de suas tentativas de definir soldagem, cita a definição adotada pela Associação Americana de Soldagem (AMERICAN WELDING SOCIETY – AWS), onde diz que soldagem é processo de união de materiais usado para obter a

coalescência (união) localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição.

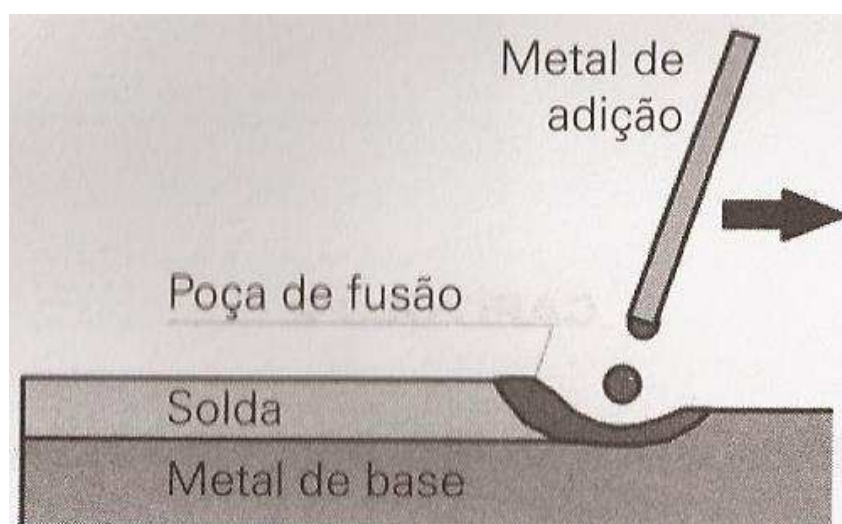
Os processos de soldagem podem ser classificados pelo tipo de fonte de energia usada para fundir as peças ou pela natureza da união (BRANDI, 2004). Dentre os processos mais populares de soldagem por fusão, temos o processo de soldagem a laser, onde sua fonte de calor é um feixe de luz concentrado.

A soldagem é o mais importante processo de união de metais utilizado industrialmente. Este método de ligação metálica é considerado em conjunto com a brasagem, de grande importância em aplicação, desde a indústria microeletrônica até a fabricação de navios e outras estruturas com centenas ou milhares de toneladas de peso (MARQUES, 2011).

### 2.2.1. Propriedades da soldagem

Como visto anteriormente a soldagem é uma operação que visa obter a união de peças, e a solda é o resultado desta operação (MARQUES, 2011). A Figura 3 representa um processo de soldagem e suas principais características.

Figura 3- Características do processo de soldagem.

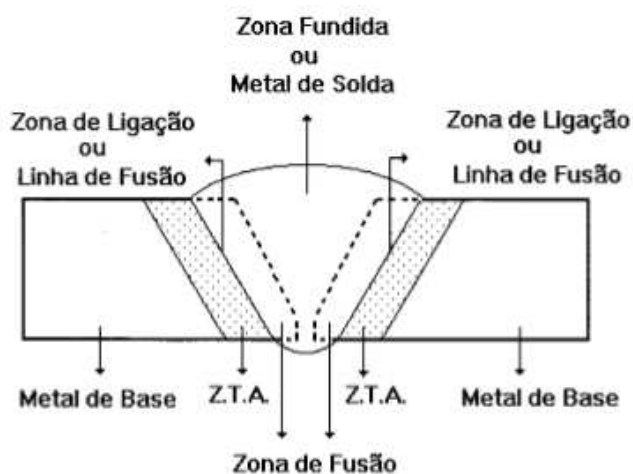


Fonte: Marques, (2011, p. 30).

Pela Figura 3 é possível caracterizar o metal base como a peça que está sendo soldada e a poça de fusão como princípio do cordão de solda, onde existe a capacidade de haver adição de material, se houver necessidade.

Já a Figura 4 representa as zonas de uma junta soldada, expondo as áreas termicamente afetadas da peça pelo processo de soldagem.

Figura 4- Zonas de uma junta soldada.



Fonte: Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem (2003, p. 12).

A Figura 4 permite a visualização da zona fundida (ZF), que é constituída pelo metal de solda, e a zona termicamente afetada (ZTA) que é a região do metal de base que tem sua estrutura e/ou suas propriedades alteradas pelo calor de soldagem.

Seria ideal se o metal de solda propriamente dito e a zona afetada pelo calor tivessem exatamente as mesmas propriedades e características que as do metal de base. Entretanto, isso não é possível, porque o metal de solda é fundido, enquanto que a maioria dos metais de base é utilizada no estado forjado ou no laminado (FORTES, 2004). Desta forma, pode-se afirmar que há mudanças de características mecânicas do metal na ZTA, assim podendo não resistir a alguns fatores externos em que a peça será submetida e em que o material base foi projetado.

Ainda segundo Fortes (2004), nenhuma solda por fusão pode ser realizada sem acumular um gradiente térmico no metal de base. A difusão de calor para o metal de base é fortemente influenciada pela temperatura da poça de fusão e pela velocidade de soldagem. Soldagem com alta potência e alta velocidade reduz o

gradiente térmico. Logo a ZTA pode acarretar em alguns defeitos na região da solda, tais como as listas abaixo:

- Fissuração por hidrogênio (designada também por fissuração sob cordão);
- Decoção lamelar;
- Trincas de reaquecimento;
- Fissuração por corrosão sob tensão;
- Trincas de liquação ou microfissuração.

### **2.2.2. Solda a Laser**

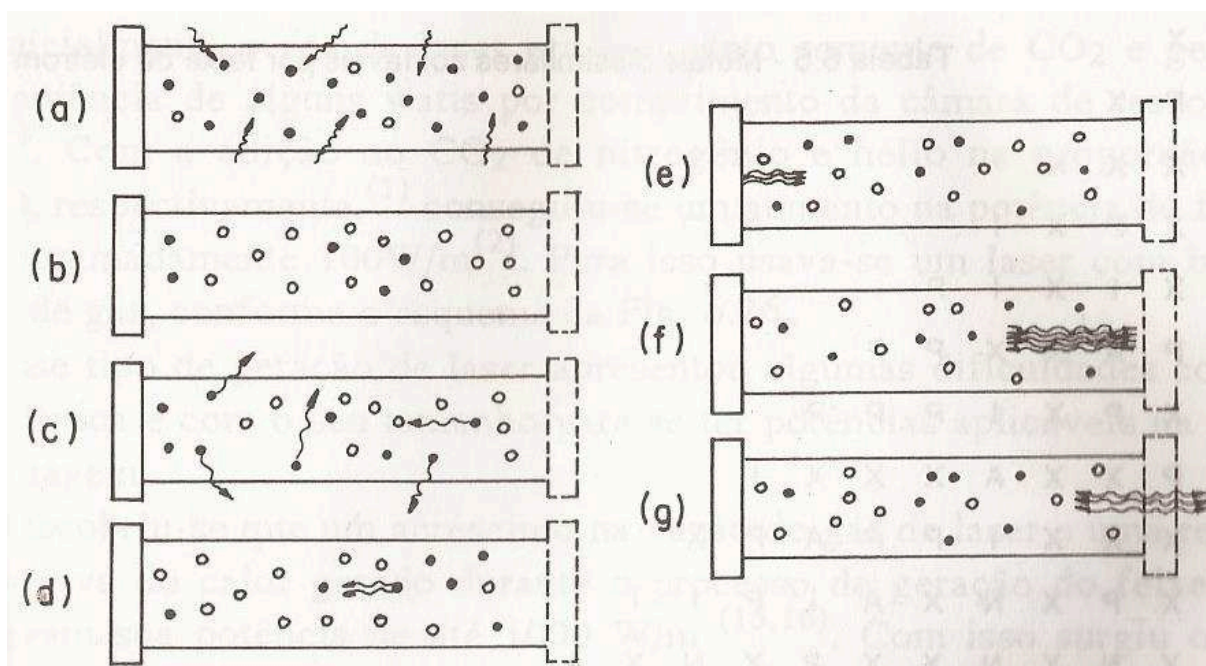
O estudo do laser foi iniciado após Einstein publicar uma pesquisa descrevendo o terceiro processo de integração da matéria a emissão estimulada de radiação e assim forneceu os princípios teóricos para um novo tipo de luz (MARQUES, 2011). Os primeiros lasers de alto desempenho foram criados em 1970 e popularizados na década de 80.

A soldagem a laser, devido ao grande volume de trabalhos e consequente avanço ao longo dos últimos anos, se constitui em uma das operações a laser mais importantes (SILVA, 2007). Durante a última década uma série de fabricantes de laser na Europa e Estados Unidos começaram a fabricar máquinas de soldagem a laser. Isso tornou a tecnologia mais acessível e fácil de usar e contribuiu para uma maior tomada da tecnologia (TURANOV; YAKOVLEV, 2012).

A soldagem a laser é constituinte do processo de soldagem de alta intensidade que são caracterizados por fornecer uma grande quantidade de energia em tempos reduzidos e através de pequena área para as peças serem soldadas (MARQUES, 2011). Para a formação da radiação a laser Marques (2011) explica que a radiação a laser surge quando os átomos de uma estrutura recebem energia externa, levando-os a um estado excitado. Para voltar ao estado fundamental, a estrutura libera energia na forma de fótons. Se o fóton emitido tiver a mesma fase do fóton que promoveu sua emissão, essa condição é dita coerência espacial. Além da coerência, o laser tem a propriedade de ser uma radiação direcional. Sendo que este evento ocorre através de um efeito cascata (WAINER et al. 2013). A Figura 5 representa o fenômeno descrito.



Figura 5 - Princípio de geração do feixe de laser.

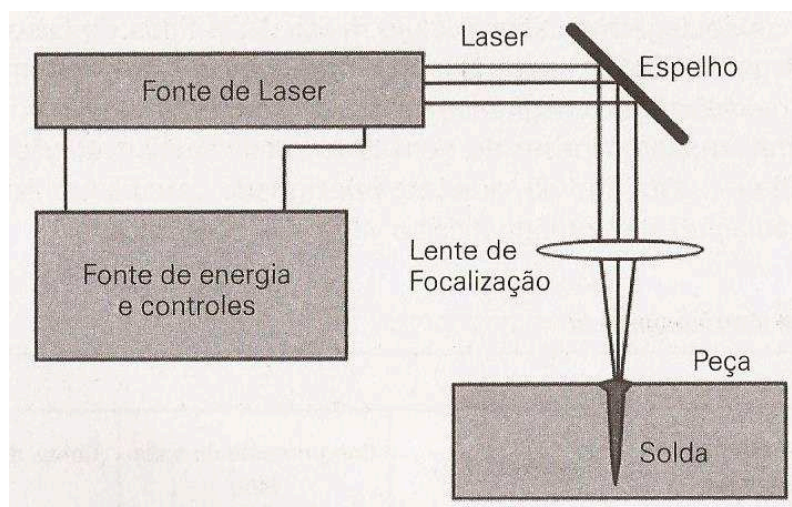


Fonte: Wainer, Brandi e Melo (2013, p.308).

Na Figura 5 os círculos brancos indicam que o átomo está em nível energético normal. Em (a) é possível visualizar a excitação com energia elétrica; em (b) passam para um nível energético maior; (c) mostra os átomos excitados emitindo fótons; (d) e acabam estimulando outros átomos a emitir mais fótons; (e) e logo incidem com um espelho côncavo; (f) refletindo totalmente a radiação incidente, esses átomos continuam excitando outros átomos até atingir outro espelho; (g) que permite a passagem somente para determinados comprimentos de onda, o restante da radiação retorna para continuar a ser amplificado.

A Figura 6 representa de forma mais simplista a fundamentação do funcionamento de uma máquina de solda a laser.

Figura 6 - Sistema básico para soldagem a Laser.



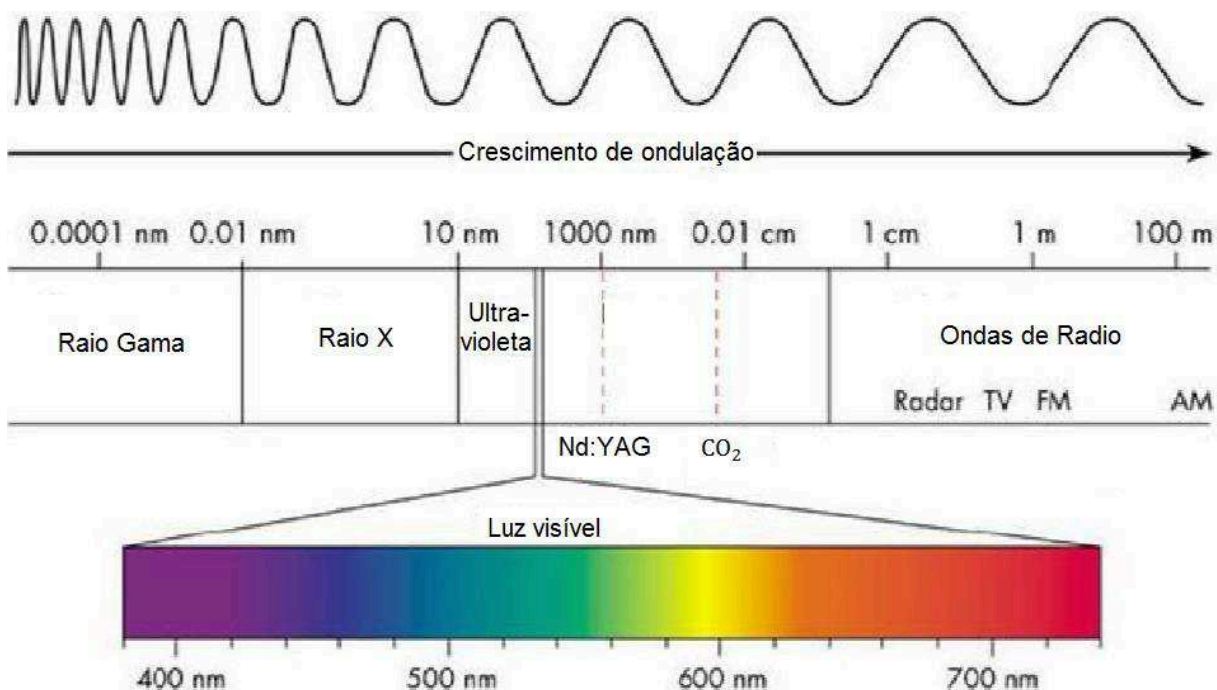
Fonte: Marques (2011, p. 310).

Pela Figura 6 é possível visualizar a fonte de Laser, também chamada de cavidade ressonante, é onde ocorre o processo de amplificação da radiação. Os espelhos para direcionar o caminho do laser e o ultimo estágio antes de chegar na peça é a lente de focalização

#### 2.2.2.1. Tecnologia

A tecnologia de soldagem a laser evoluiu muito. Dois tipos de lasers estão sendo usados com maior frequência para soldagem: o de CO<sub>2</sub> e o de Nd:YAG (NEODIMIUM – YTRIUM ALUMINUM GARNET). Ambos emitem radiação eletromagnética em comprimento de ondas entre as faixas do ultravioleta e infravermelho. Apesar de nem todo laser emitir radiação visível ao olho humano, este tipo de radiação é designada como a luz (MARQUES, 2011). A Figura 7 representa o espectro das radiações eletromagnéticas.

Figura 7- Representação do espectro eletromagnético.



Fonte: Adaptado de Turanov e Yakovlev (2012, p. 2).

Sendo que o laser utilizado na soldagem por CO<sub>2</sub> possui um comprimento de onda equivalente de 10.600 nm enquanto o laser do Nd:YAG é de 1064 nm.

#### 2.2.2.1.1. Laser de CO<sub>2</sub>

No processo do laser do CO<sub>2</sub>, inicialmente o gás de laser era composto somente de dióxido de carbono e gerava alguns watts por comprimento da câmara de ressonância. Com adição ao CO<sub>2</sub> de nitrogênio e hélio na proporção de 1:1:10, respectivamente, conseguiu-se um aumento na potência do feixe de aproximadamente 100 W/m. Para isso usava-se um laser com baixa vazão de gás (WAINER et al. 2013). Em alguns casos, outros gases podem ser adicionados à mistura. A mistura exata irá variar de acordo com a concepção, a pressão de funcionamento e o modo de funcionamento selecionado pelo fabricante do sistema laser (SINGH, 2012).

Singh (2012) ainda acrescenta que além de gerar o feixe de laser, os gases são usados para proteger a transmissão do feixe do ressonador para a peça de trabalho e também para cortar o material. Cada gás desempenha um papel

independente no processo total e é fundamental para uma operação bem sucedida (SINGH, 2012).

Esse tipo de geração de laser apresentou algumas dificuldades com a parte óptica e com o seu tamanho para se ter potências aplicáveis na área de soldagem (WAINER et al. 2013). Sua absorção de energia do feixe de laser por metias é baixa, com uma eficiência global de até 15%, embora a eficiência de transferência de energia do feixe de laser para a peça de trabalho pode ser tanto como 0,8 (WALSH, 2002).

Descobriu-se que um acréscimo na vazão do gás de laser e uma remoção efetiva do calor gerado durante o processo de geração do feixe aumentava sua potência em até 100 W/m. Com isso surgiu outra maneira mais eficiente de gerar laser, através de elevação de vazão do CO<sub>2</sub> (WAINER et al. 2013).

Uma importante característica do Laser de CO<sub>2</sub> é a possibilidade de se alterar a densidade de energia na superfície do material, variando-se a potência e o foco do feixe. Lasers de CO<sub>2</sub> de alta potência são utilizados para corte e soldagem. Neste Tipo de equipamento é necessária a entrada contínua do gás no sistema, que usa uma alimentação de tensão de algumas dezenas de kV (MARQUES, 2011).

Os feixes de laser de CO<sub>2</sub> utilizados no processamento de materiais devem ser mantidos e entregues à peça de trabalho de acordo com requisitos específicos (SINGH, 2012). As exigências básicas a serem cumpridas são:

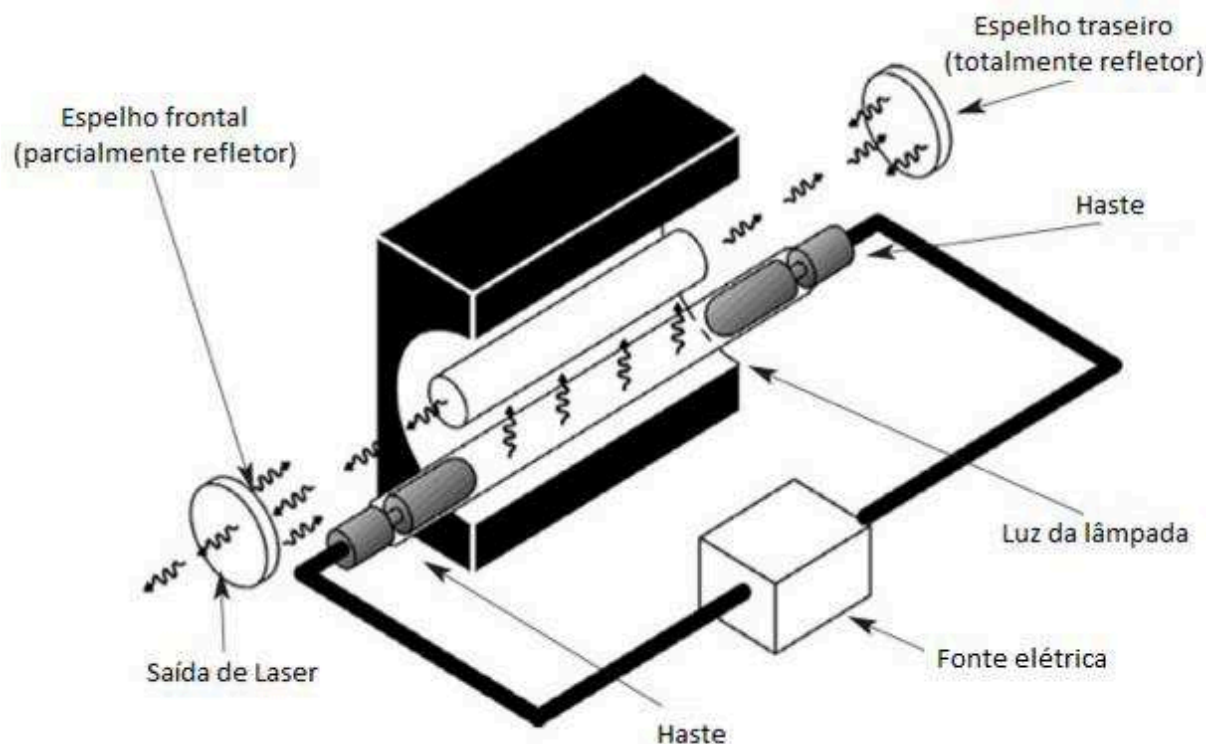
1. Manter um nível de potência constante em grandes distâncias;
2. Produzir resultados consistentes;
3. Viajar pela a peça de trabalho com precisão;
4. Focalizar precisamente no ponto de contato desejado.

#### *2.2.2.1.2. Laser Nd:YAG*

O cristal Nd:YAG é um cristal sintético, fisicamente duro, estável, opticamente isotrópico e tem boa condutividade térmica, o que permite a operação do laser em níveis de potência média e alta. O neodímio é um excelente material laser, porque produz um nível mais alto de potências de pico do que qualquer outro elemento de dopagem (AMADA, 2016).

Na Figura 8 pode-se ver o princípio de funcionamento e os principais componentes de um laser de soldadura Nd:YAG opticamente bombeado por uma lâmpada de flash.

Figura 8 - Componentes do Laser Nd:YAG.



Fonte: Adaptado de Directed Light INC. (2016).

O cristal faz o papel de prisma ao ser bombardeado por lâmpadas de flash, direcionando a luz em suas duas extremidades onde estão posicionados dois espelhos. O espelho traseiro reflete o raio para de volta do prisma e o espelho frontal reflete parcialmente, mas este último também deixa que o raio laser passe por ele.

Os equipamentos Laser de Nd:YAG produzem um feixe contínuo, comparado ao Laser de  $\text{CO}_2$ , apresentam menor consumo de energia e são empregados em aplicações em que se exige menores temperaturas (MARQUES, 2011). Seguindo uma linha de raciocínio semelhante, Turanov e Yakovlev (2012) afirmam que os lasers Nd:YAG são tecnologias bem estabelecidas e são atualmente os mais populares para aplicação de soldadura a laser, que requerem pequenos pontos ou soldagem com alguns milímetros de profundidade de penetração.

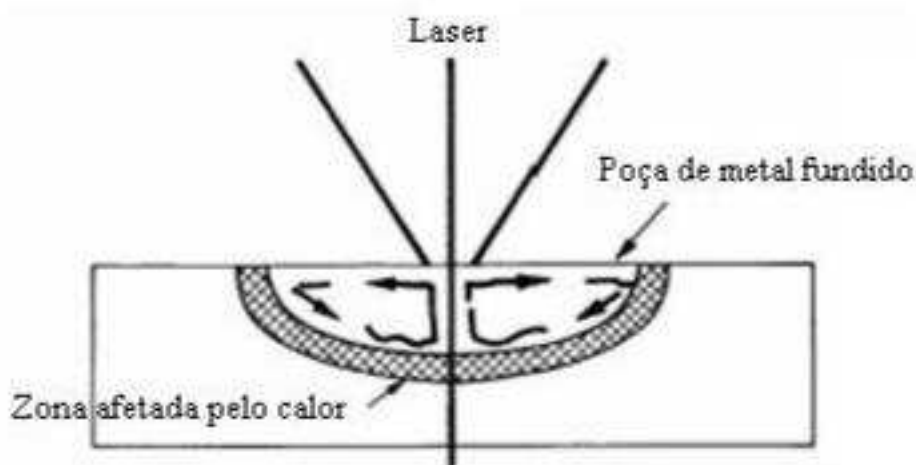
### 2.2.2.2. Técnica Operacional

As principais variáveis da soldagem a laser são a energia do feixe, a distância focal, a velocidade de soldagem, a reflexibilidade da peças e duração do pulso (MARQUES, 2011).

A intensidade do feixe na superfície no metal de base, que dependem da potência do laser e da posição do foco relativo à superfície, determina o modo de soldagem utilizado. Existem dois tipos de soldagem a laser, a soldagem por condução e por penetração (também conhecido como keyrole) (SILVA, 2007).

A soldadura por condução ocorre em densidade de potencia mais baixas ou velocidades de soldagem mais elevadas. A energia absorvida é transferida por condução de calor para o volume da peça de trabalho e produz uma poça larga e rasa de material fundido (WALSH, 2002). Este modo de soldagem tem a desvantagem de possuir penetração limitada, o que pode prejudicar as propriedades mecânicas da solda (SILVA, 2007). A Figura 9 representa como o metal base reage a soldagem por condução.

Figura 9- Soldagem a Laser por condução.

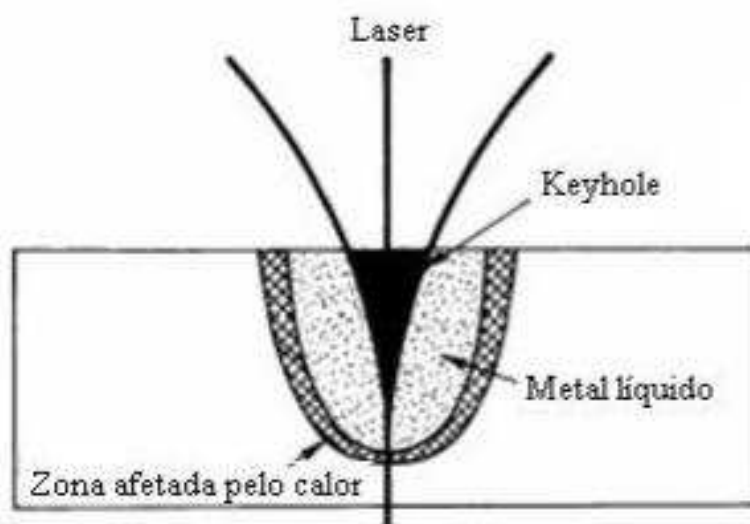


Fonte: Silva (2007, p. 2).

Já a técnica keyrole é a mais utilizada e somente é possível se a densidade de energia for suficientemente alta para fundir rapidamente toda a espessura. Para isso é necessário que o feixe esteja perpendicular à superfície das peças e que seja bem absorvido (MARQUES, 2011). Nesta técnica acontece a vaporização do

material e é formado um canal cheio de vapor através do qual a energia do laser penetra profundamente na peça de trabalho. São produzidas costuras profundas que aumentam a eficiência de absorção e fazem maior uso do feixe de laser. A energia necessária para derreter e vaporizar o material depende das propriedades físicas do material (coeficiente de absorção e condução de calor), do comprimento de onda do laser e das propriedades de superfície da peça de trabalho (WALSH, 2002). A Figura 10 representa as características da solda a laser por penetração.

Figura 10 - Solda a laser por penetração.



Fonte: Silva (2007, p. 2).

Se aumentada um pouco mais a energia na técnica de penetração, se torna possível o corte, que pode ser feito com grande precisão dimensional e alta velocidade (MARQUES, 2011).

### 2.3. SOLDA A LASER NO TITÂNIO

O titânio pode ser soldado praticamente com todos os processos clássicos de soldagem (MIG, TIG, laser, feixe de elétrons, etc) (PARIS, 2003). Atualmente, o processo de soldagem a laser tornou-se o método de escolha mais recomendado para a união de alguns metais, especialmente para o titânio e suas ligas (PIVETA,

2013). O processo apresenta baixa distorção e boa produtividade. E é mais flexível que TIG ou feixe de elétrons para automação (SOUZA, 2002).

A soldagem a laser é adequada para soldar o titânio e suas ligas, pois possui alta absorção do feixe de laser (WATANABE; TOPHAM, 2006). O calor gerado pelo processo de soldagem é tão rápido e forte, e sua taxa de arrefecimento é tão instantânea que tem uma influência significativa sobre as suas propriedades físicas, alterando a sua microestrutura. As articulações soldadas a laser são frequentemente mais frágeis do que o metal base utilizado na solda, apresentando menor ductilidade (BERG, 1995).

### **2.3.1. Contaminantes gasosos**

O titânio apresenta, em temperatura elevada, uma grande afinidade para o oxigênio, nitrogênio, carbono e hidrogênio. Portanto, deve-se levar em consideração estas características ao submeter o material a determinados processos (PARIS, 2003). O oxigênio e o nitrogênio, encontrados no gás atmosférico são os elementos que contribuem diretamente para diminuição da ductilidade na solda e com isso podem causar o aparecimento de micro fissuras no cordão de solda e na ZTA (SILVA, 2007). Para contornar este obstáculo a melhor atitude a se tomar é a utilização de um gás inerte durante o processo de união.

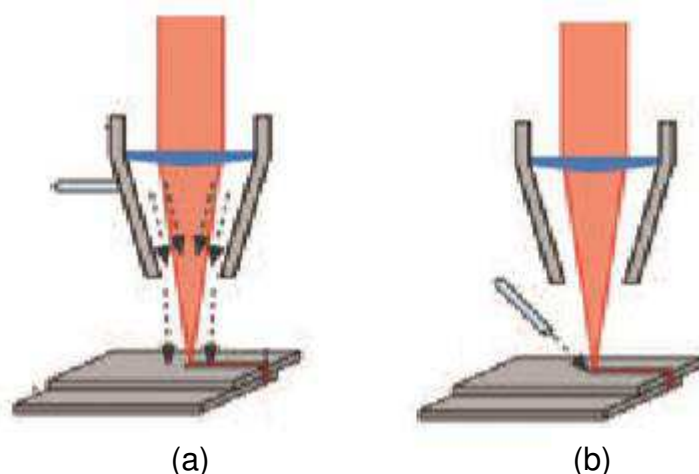
Os gases de proteção usados na soldagem laser são inertes e basicamente os mesmos que são utilizados na soldagem TIG, sendo principalmente utilizado o argônio, o hélio e mistura destes (MARQUES, 2011). A natureza do gás de proteção é considerada um dos fatores mais significativos para a natureza do material formado (SILVA, 2007). Na utilização do gás, o teor de umidade é um fator que também ser levado em consideração.

A empresa Messer, especializada em gás inerte próprio para soldagem a laser, adverte que diferentes misturas de gases de blindagem também afetam o feixe de laser. Isto levou ao uso de típicas misturas de gás para este processo de soldagem, sendo usual a utilização de argônio com mais um gás, geralmente hélio, oxigênio e hidrogênio.

Na Figura 11 estão duas sugestões retiradas do manual da Messer para aplicação do gás de blindagem em meio ao processo de soldagem.



Figura 11- Duas formas de aplicar o gás de blindagem: (a) Com o gás saindo diretamente do bocal de laser; (b) Aplicação direta no local de solda, por meio de um tubo.



Fonte: Adaptado de Messer (2012, p. 6).

A Figura 11 (a) ilustra a utilização do bocal da solda como um meio de direcionar o gás de proteção, já na imagem (b) será necessário a utilização de algum aparato que acompanhe o movimento do feixe de laser que está em ação sobre as juntas.

### 2.3.2. Contaminantes sólidos

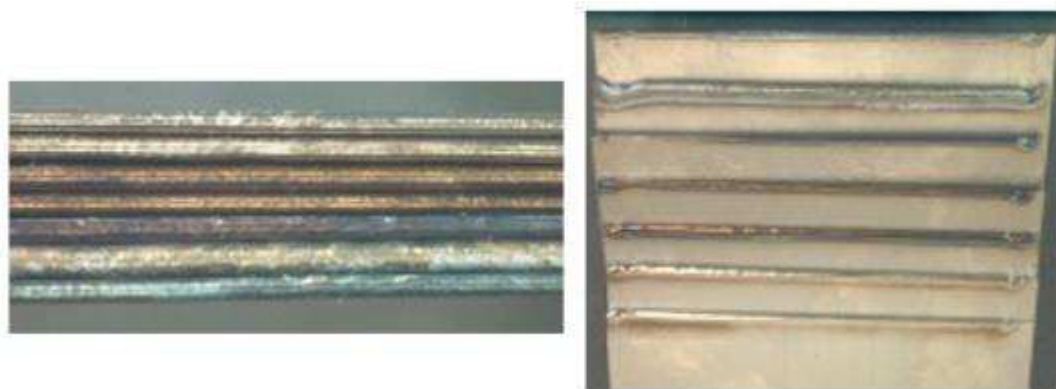
Outros elementos como hidrogênio e carbono presentes em óleos ou graxas também ajudam a diminuir consideravelmente a resistência da junta soldada (SOUZA, 2002). Mesmo presentes em pequenas parcelas estes elementos contaminantes afeta de maneira considerável as características da solda no titânio.

Desta forma, nota-se que a limpeza antes de efetuar a soldagem é de grande importância para a obtenção de uma união soldada com qualidade. A região a ser soldada deve ser livre de poeira, óleos ou graxas e até mesmo a oleosidade proveniente da mão do operador deve ser evitada através da limpeza da região de solda com álcool ou acetona (SOUZA, 2002).

### 2.3.3. Inspeção de soldagem

Através de sua pesquisa Souza (2002), conta que se atmosfera gasosa não for suficiente para a proteção da união, a solda terá colorações diferentes. Normalmente a solda de titânio tem uma coloração prateada de aspecto brilhoso. Com falta ou ineficiência da proteção gasosa a solda terá colorações de tons de palha, passando pelo amarelo, violeta e chegando ao branco, o que indica total contaminação da região soldada (SILVA, 2007). Estas condições de soldas estão representadas na Figura 12.

Figura 12- Cordões de solda a laser no Ti.



Fonte: Souza (2002, p. 35).

As diferentes tonalidades de coloração são provenientes da espessura da camada de óxido formada na região soldada e dependem da quantidade de oxigênio presente durante a soldagem (SOUZA, 2002). Desta maneira, as colorações servem como um indicativo de qualidade da solda realizada, sendo que se houver aparição de alguma tonalidade divergente de prata ao final do processo, será um indicio de que houve contaminação no material.

### 3. ESTUDO DE CASO

Este capítulo tem como a obra de Piveta (2013) sobre a Análise metalográfica do titânio submetido à soldagem laser ND: YAG e TIG, o qual se tomou como base para o estudo de caso desta pesquisa.

Devido as propriedades mecânicas, da resistência à corrosão e da biocompatibilidade, o titânio comercialmente puro (TiCP) e as suas ligas, tem sido utilizado há décadas por meio de próteses na indústria ortopédica e odontologia.

No mercado odontológico geralmente o Ti vem sendo aplicado em implantes osseointegrados e em estruturas metálicas de prótese sobre implantes, eliminando a possibilidade de efeitos adversos entre as diferentes ligas utilizadas nas variadas situações clínicas. Além do mais, o Ti traz facilidades de manuseio, como o de polimento por procedimentos mecânicos e eletromecânicos, resultando na utilização cada vez mais freqüente deste metal na confecção de próteses dentais, principalmente aquelas que utilizam implantes como suporte. Entretanto, a elevada temperatura de fusão, a baixa densidade e a reatividade química com gases e substâncias presentes no revestimento determinam alguns cuidados na fundição e na soldagem deste metal, além de uma infraestrutura laboratorial de alto custo para sua manipulação, encarecendo o custo final do tratamento odontológico.

Em função da alta reatividade com elementos atmosféricos, os processos Tugsten Inert Gas (TIG) e laser, ambos sob atmosfera de gás protetor, são mais indicados na soldagem do Ti. O processo de soldagem pela utilização de energia do laser como fonte de calor, Nd:YAG, tornou-se o método de escolha para união de alguns metais. Apesar do processo a laser ser o mais utilizado para soldar o Ti na odontologia, o custo do equipamento é elevado. Estudos preliminares demonstram que é possível a utilização do método de soldagem TIG para união do TiCP, cujo equipamentos tem um custo reduzido em relação ao laser.

O objetivo do presente estudo foi avaliar as microestruturas dos corpos de provas TiCP unidos individualmente pelos métodos de soldagem a laser Nd:YAG e

TIG. E assim comparar suas características metalográficas geradas por meio de cada processo.

### 3.1. METODOLOGIA

Para realização deste experimento foram confeccionados quinze corpos de prova a partir de hastes de latão incluídas em revestimentos Rematitan Plus (Dentaurum, Pforzheim, Alemanha), para fundição do Ti. Após a remoção das hastes metálicas, os anéis foram submetidos aos ciclos térmicos e os corpos de prova foram fundidos sob vácuo e atmosfera de argônio, processo de fundição plasma-skull a uma temperatura em torno de 1.640 °C.

A soldagem a laser foi realizada numa máquina de solda Braasel-Lasertech (Dentaurum), num total de 35 a 40 pontos de solda em cada lado da seção longitudinal da junta, sobrepostos em aproximadamente dois terços de suas superfícies. A potência de soldagem empregada foi 60% em cada lado do sentido transversal da união, com duração de 7ms, sob uma tensão de 310 V e potencia de 4,96 kW.

A soldagem TIG foi realizada com uma máquina de solda inversora AUTOGENIC-JVM (São Paulo, Brasil), que produziu uma corrente elétrica de 43 A durante 1 segundo, tempo de pré e pós-fluxo de gás argônio de 5 segundos, modo de soldagem igual a 50%, tempo de solda igual a 3 segundos, sob corrente contínua e eletrodo de tungstênio com diâmetro de 1 mm em forma de ponta de lápis, para aumenta a concentração do calor e diminuir a área afetada pelo calor.

Nenhum tratamento térmico foi instituído após as soldagens a laser e TIG.

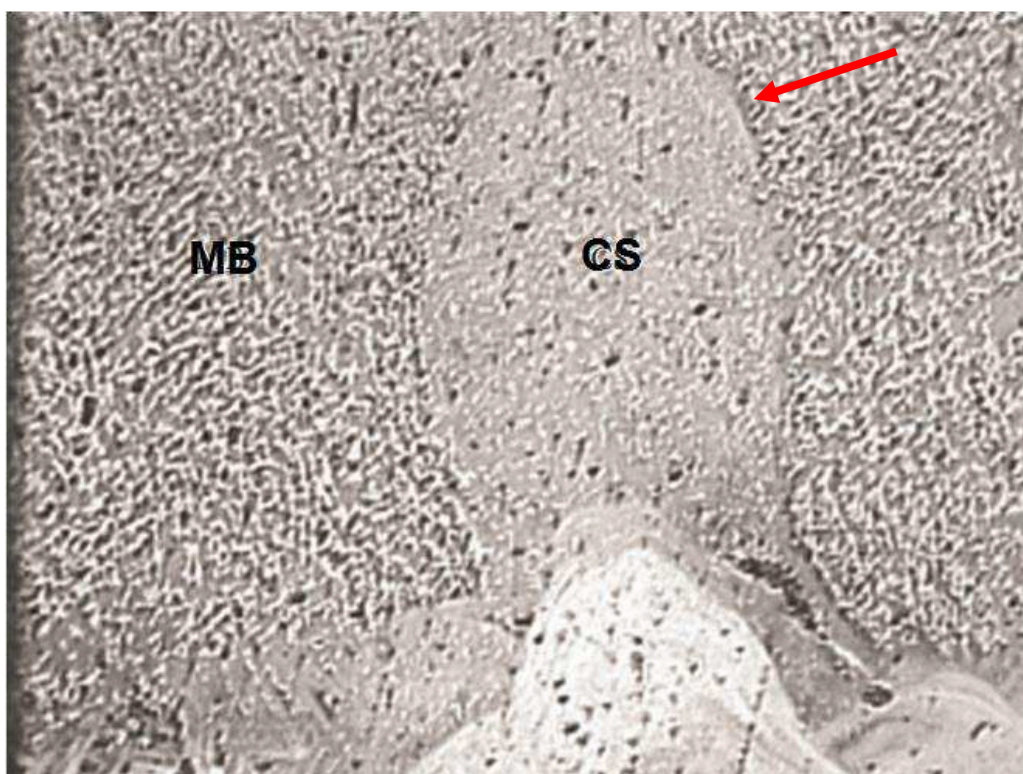
Para serem sujeitos às análises metalográficas os corpos de prova foram embutidos em resina polimérica e submetidos ao polimento mecânico com lixas (granulação de 100 a 1000), seguido de polimento com alumina (granulação de 1 a 0,3  $\mu\text{m}$ ) e ataque químico (Kroll). Após este preparo, realizou-se ao exame metalográfico em um microscópio óptico (LEICA DMR), seguido de análise das imagens (LEICA QWIN).

### 3.2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As alterações na microestrutura causadas pelos métodos de soldagem apareceram em todas as micrografias analisadas. Como já esperado, a soldagem a laser produziu uma zona de fusão e uma zona afetada pelo calor concentrado, limitada às áreas unidas. Assim como ilustrado na Figura 4.

Na Figura 13 está representada a microestrutura das amostras submetidas ao processo de soldagem a laser no sentido longitudinal, nela esta visível a grande profundidade que o laser alcança devido à alta energia concentrada em seu feixe, resultando em uma estreita ZTA em contorno no cordão de solda (CS), sendo que em alguns momentos há dificuldade de visualizar esta região.

Figura 13 - Microestrutura do cordão de solda obtido no processo de solda a laser aumentado 50 vezes.



Fonte: Adaptado de Piveta (2013, p. 3).

Como já dito em capítulo anterior, a ZTA pode-se tornar um elo fraco em uma junta soldada e, à medida que aumenta maior a possibilidade de diminuição da resistência do metal soldado. A redução na resistência mecânica dessa região pode

estar relacionada à falta de refinamento da estrutura granular, se comparado ao metal base ou ao cordão de solda. Além de que a linha que divide a ZTA do MB (indicada com a flecha vermelha na Figura 13) pode ser uma geradora de tensão devido à diferença do arranjo estrutural entre as duas zonas.

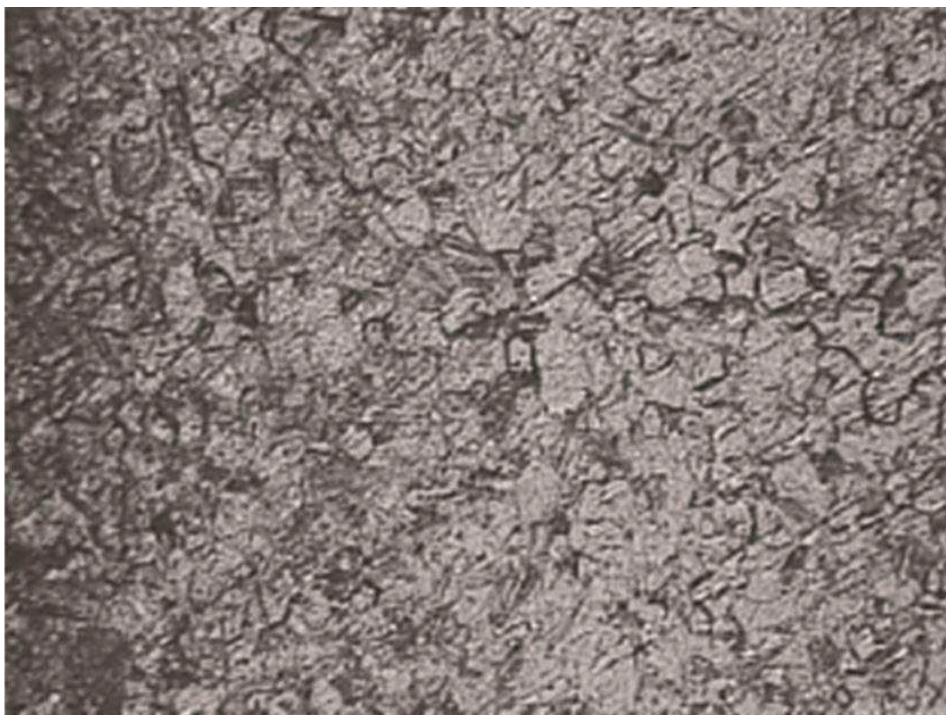
O aporte de calor e a velocidade de resfriamento são variáveis que interferem diretamente nas características do metal da ZTA, influenciando as transformações metalúrgicas e o comportamento mecânico. Processos, como solda a laser, promovem uma quantidade muito concentrada de calor, resultando em uma pequena ZTA.

A dureza do metal também poderá ser alterada pelos processos de soldagem. De acordo com estudos prévios, após a soldagem a laser no titânio puro, a dureza será maior no CS, diminuindo na ZTA e atingindo valores menos no MB em que a estrutura martensítica é formada.

Na solda a laser, a zona de fusão está diferenciada em virtude da alta homogeneidade estrutural dos grãos. A estrutura formada segue o arranjo do metal base, sendo o limite dos grãos uma continuidade do mesmo metal. Como resultado, a solda a laser pode reduzir a cerca de 20% a resistência do TiCP. De acordo com estudos prévios (TAYLOR, 1998).

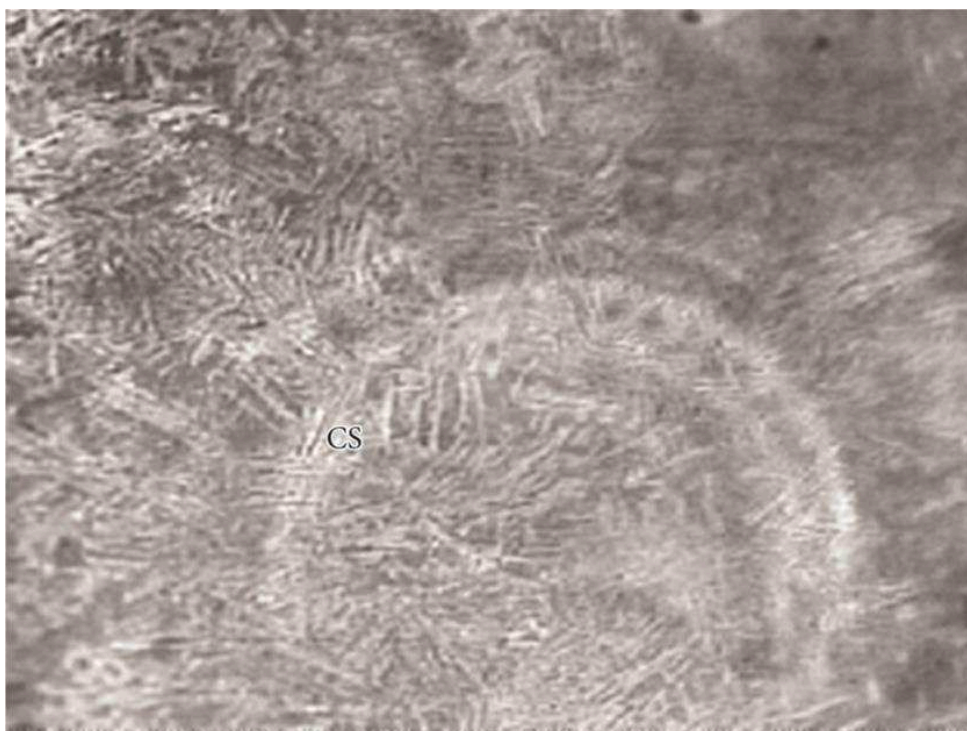
Com a Figura 14 e a Figura 15 pode-se comparar a diferença da microestrutura do Ti CP sem solda e da microestrutura do CS do TiCP soldado a laser.

Figura 14 - Microestrutura da região do metal base ampliada em 200 vezes.



Fonte:Piveta (2013, p. 3).

Figura 15 - Microestrutura da feita do CS ampliado 200 vezes.



Fonte:Piveta (2013, p. 4).

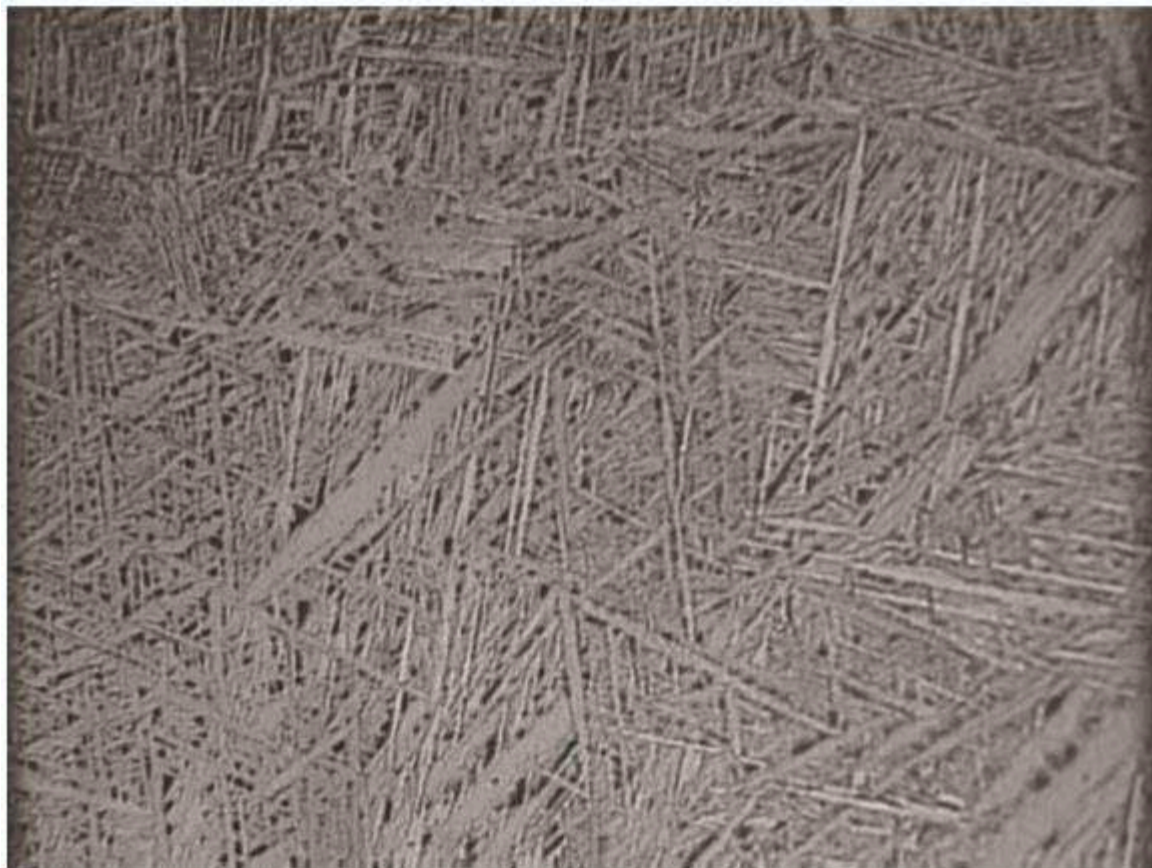
Na Figura 14, observa-se que o TiCP apresenta morfologia do tipo alfa granular, enquanto na Figura 15 é visível que a solidificação do CS originou a morfologia de agulhas finas, atributos da microestrutura martensítica. Essas características geradas é devido a soldagem a laser ser um processo rápido, com aquecimento e resfriamento quase instantâneo do metal, gerando uma transformação não difusa, onde os átomos não tem tempo para se recombinar e percorrem distâncias muito pequenas, ou de curto alcance. Na transformação martensítica de fase Beta-ccc para alfa-hcp, durante o resfriamento na soldagem, o mecanismo de cisalhamento introduz altas deformações no reticulado, causando uma mudança na estrutura da região transformada e determinando uma morfologia de placas finas chamada de estrutura martensítica. Esta fase acicular extremamente fina apresenta alta resistência mecânica e dureza, porém baixa ductilidade e tenacidade.

Na transformação martensítica o movimento dos átomos não é de maneira nenhuma livre e nem individual, mas absolutamente coordenado com o movimento dos átomos. Se durante a transformação a acomodação acontecer com deformação elástica da estrutura, parte da energia será armazenada, de maneira análoga a energia que é armazenada em uma mola comprimida, resultando em tensões pré-tensionadas na solda.

Para fins de comparação do método de soldagem a laser e TIG a Figura 16 mostra a microestrutura resultante da soldagem no TiCP pelo processo de soldagem TIG.



Figura 16 - Microestrutura gerada após a soldagem TIG.



Fonte: Piveta (2013, p. 4).

A soldagem TIG altera a estrutura do titânio, formando microestruturas chamadas de lamelas de Widmanstätten. Esta estrutura possui maior tamanho médio dos grãos se comparada ao titânio puro sem solda. Esse aumento no tamanho dos grãos pode resultar em maior resistência à oxidação da liga, uma vez que quando maior for o tamanho do grão, menor será a energia de ativação de seu contorno.

#### **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Ao analisar a solda a laser vista no estudo de caso, como o esperado, verificou-se uma grande profundidade do CS contornado por uma pequena ZTA, caracterizando o uso da técnica de solda a laser por penetração (keyhole). Por esta prática possuir uma concentração de energia pontual, ela é utilizada geralmente para garantir mínimas distorções e bom acabamento do produto.

Contudo, como visto nas imagens da microestrutura, a grande velocidade de resfriamento do CS resultou em uma estrutura martensítica no Ti. Como consequência do decorrido a solda apresentará grande resistência mecânica e dureza, mas também apresentará fragilidade, assim estando propícia a formação de trincas e vulnerável a alterações drásticas de forças. Assim podendo concluir que um impacto ou mudanças repetidas de pressão no local, representam um grande risco à ruptura do material.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TECNOLOGIA E SOLDAGEM (São Paulo) (Comp.). **Soldagem**. São Paulo: Senai, 2003.

AWS. American Welding Society. **Welding Science and Technology**: Test methods for evaluating welded joints. 9. ed. Miami. 2000. Cap. 6, p. 240.

BERG, Einar. **Mechanical properties of laser-welded cast and wrought titanium**. Bergen: University Of Michigan, 1995.

BOYER, Rodney; WELSCH, Gerhard; CODINGS, E.w.. **Materials Properties Handbook: Titanium Alloys**. 4. ed. Miami: Asm, 2007.

CARVALHO, Sheila Medeiros de. **BAUER, José Roberto de Oliveira. Desenvolvimento da Tecnologia de Soldagem do Titânio pelo. São Paulo: Usp, 2007. 62 p.** Lorena: Usp, 2012. 159 p.

DONACHIE, Matthew J.. **Titanium: A Technical Guide**. New York: Asm International, 1988. 469 p.

FORTES, Cleber. **Apostila de Metalurgia da Soldagem**. Contagem: Esab, 2005. 48 p.

KAVAMURA, Haroldo Akira. **Aplicação de solda laser em carrocerias automotivas**: estudo comparativo entre a solda laser e a solda ponto por resistência. 2007. 123 f. Dissertação (Mestrado) –Programa de Pós-graduação em Engenharia Automotiva, Faculdade de Engenharia Automotiva, USP, São Paulo, 2007.

**LASER Welding Fundamentals**. Wixom: Amada, 2015. 42 p.

LEYENS, Christoph; PETERS, Manfred. **Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications**. Köln: Wiley-vch, 2003.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: Fundamento e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2011.

MESSER (Org.). **Lasline**: gases for laser welding and brazing. Krefeld: Messer, 2012.

PARIS, Aleir Antonio Fontana de. **Estudos paramétricos na soldagem de titânio com laser CO2**. Santa Maria: Comibu, 2003.

PIVETA, Ana Cláudia Gabrielli. **Análise metalográfica do titânio puro submetido à soldagem laser ND: YAG e TIG**. São Paulo: UNESP, v. 42, 2013.

SILVA, Douglas Ramos da. **SOLDAGEM A LASER DE LIGAS DE TITÂNIO**. São José dos Campos: Ipn, 2003. 9 p.

SINGH, Ramesh. **Applied welding engineering: Processes, Codes and Standards**. Massachusetts: Elsevier, 2012.

SOUZA, Charles Cristian de. **CONTRIBUIÇÕES PARA A SOLDAGEM DE TITÂNIO A LASER NA GEOMETRIA DE JUNTA EM ARESTA**. Florianópolis: Ufsc, 2002.

SPECIFICATIONS BOOK. **Specifications Book**. 4. ed. Broomfield: Ita, 2005.

SUPRA ALLOYS. Sa. **Titanium Grade Overview**. 2017. Disponível em: <<http://www.supraalloys.com/titanium-grades.php>>. Acesso em: 12 jun. 2017.

TAYLOR, James. **Effects of joint configuration for the arc welding of cast Ti-6Al-4V alloy rods in argon**. Halifax: Dalhousie University, 1998.

**TITANIUM Alloy Guide**. Niles: Rmi Company, 2000. 45 p.

TURANOV, Sergey B.; YAKOVLEV, Alexey N.. **Laser Welding Technology**. Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2012. 2 p.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem: processo e metalurgia**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1992.

WATANABE, Ikuya; TOPHAM, Scott. **Laser Welding of Cast Titanium and Dental Alloys Using Argon Shielding**. Xangai: International Studies University, 2006.

WALSH, C. A.. **LASER WELDING: Literature Review**. Cambridge: University Of Cambridge, 2002. 21 p.

YUNLIAN, Qi. **Electron beam welding, laser beam welding and gas tungsten arc welding of titanium sheet**. Republic Of China: Elsevier, 2000.