



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



# **MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO**

## **EM ENGENHARIA METALÚRGICA**

**“AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA SOLDAGEM A *LASER* SOBRE A  
MICROESTRUTURA E AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UMA  
LIGA Ti-6Al-4V”**

**Gabriel Santana Sabino**

Orientador: Prof. Luiz Cláudio Cândido

Ouro Preto, março 2023.

**Gabriel Santana Sabino**

**“AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA SOLDAGEM A *LASER* SOBRE A  
MICROESTRUTURA E AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UMA  
LIGA Ti-6Al-4V”**

Monografia apresentada 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. Luiz Cláudio Cândido**

**Ouro Preto, março 2023.**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S116a Sabino, Gabriel Santana.  
Avaliação dos efeitos da Soldagem a Laser sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas de uma liga Ti-6Al-4V.. [manuscrito] / Gabriel Santana Sabino. - 2023.  
41 f.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Claudio Candido.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Ligas de Titânio. 2. Soldagem - Soldagem a Laser. 3. Microestrutura. 4. Metais - Propriedades mecânicas. I. Candido, Luiz Claudio. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 669.1

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



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Gabriel Santana Sabino**

Avaliação dos efeitos da soldagem a *Laser* sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas de uma liga Ti-6Al-4V

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 28 de abril de 2023

### Membros da banca

Dr. - Luiz Cláudio Cândido - Orientador(a) Universidade Federal de Ouro Preto  
Dr. - Rodrigo Rangel Porcaro - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dr. - Rhelman Rossano Urzedo Queiroz - Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais

Luiz Cláudio Cândido, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 13/05/2023



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Claudio Candido, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/07/2023, às 10:23, 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 **0520619** e o código CRC **EF470A44**.

## RESUMO

O Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET) recebeu corpos de prova de uma liga de Titânio, do tipo ASTM Grau 5 (Ti-6Al-4V), do CTA (Ciência e Tecnologia Aeroespacial), de São José dos Campos/SP. Estas ligas têm muitas aplicações, desde componentes de turbinas no setor aeroespacial até implantes cirúrgicos. Este trabalho teve como intuito avaliar a influência do processo de soldagem a *laser* na microestrutura desta liga a partir de ensaios de tração e microdureza, e da caracterização microestrutural do material sem e com solda. Além da parte experimental foi feita uma revisão bibliográfica sobre estas ligas, a constatação da alteração microestrutural, onde se encontrou a presença de martensita na ZTA e ZF, gerando uma pequena variação nos limites de resistência para os corpos de prova compostos da liga em questão, e constatação da eficácia do processo de soldagem a *laser* para este tipo de liga.

**Palavras-Chave:** Ligas de titânio. Soldagem a *laser*. Microestrutura. Propriedades Mecânicas.

## ABSTRACT

The Department of Metallurgical and Materials Engineering (DEMET) received test specimens of a Titanium alloy, ASTM Grade 5 (Ti-6Al-4V), from CTA (Aerospace Science and Technology), located in São José dos Campos/SP. These alloys have many applications, ranging from turbine components in the aerospace sector to surgical implants. The objective of this work was to evaluate the influence of the laser welding process on the microstructure of this alloy through tensile and microhardness tests, as well as the microstructural characterization of the material with and without welding. In addition to the experimental part, a literature review was conducted on these alloys, confirming the microstructural alteration, where the presence of martensite was found in the HAZ and FZ, resulting in a slight variation in the strength limits for the test specimens composed of the alloy in question, and confirming the effectiveness of the laser welding process for this type of alloy.

**Keywords:** Titanium alloys. Laser Welding Process. Microstructure. Mechanical Properties.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Densidade de alguns metais selecionados.....	4
Figura 3.2: Representação esquemática de estruturas cristalinas, em (a) fase $\alpha$ (HC) e (b) fase $\beta$ (CCC).....	5
Figura 3.3: Diagrama tridimensional esquemático de classificação de fase de ligas de titânio.....	7
Figura 3.4: Representação esquemática de rotas de tratamentos termomecânicos de ligas de titânio.....	8
Figura 3.5: Micrografias de uma liga Ti-6Al-4V via microscopia óptica, a) Microestrutura equiaxial. b) Microestrutura Widmanstätten. c) Microestrutura martensítica. d) Microestrutura bimodal.....	10
Figura 3.6: Fotografias obtidas via MEV de Microestrutura Widmanstätten de uma liga Ti-6Al-4V após o tratamentos de oxidação por 48 horas. a) 500°C, b) 600°C, c) 700 e d) 800°C.....	11
Figura 3.7: Esquema da influência dos elementos de liga no diagrama de fases de ligas de Titânio.....	12
Figura 3.8: Representação esquemática da adição de elementos de ligas $\alpha$ -estabilizadores em matriz- $\beta$ e $\beta$ -estabilizadores em matriz- $\alpha$ .....	13
Figura 3.9: Microestrutura zona termicamente afetada pela soldagem a laser de uma liga Ti-6Al-4V.....	14
Figura 3.10: Microestrutura da zona termicamente afetada pelo calor em processo de soldagem TIG, de uma liga Ti-6Al-4V.....	14
Figura 3.11: Esquema da caracterização da seção transversal de soldagem. a) h1 representa a ZTA, b) h2 representa a profundidade de penetração, c) h3 representa a dimensão dos defeitos de preenchimento insuficiente e d) h4 representa a largura da poça.....	15
Figura 3.12: Microestrutura em a) Metal base com presença de grão da fase $\alpha$ (cor branca) e grãos da fase $\beta$ (pontos de cor preta), b) Interface entre MB e ZTA e c) Zona fundida.....	15
Figura 3.13: Esquema de níveis de energia, excitação de elétrons, de carregamento até a liberação de um fóton.....	16
Figura 3.14: Esquema básico de um sistema para soldagem a laser.....	17
Figura 3.15: Esquema da Técnica keyhole.....	18

Figura 4.1: Corpos de prova para os ensaios de tração; (a) sem solda; (b) com solda no centro da área útil do CP.....	19
Figura 4.2: Fluxograma das etapas desenvolvidas no trabalho. ....	21
Figura 4.3 – Máquina Universal de Ensaio – IFMG Campus Ouro Preto. ....	21
Figura 4.4: Microdurômetro do laboratório LTM/DEMET/EM/UFOP utilizado para realização dos ensaios de microdureza Vickers. ....	22
Figura 4.5 – Corpo de prova lixado, polido, embutido e atacado quimicamente com reagente Kroll, detalhando a direção do sentido do perfil de microdureza.....	22
Figura 4.6: Microscópio Ótico presente no laboratório LTM/DEMET/EM/UFOP.....	23
Figura 4.7: Microscópio eletrônico de varredura – MEV, presente no laboratório NANOLAB/DEMET/EM/UFOP. ....	23
Figura 5.1.: Imagem de microscopia ótica das regiões do MB e ZTA de uma liga Ti-6Al-4V; ataque com reagente Kroll.....	24
Figura 5.2: Imagem de microscopia ótica das regiões da ZTA e ZF ZTA de uma liga Ti-6Al-4V; ataque com reagente Kroll. ....	24
Figura 5.3: Visão geral pela espessura do CP, das regiões da ZF, da ZTA e do MB, via MEV; ataque com reagente Kroll.....	25
Figura 5.4: Visão geral das zonas ZF, ZTA e MB, via MEV; ataque com reagente Kroll. ....	25
Figura 5.5: Visão parcial das zonas ZTA e MB, identificando as fases presentes, via MEV; ataque com reagente Kroll.....	26
Figura 5.6: Visão das zonas (a) MB, (b) ZTA, (c) ZF, via MEV; ataque reagente Kroll. ....	27
Figura 5.7: Em (a) Região escolhida no MB para realização do EDS. Em (b) Representação da soma do mapa das cores após o EDS. Amostra não preparada previamente, em (a) Região escolhida no MB para realização da análise pro EDS. Em (b) Representação da soma do mapa das cores após o EDS .....	28
Figura 5.8: Mapa de cor realizado pelo EDS de acordo com a composição química. Em (a) Vermelho – Ti, em (b) Azul – V e em (c) Amarelo – Al.....	28
Figura 5.9: Gráfico com a soma dos picos referente a composição químicas do metal base de uma liga Ti-6Al-4V analisadas por EDS. ....	29
Figura 5.10: Curva do perfil de microdureza traçado com os valores obtidos para uma liga Ti-6Al-4V soldada por <i>laser</i> .....	30

Figura 5.11: Imagem de microscopia ótica das regiões MB, ZTA, ZF, com marcação do perfil de microdureza Vickers. ....	31
Figura 5.12: Curva de engenharia Tensão ( $\sigma$ ) x Deformação ( $\epsilon$ ), na comparação entre CP1 com e sem solda obtida a laser. ....	33
Figura 5.13: Curva de engenharia Tensão ( $\sigma$ ) x Deformação ( $\epsilon$ ), na comparação entre CP2 com e sem solda obtida a laser. ....	33
Figura 5.14: Curva de engenharia Tensão ( $\sigma$ ) x Deformação ( $\epsilon$ ), na comparação entre CP3 com e sem solda obtida a laser. ....	34
Figura 5.15: CP em (A) – sem solda; CP em (B) – com solda. Demonstrando a região da fratura.....	34
Figura 5.16: Ensaio de tração destacando a ruptura do CP de uma liga Ti-6Al-4V (a) CP sem solda - ruptura aproximadamente no centro do CP; (b) CP com solda – ruptura no metal base. ....	35
Figura 5.17: Fractografias de uma liga Ti-6Al-4V obtidas por MEV; (a) Visão geral da fratura, em 25x; (b) 100x; (c) 250x; (d) 500x; (e) 1000x; (f) 2000x – destacando-se as microcavidades. ....	36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Composição química, propriedades mecânicas e aplicações típicas para várias ligas comuns de titânio. ....	9
Tabela 3.2: Relação entre condições de tratamento térmico e estrutura obtida, para liga Ti-6Al-4V. ....	10
Tabela 4.1: Composição química teórica (% em massa) da liga Ti-6Al-4V .....	20
Tabela 4.2: Propriedades mecânicas de uma liga de titânio comercialmente puro. ....	20
Tabela 5.1: Composição química qualitativa via EDS do corpo de prova de uma liga Ti-6Al-4V. ....	29
Tabela 5.2: Valores obtidos de microdureza, de uma liga Ti-6Al-4V soldada a laser, com carga aplicada de 200gf e o tempo de ensaio entre 5 segundos á 10 segundos.....	30

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$  – Fase alfa.

$\beta$  – Fase beta.

$\varepsilon$  - Deformação

$T_{\beta}$  – Temperatura de transição de fase beta.

$\sigma$  – Tensão.

## LISTA DE SIGLAS

CCC – Cúbica de corpo centrado

EBSA – Sigla em inglês: “Electron Backscatter Diffraction”

EBW – Sigla em inglês: “Electron Beam Welding”

EDS – Espectroscopia de raios - X de dispersão de energia

GMAW – Sigla em inglês: “Gas Metal Arc Welding”

GTAW – Sigla em inglês: “Gas Tungsten Arc Welding”

LBW – Sigla em inglês: “Laser Beam Welding”

HC – Hexagonal compacto

MB – Metal Base

MIG - Sigla em inglês: “Metal Inert Gas”

Nd:YAG – Sigla em inglês “Neodymium – Yttrium Aluminum Garnet”

PAW – Sigla em inglês: “Plasma Arc Welding”

ZF – Zona fundida

ZTA - Zona termicamente afetada

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo Geral.....	3
2.2 Objetivos Específicos .....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 A Metalurgia do Titânio .....	4
3.2 Estrutura Cristalina do Titânio.....	5
3.3 A Microestrutura das Ligas de Titânio .....	6
3.4 Efeitos de Elementos de Ligas no Titânio .....	12
3.5 Soldagem e Soldabilidade.....	13
3.6 Soldagem a <i>Laser</i> .....	16
3.6.1 Histórico e Fundamentos .....	16
3.6.2 Processo de Soldagem a <i>Laser</i> .....	17
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	19
4.1 Materiais .....	19
4.2 Metodologia.....	20
4.2.1 Ensaio de Tração.....	21
4.2.2 Ensaio de microdureza Vickers .....	21
5 RESULTADOS E DISCUSÃO.....	24
5.1 Caracterização da Microestrutura .....	24
5.2 Espectroscopia de raio-X de dispersão de energia - EDS.....	28
5.3 Microdureza.....	30
5.4 Ensaio de Tração.....	33
7 CONCLUSÕES .....	38
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	39
REFERÊNCIAS .....	40

# 1 INTRODUÇÃO

Dentre os processos de desenvolvimento de novos materiais, o setor metalúrgico está sempre inovando e adaptando às demandas da sociedade, pois com materiais altamente tecnológicos, obtém-se ganho em desenvolvimento social e econômico, promovendo por exemplo, a utilização em aplicações industriais, meios que requerem um grau de exigência muito elevado para a durabilidade do material, resistindo a elevadas temperaturas e ambientes agressivos de corrosão. Os processos de fabricação também são importantes nesse aspecto, pois devem atender as demandas com qualidade e eficiência na produção, com o intuito de entregar com agilidade o produto acabado.

O titânio é um elemento químico que se apresenta de forma abundante na natureza, porém, na forma combinada com outros elementos, é o quarto elemento metálico mais abundante, ficando atrás apenas do alumínio, ferro e magnésio. Porém, o processo de obtenção do mesmo é de custo elevado, devido ao fato da fácil oxidação, fazendo com que os países que possuem reservas e o domínio no processo de fabricação tenham obtido uma atenção especial. Com a crescente demanda de materiais, o titânio vem se destacando devido a suas propriedades, como baixa massa específica, alta resistência mecânica e alta resistência à corrosão (LEYENS; PETERS, 2003).

Suas importantes características despertam o interesse em pesquisa e desenvolvimento, constante utilização industrial que necessita e critérios específicos para aplicação, como, por exemplo, a aeronáutica, aeroespacial, automobilística, médica, química e petroquímica. As ligas de titânio do tipo Ti-6Al-4V são as mais utilizadas atualmente pelas indústrias, devido a sua ótima combinação de resistência, ductilidade, usinabilidade, capacidade de forjamento e estabilidade estrutural (ZIMMER, 2011).

Os processos de soldagem estão presentes em diversos setores da indústria, visto que com sua aplicabilidade na cadeia produtiva, permite fabricar componentes separados, de geometria variada, e realizar a união dos mesmos para um produto final. Diante disso, as constantes buscas para se obter a melhor forma de produzir esta união são objeto de interesse em diversos estudos.

A soldabilidade do titânio dependerá da classificação da liga em função da composição química dos elementos estabilizadores de fases (liga- $\alpha$ , liga- $\beta$ , liga  $\alpha$ - $\beta$ ). Tal relação se deve ao fato do comportamento de cada liga em resposta ao ciclo térmico

proveniente da soldagem, podendo promover alterações significativas em propriedades como resistência mecânica, ductilidade e tenacidade (DONACHIE JR. M. J, 2000).

A soldagem a *laser* (LBW – *Laser Beam Welding*) vem ganhando muito espaço na aplicação industrial devido a capacidade de ser um procedimento automatizado, por apresentar uma alta qualidade na região do cordão de solda e uma zona termicamente afetada relativamente pequena se comparado a processos de soldagem convencionais.

O processo de soldagem a *laser*, pode ser autógeno ou não, pois consiste na união de juntas por meio de um feixe de luz concentrado com uma alta densidade de energia causando a fusão localizada. Devido à alta concentração de energia envolvida pode ocorrer o fenômeno *keyhole*, que é a penetração total causando um furo no metal base, com o aspecto do formato de um buraco de fechadura.

Este trabalho visou caracterizar mecânica e metalograficamente uma liga de Ti do tipo Ti-6Al-4V, com e sem solda, além de um levantamento bibliográfico sobre o tema.

## 2 OBJETIVOS

A partir de corpos de prova com e sem solda, os objetivos deste trabalho são:

### 2.1 Objetivo Geral

- Avaliar as características comportamentais e a variação microestrutural de uma liga do tipo Ti-6Al-4V soldada a *laser*.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Levantamento bibliográfico sobre o tema;
- Analisar a microestrutura por meio de microscopia óptica nas regiões da ZF, ZTA e do MB com o intuito de observar a variação microestrutural causada pelo processo de soldagem a *laser*;
- Análise por microscopia eletrônica de varredura MEV/EDS, com o intuito de observar a região do cordão de solda e variação microestrutural causada pelo processo de soldagem a *laser*;
- Ensaios de tração em corpos de prova sem e com solda para comparar os efeitos da soldagem nos limites de resistência e limite de escoamento.
- Perfil de microdureza Vickers para avaliar os efeitos da soldagem na ZTA e ZF em comparação ao MB.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir será apresentado uma sucinta revisão geral sobre o tema envolvendo o Titânio.

#### 3.1 A Metalurgia do Titânio

O titânio está entre os dez elementos mais abundantes na crosta terrestre, e infelizmente, é raramente encontrado em altas concentrações e geralmente combinado com outros elementos, o que justifica a dificuldade no processamento do metal e o torna caro. Titânio geralmente ocorre em areias minerais contendo ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ), ou rutilo ( $\text{TiO}_2$ ) (LEYENS; PETERS, 2003).

O titânio é classificado como um metal não ferroso e leve. Os metais variam substancialmente devido as suas densidades, sendo que o ponto de separação entre metais leves e pesados é de  $5\text{gcm}^{-3}$ . Portanto, o titânio com uma densidade de  $4,51\text{gcm}^{-3}$  é um metal leve. Embora duas vezes mais denso que o metal leve clássico – alumínio – tem apenas cerca da metade do peso específico de aços ou níquel, Figura 3.1 (LEYENS; PETERS, 2003).

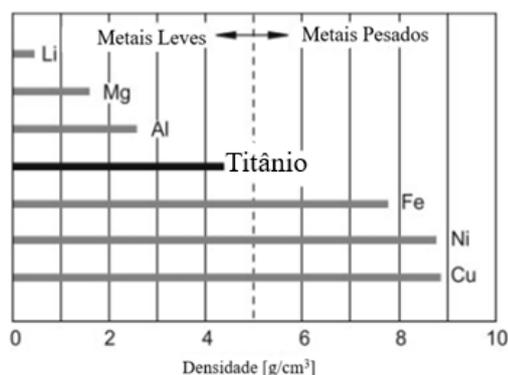


Figura 3.1. Densidade de alguns metais selecionados.

Adaptado de: Leyens e Peters (2003).

Segundo Donachie Jr. (2000) o titânio encontrou seu “nicho” em muitas indústrias, devido à sua baixa densidade, resistência à corrosão em vários meios e vantagens de resistência mecânica ao se comparar com alguns outros materiais concorrentes como alumínio, aços e superligas. Alguns fatores significativos e importantes benefícios oferecidos pelas ligas de titânio ilustram a base para o uso de titânio, dentre eles pode-se

citar a resistência mecânica à tração (como uma liga) de titânio pode ser comparável a um aço inoxidável martensítico de baixa resistência mecânica maior que os inoxidáveis austeníticos ou ferríticos. As ligas podem ter resistência mecânica comparáveis a superligas de aço como A286 ou ligas a base de cobalto, como L605. O titânio é resistente à corrosão e muitas vezes excede a resistência dos aços inoxidáveis a maioria dos ambientes, e tem excelente resistência à corrosão no corpo humano. O titânio pode ser unido por soldagem, brasagem, adesivos, por difusão, e fixadores (rebites ou parafusos).

### 3.2 Estrutura Cristalina do Titânio

De acordo com Leyns e Peters (2003), o titânio, assim como outros metais possui a capacidade de cristalização em diferentes formas de estrutura cristalina, onde cada forma é estável em determinadas faixas de temperatura. Tal característica é conhecida como alotropia e a temperatura que se inicia essa mudança de estrutura é chamada de temperatura de transição.

Para Lutjering e Williams (2007), o titânio comercialmente puro exibe uma transformação de fase alotrópica a 882°C mudando de uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (fase  $\beta$ ) em temperaturas mais altas para uma estrutura cristalina hexagonal compacta (fase  $\alpha$ ) em temperaturas mais baixas. A exata temperatura de transformação é fortemente influenciada por elementos intersticiais e substitucionais e, portanto, depende da pureza do metal.

A Figura 3.2 ilustra um esquema das células unitárias atômicas do titânio hexagonal compacto (HC) e titânio cubico de corpo centrado (CCC) e alguns de seus planos de deslizamento (LEYENS; PETERS, 2003).

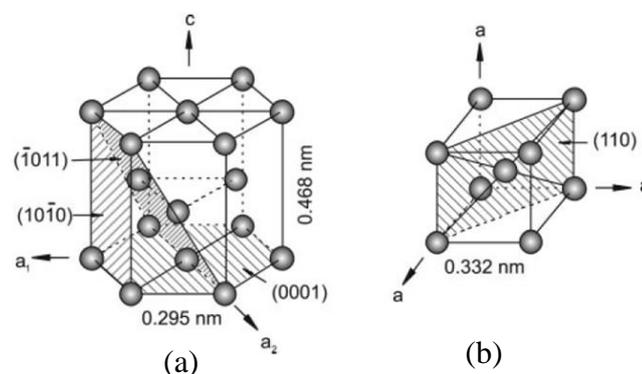


Figura 3.2: Representação esquemática de estruturas cristalinas, em (a) fase  $\alpha$  (HC) e (b) fase  $\beta$  (CCC).

Fonte: Leyens e Peters (2003).

As variedades de propriedades alcançadas pelas ligas de titânio se devem ao fato da importância da presença de duas estruturas cristalinas diferentes e temperatura de transformação alotrópica correspondente de cada fase. A rede cristalina hexagonal compacta causa anisotropia no comportamento mecânico. O módulo de elasticidade de monocristais de titânio consistentemente varia entre 145GPa para uma carga vertical ao plano basal e apenas 100GPa paralelo a este plano (LEYENS; PETERS, 2003).

### **3.3 A Microestrutura das Ligas de Titânio**

Leyens e Peters (2003) afirmam que a microestrutura tem uma influência substancial nas propriedades das ligas de titânio. A microestrutura de ligas de titânio convencionais é descrita principalmente pelo tamanho e arranjo das duas fases  $\alpha$  e  $\beta$ . Os dois casos extremos de arranjos de fase são a microestrutura lamelar, que é gerado após o resfriamento do campo de fase e a microestrutura equiaxial, que é resultado de um processo de recristalização. Ambos os tipos de microestruturas podem ter um arranjo fino e grosseiro de suas duas fases.

De acordo com Donachie Jr (2000) uma vez que a composição química foi selecionada, microestruturas em ligas de titânio geralmente são desenvolvidas por tratamento térmico ou outro processamento como forjamento, fundição ou metalurgia do pó, que muitas vezes usa calor e/ou é seguido por tratamento térmico. A Figura 3.3 ilustra um diagrama de fases esquemático ao qual pode-se observar que pelas rotas escolhidas de tratamentos térmicos e a porcentagem correspondente de cada elemento químico estabilizador das fases, se obtém uma variação da microestrutura e a descrição da fase que a compõe.

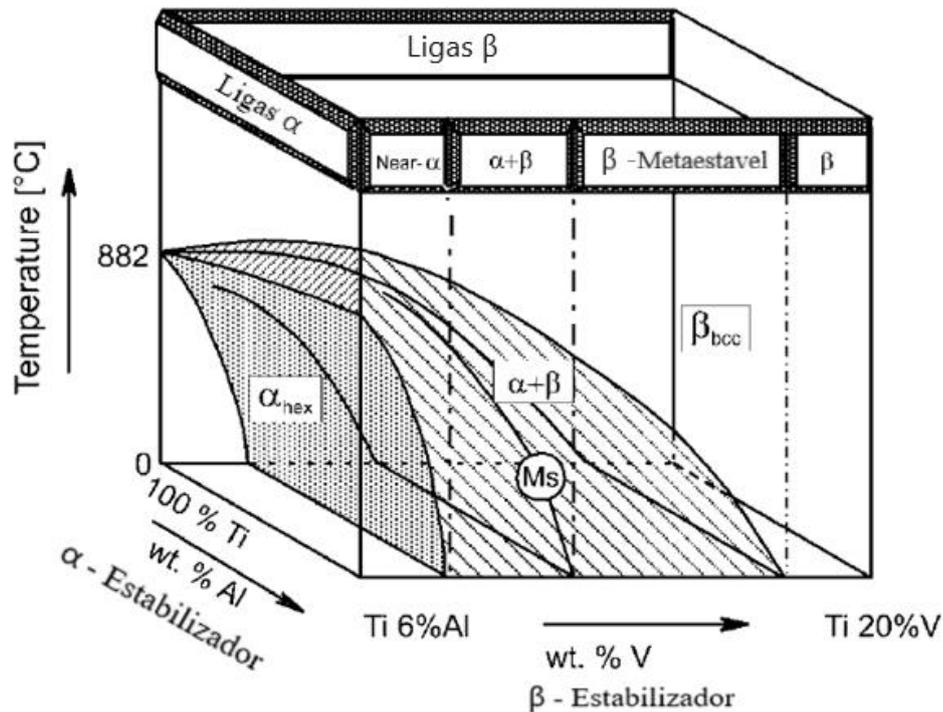


Figura 3.3: Diagrama tridimensional esquemático de classificação de fase de ligas de Titânio.

Fonte: Adaptado de Leyens e Peters (2003).

A resistência mecânica limitada da liga de fase  $\alpha$ , associada a dificuldade de conformação levou a uma investigação das ligas que contêm as fases  $\alpha$  e  $\beta$ . As ligas que contêm um ou mais elementos estabilizadores da fase  $\alpha$  e alguns elementos estabilizadores de  $\beta$  podem ser reforçadas utilizando-se tratamentos térmicos ou termomecânicos (YOGI *et al.*, 2008).

Titânio e suas ligas são tratadas termicamente a fim de otimizar propriedades especiais, como resistência à fratura em geral, fadiga e à fluência (deformação elástica e plástica em altas temperaturas), além de aliviar tensões residuais produzidas durante a fabricação, otimizar a combinação de ductilidade, usinabilidade, e estabilidade dimensional e estrutural (YOGI *et al.*, 2008). A Figura 3.4 ilustra esquematicamente algumas rotas de tratamento térmico que podem ser utilizadas para se obter as propriedades mecânicas de interesse. A temperatura de transição,  $T_{\beta}$ , destacada na Figura 3.4, é responsável pela separação dos campos de fases, monofásico  $\alpha$  e o bifásico  $\alpha + \beta$ , e os tipos de ligas são classificados de acordo com as fases presentes.

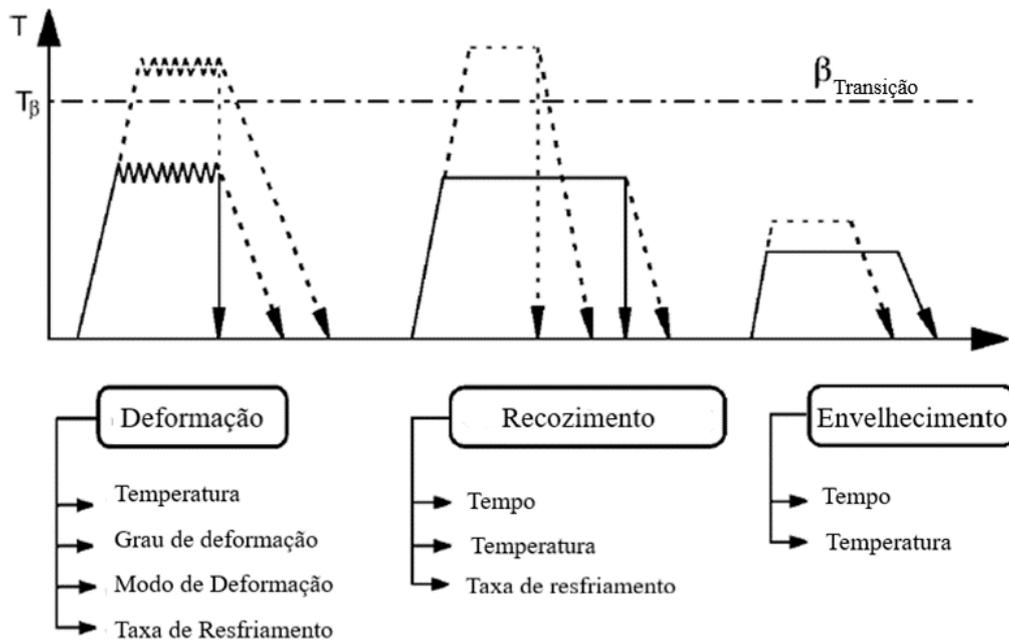


Figura 3.4: Representação esquemática de rotas de tratamentos termomecânicos de ligas de titânio.

Adaptado de: Leyens e Peters (2003).

A resposta do titânio e ligas de titânio ao tratamento térmico depende da composição do metal e os efeitos dos elementos de liga sobre a sua transformação  $\alpha$ - $\beta$ . Além disso, nem todos os ciclos de tratamento térmico são aplicáveis a todas as ligas de titânio, porque as várias ligas são projetadas para diferentes fins. A liga Ti-6Al-4V é projetada para alta resistência mecânica a baixas e moderadas temperaturas (GILBERT; SHANNON, 1991).

Para Callister Jr e Rethwisch (2016) a principal limitação do titânio é sua reatividade química em temperaturas elevadas. Tal característica exigiu o desenvolvimento de técnicas não convencionais de refino, fusão e fundição; consequentemente, as ligas de titânio são bastante caras. Apesar dessa reatividade em temperaturas elevadas, a resistência à corrosão das ligas de titânio em certas temperaturas é normalmente alta; elas são virtualmente imunes ao ar, a ambientes marinhos e a diversos ambientes industriais.

A liga Ti-6Al-4V, possui a melhor soldabilidade das ligas  $\alpha$ - $\beta$ , devido a dois fatores, o primeiro sendo a formação de martensita  $\alpha$ -primária, não tão dura e quebradiça ao se comparar com a exibida na liga- $\beta$  como Ti-6Al-6V-2Sn. O segundo é temperabilidade relativamente baixa da liga Ti-6Al-4V, que permite a formação em proporções mais altas da microestrutura mais desejável de Widmanstätten  $\alpha$ -plus- $\beta$  retida, mesmo em taxas de resfriamento relativamente altas da solda (DONACHIE JR. M. J, 2000).

A Tabela 3.1 apresenta várias ligas de titânio juntamente com suas propriedades e aplicações típicas. Essas ligas são usadas com frequência em estruturas de aeronaves, veículos espaciais, implantes cirúrgicos e nas indústrias química e de petróleo.

Tabela 3.1: Composição química, propriedades mecânicas e aplicações típicas para várias ligas comuns de titânio.

Tipo da Liga	Nome Comum (Número UNS)	Composição (%em peso)	Condição	Propriedades Mecânicas Médias			Aplicações típicas
				Limite de Resistência à Tração [MPa (ksi)]	Limite de Escoamento [MPa (ksi)]	Ductilidade [%AL em 50 mm (2 in)]	
Comercialmente puro	Não ligada (R50250)	99,5 Ti	Recozida	240 (35)	170 (25)	24	Protetores de motores a jato, carcaças e fuselagens de aviões, equipamentos resistentes à corrosão para as indústrias naval e de processamento químico
$\alpha$	Ti-5Al-2,5Sn (R54520)	5 Al, 2,5 Sn, restante Ti	Recozida	826 (120)	784 (114)	16	Carcaças e anéis de motores de turbina a gás; equipamentos para processamento químico que exigem resistência até temperaturas de 480°C (900°F)
Quase $\alpha$	Ti-8Al-1Mo-1V (R54810)	8 Al, 1 Mo, 1 V, restante Ti	Recozida (dúplex)	950 (138)	890 (129)	15	Peças forjadas para componentes de motores a jato (discos, placas e conectores de compressores)
$\alpha + \beta$	Ti-6Al-4V (R56400)	6 Al, 4 V, restante Ti	Recozida	947 (137)	877 (127)	14	Implantes e próteses de alta resistência, equipamentos para processamento químico, componentes estruturais de fuselagens de aviões
$\alpha + \beta$	Ti-6Al-6V-2Sn (R56620)	6 Al, 2 Sn, 6 V, 0,75 Cu, restante Ti	Recozida	1050 (153)	985 (143)	14	Aplicações nas fuselagens das carcaças de motores de foguetes e nas estruturas de fuselagens de alta resistência para aviões
$\beta$	Ti-10V-2Fe-3Al	10 V, 2 Fe, 3 Al, restante Ti	Solubilização + envelhecimento	1223 (178)	1150 (167)	10	Melhor combinação de alta resistência e tenacidade entre todas as ligas de titânio comerciais; usada para aplicações que exigem uniformidade das propriedades de tração na superfície e no centro do material; componentes de alta resistência das fuselagens de aviões

Fonte: Adaptado de Callister Jr e Rethwisch, 2016

Diante da importância de se obter conhecimento sobre microestrutura e correlacionar com a influência que promove em propriedades mecânicas para diversas aplicações, estudos prévios realizaram diferentes rotas de tratamento térmico, com o intuito de obter diferentes microestruturas e investigar a influência nas propriedades das ligas Ti-6Al-4V. Como por exemplo, Yogi *et al.*, (2008) verificaram que sob regime de fluência as estruturas de Widmanstätten e martensita apresentam maior resistência à deformação plástica em altas temperaturas. A Tabela 3.2 apresenta as condições de tratamentos térmicos realizado por Yogi *et al.*, (2008) e a Figura 3.5 apresenta as microestruturas obtidas pelo autor.

Tabela 3.2: Relação entre condições de tratamento térmico e estrutura obtida, para liga Ti-6Al-4V.

<b>Condições de tratamento térmico</b>	<b>Estrutura obtida</b>
Aquecimento a 1050°C por 30 min; Resfriamento 6°C por minuto ao forno.	Widmanstätten
Aquecimento a 1050°C por 1h; Resfriamento em água.	Martensita
Etapa 1: Aquecimento a 950 °C por 1h; Resfriamento em água.	Bimodal
Etapa 2: Aquecimento a 600°C por 24h; Resfriamento ao ar.	

Fonte: Yogi *et al.*, 2008.

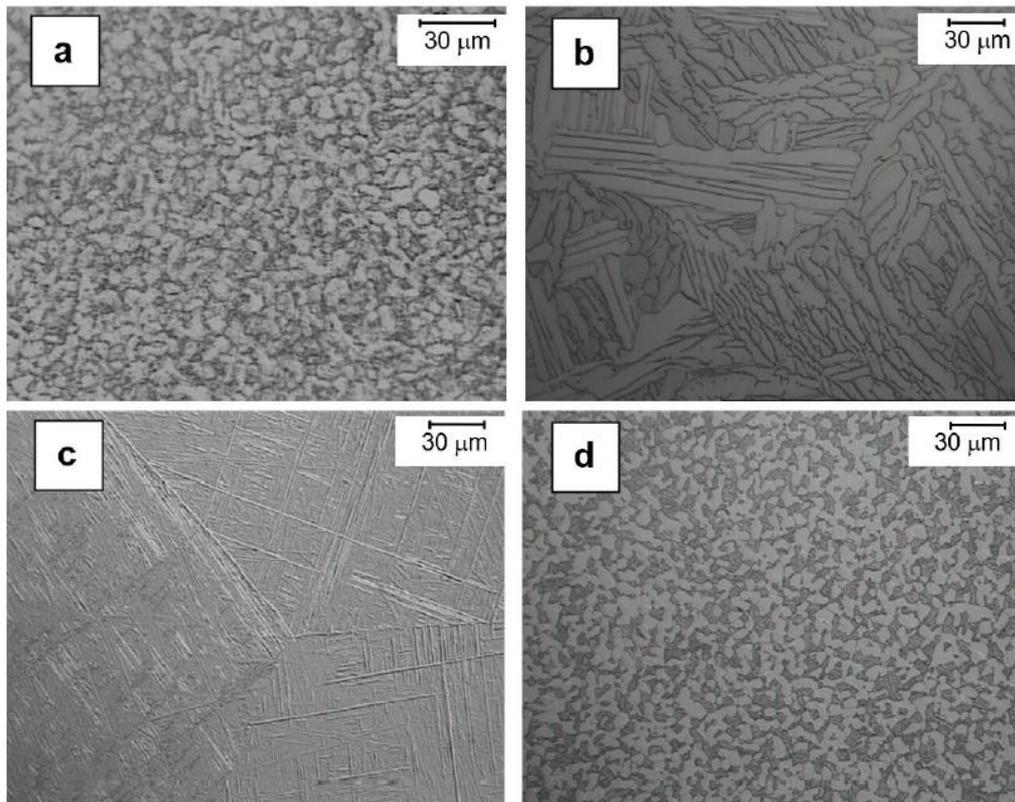


Figura 3.5: Micrografias de uma liga Ti-6Al-4V via microscopia óptica, a) Microestrutura equiaxial. b) Microestrutura Widmanstätten. c) Microestrutura martensítica. d) Microestrutura bimodal.

Fonte: Yogi *et al.*, 2008.

A variação no comportamento sob regime de fluência pode estar associada, conforme comprovado pelas imagens de microscopia óptica ao maior tamanho de grãos presentes nessas estruturas. Já a menor resistência à fluência verificada na estrutura bimodal,

microestrutura obtida por têmpera e revenimento, pode estar associada aos grãos menores (YOGI *et al.*, 2008).

Gonçalves *et al.*, (2021) promoveram análises sob regime de oxidação em amostras com microestrutura equiaxial, bimodal, martensita e Widmanstätten, submetidas aos tratamentos de oxidação a 500°C, 600°C, 700, 800°C por 48 horas. A Figura 3.6 ilustra as microestruturas analisadas pelos autores.

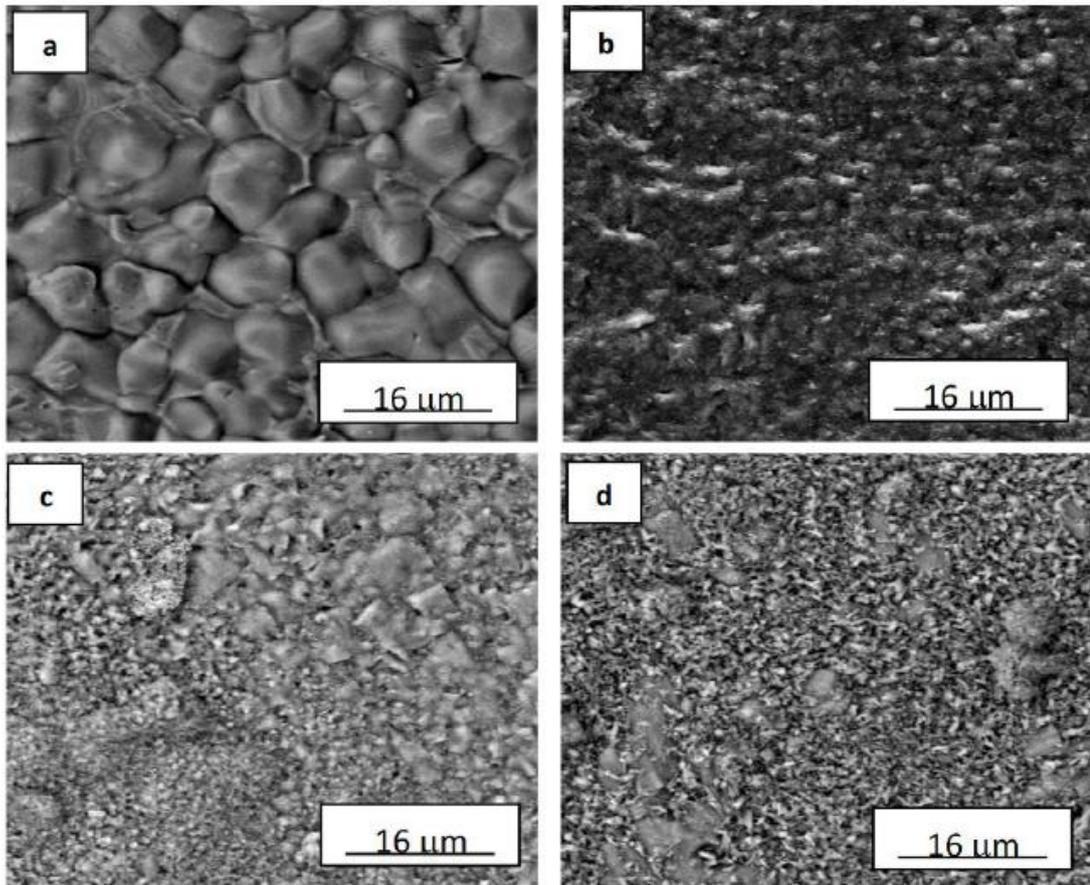


Figura 3.6: Fotografias de Microestrutura Widmanstätten de uma liga Ti-6Al-4V após o tratamentos de oxidação por 48 horas. a) 500°C, b) 600°C, c) 700 e d) 800°C. MEV.

Fonte: Gonçalves *et al.*, 2021.

Observou-se que a microestrutura Widmanstätten foi a mais resistente à oxidação a 800°C. Os grãos formados foram grosseiros e a formação de película de óxido protetora obteve maior dureza, o que sugere um aumento da resistência à oxidação. (GONÇALVES *et al.*, 2021).

### 3.4 Efeitos de Elementos de Liga no Titânio

De acordo com Lutjering e Williams (2007), os elementos de liga no titânio são geralmente classificados em estabilizadores das fases  $\alpha$  ou  $\beta$ , dependendo se aumentam ou diminuem a temperatura de transição, ou seja,  $882^{\circ}\text{C}$ , de fase  $\alpha/\beta$ , do titânio comercialmente puro. Os elementos estabilizadores  $\beta$  são divididos em elementos  $\beta$ -isomorfos e elementos  $\beta$ -eutetóide. Os elementos  $\beta$ -isomorfos mais usados em ligas de titânio são V, Mo e Nb. Concentrações suficientes desses elementos permitem estabilizar a fase  $\beta$  à temperatura ambiente. O alumínio é o elemento de liga mais utilizado em ligas de titânio, pois é o único metal comum que eleva a temperatura de transição e possui grande solubilidade em ambas as fases  $\alpha$  e  $\beta$ . Os tipos de diagramas de fases são mostrados esquematicamente na Figura 3.7.

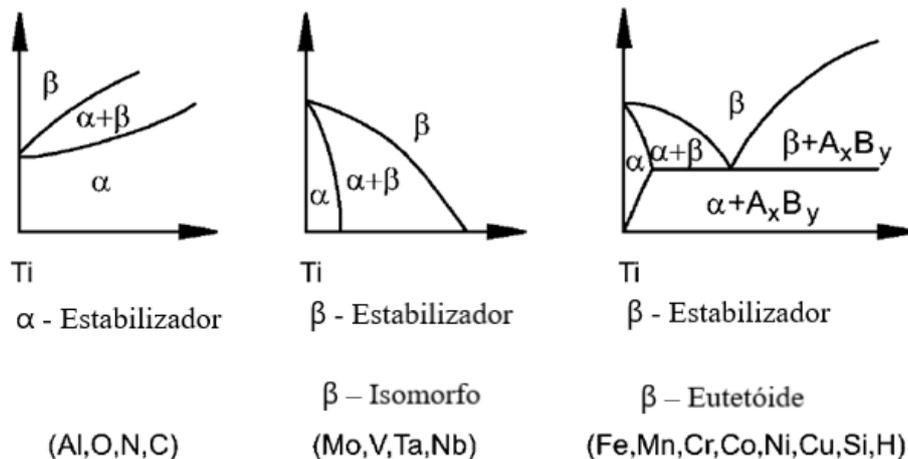


Figura 3.7: Esquema da influência dos elementos de liga no diagrama de fases de ligas de titânio.

Fonte: Adaptado de Leyens e Peters (2003).

A adição de elementos de liga responsáveis por estabilizar cada fase implica no comportamento de uma liga de titânio em resposta a tratamentos térmicos, processamento/conformação, resistência à fluência e soldabilidade. Os elementos estabilizadores de fase  $\alpha$ , por exemplo, alumínio, gálio e estanho ao serem adicionados em matriz  $\beta$ , favorecem a resistência à fluência e a soldabilidade. Os elementos estabilizadores de fase  $\beta$ , vanádio, nióbio e tálio, ao serem adicionados em matriz  $\alpha$ , favorecem a resposta ao tratamento térmico e melhora no processamento/conformação. Na Figura 3.8 ilustra esquematicamente esta relação.

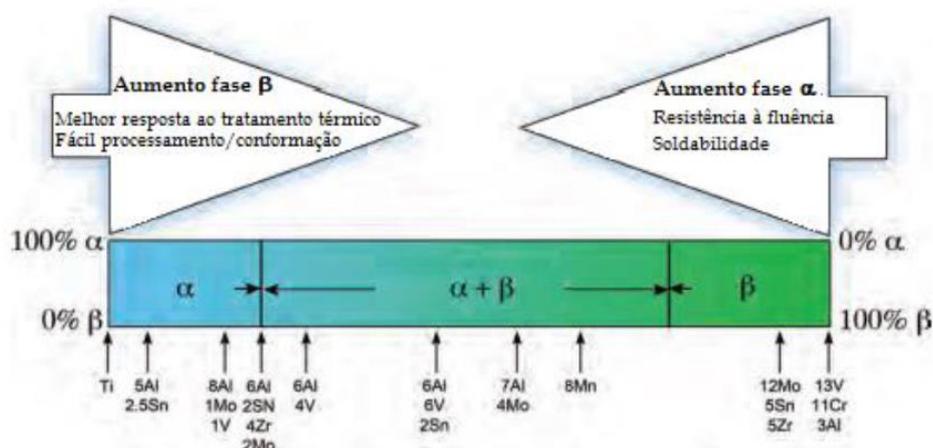


Figura 3.8: Representação esquemática da adição de elementos de ligas  $\alpha$ -estabilizadores em matriz- $\beta$  e  $\beta$ -estabilizadores em matriz- $\alpha$ .

Fonte: CÂNDIDO, 2022.

### 3.5 Soldagem e Soldabilidade

De acordo com Lutjering e Williams (2007) o titânio e a maioria de suas ligas industriais são soldáveis, por fusão, por exemplo, soldagem a arco elétrico com eletrodo de tungstênio não consumível (GTAW), também conhecido como processo soldagem a gás inerte com eletrodo de tungstênio (TIG). Soldagem a arco elétrico com proteção gasosa, com eletrodo consumível (GMAW), também chamada de soldagem, *Metal Inert Gas* (MIG). Soldagem por feixe de elétrons (EBW), soldagem a arco de plasma (PAW) e soldagem a *laser* (LBW), além de soldagem por resistência elétrica, *flash-butt-welding* (centelhamento), soldagem por difusão e técnicas de soldagem por fricção.

Os processos de soldagem são praticados para produzir juntas em titânio comercialmente puro e também para suas ligas. Qualquer método de soldagem do titânio e suas ligas requer proteção entre a solda e a atmosfera, para evitar os elementos contaminantes, sendo os principais oxigênio, nitrogênio e hidrogênio presentes no ar. A escolha entre o procedimento de soldagem dependerá da geometria da peça de interesse a ser soldada e certificar das precauções necessárias para evitar a contaminação da solda, pois soldar ligas de titânio é mais complicado (e de alto custo) do que soldar muitas outras ligas estruturais. Os detalhes de cada procedimento e precauções podem ser vistos detalhadamente para soldagem de ligas de titânio Lutjering e Williams (2007) e também em Messler Jr (1999). GAO *et al.*, (2013) realizaram em seus estudos dois tipos de procedimento de soldagem, LBW e TIG e comparam a influência nas microestruturas obtidas. A Figura 3.9 - 3.10 ilustram os resultados obtidos pelos autores.

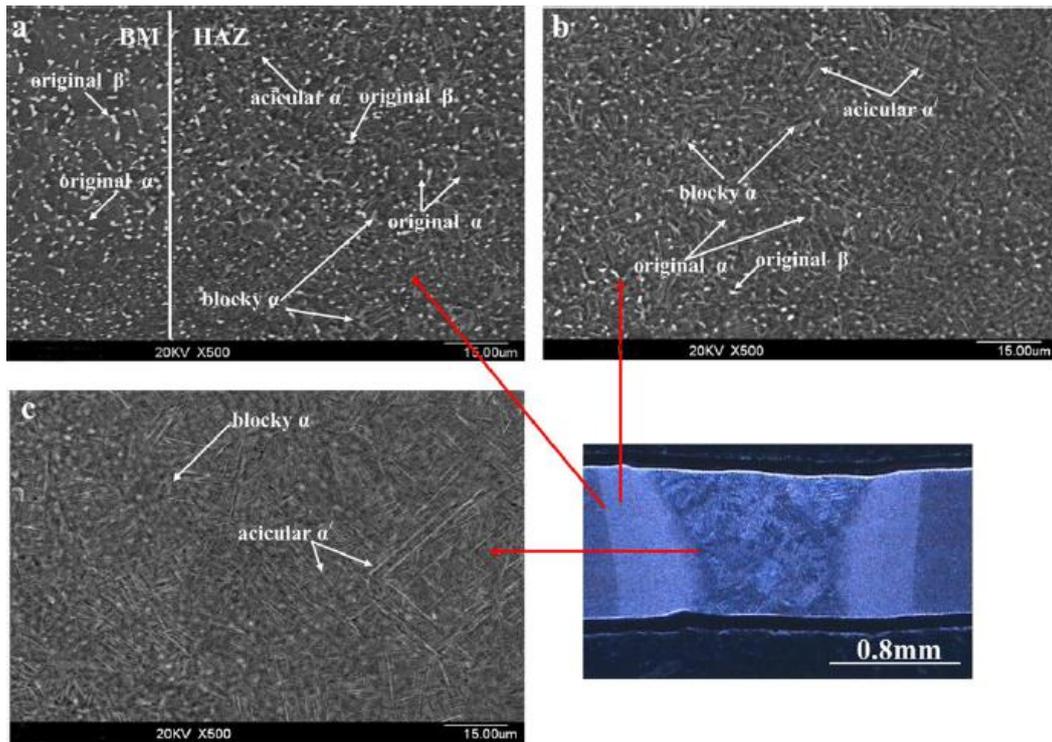


Figura 3.9: Microestrutura da zona termicamente afetada pela soldagem a *laser*, de uma liga Ti-6Al-4V.

Fonte: Gao *et al.*, 2013.

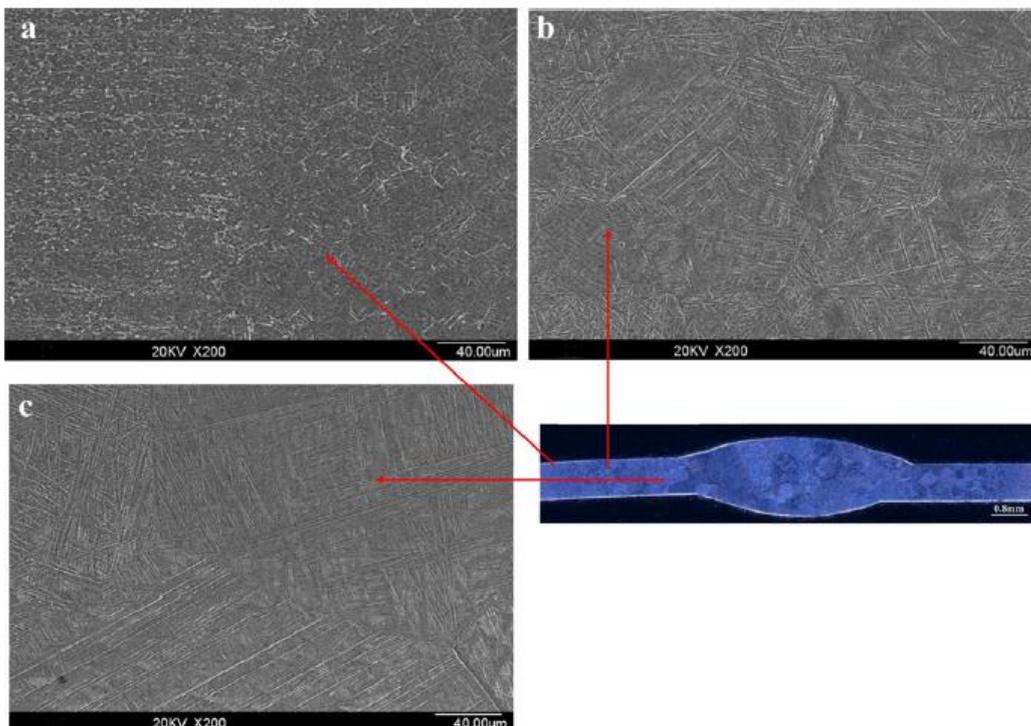


Figura 3.10: Microestrutura da zona termicamente afetada em processo de soldagem TIG, de uma liga Ti-6Al-4V.

Fonte: Gao *et al.*, 2013.

Além da comparação entre diferentes processos de soldagem Akman *et al.*, (2009) investigaram a profundidade de penetração do feixe de *laser* e as mudanças microestruturais da região soldada a *laser* variando os parâmetros de soldagem (variação de potência de pico, tempo de pulso). A Figura 3.11 ilustra esquematicamente um corte transversal de um cordão solda e a Figura 3.12 ilustra a microestrutura obtida pelos autores.

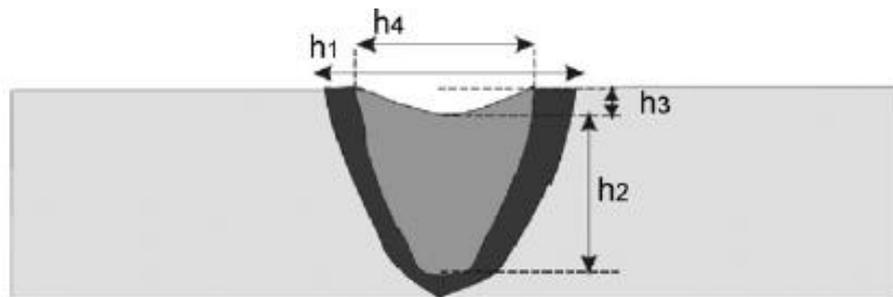


Figura 3.11: Esquema da caracterização da seção transversal de soldagem. a)  $h_1$  representa a ZTA, b)  $h_2$  representa a profundidade de penetração, c)  $h_3$  representa a dimensão dos defeitos de preenchimento insuficiente e d)  $h_4$  representa a largura da ZF.

Fonte: Akaman *et al.*, 2009

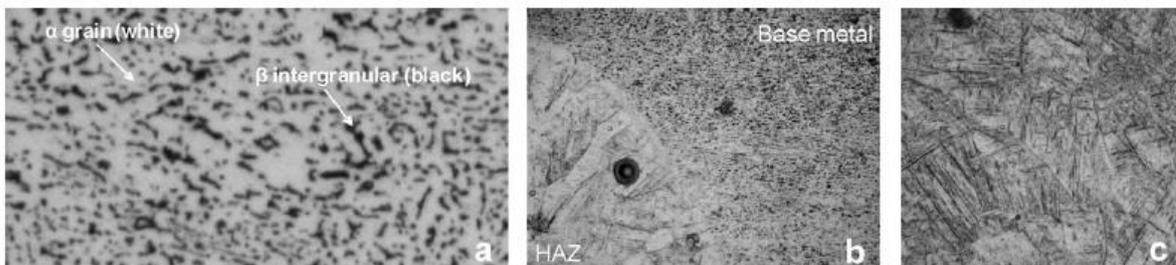


Figura 3.12 : Microestrutura em a) Metal base com presença de grão da fase  $\alpha$  (cor branca) e grãos da fase  $\beta$  (pontos de cor preta), b) Interface entre MB e ZTA e c) Zona fundida.

Fonte: Adaptado Akaman *et al.*, 2009.

Além disso Akaman *et al.*, (2009), em seus estudos observaram também uma variação da microdureza na região da solda e correlacionou com a potência de pico utilizada em cada um de seus ensaios.

### 3.6 Soldagem a *Laser*

A seguir são apresentados alguns conceitos sobre Soldagem a *Laser*.

#### 3.6.1 Histórico e Fundamentos

Como descrito por Marques *et al.* (2016), após a Teoria da Relatividade, Einstein, em 1917, publicou 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. A radiação *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. Esse processo se repete e os fótons podem ser refletidos dentro de um tubo, resultando numa cadeia de emissão fotônica, numa amplificação da emissão inicial. A radiação emitida é monocromática, isto é, os fótons têm sempre o mesmo comprimento de onda e energia. Isso ocorre porque os elétrons nos átomos só podem ter níveis discretos de energia (quantizada) e, ao serem excitados, estes saltam de um nível de energia mais baixo para outro mais alto e, ao voltarem ao estado original, a diferença de energia entre esses níveis será liberada com a emissão de um fóton, como ilustrado na Figura 3.13

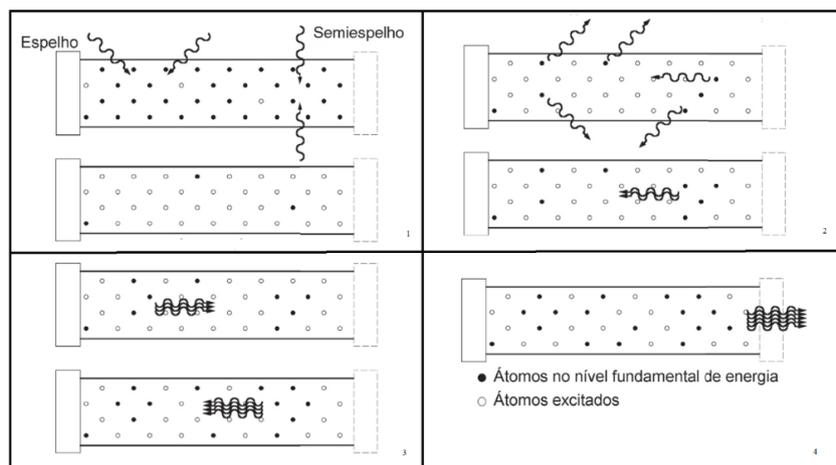


Figura 3.13: Esquema de níveis de energia, excitação de elétrons, de carregamento até a liberação de um fóton.

Fonte: Marques *et al.* (2016).

### 3.6.2 Processo de Soldagem a *Laser*

Messler Jr. (1999) descreve o processo de soldagem por feixe de *laser* (LBW) como um processo de soldagem de alta densidade de energia. O processo consiste na utilização um feixe de energia eletromagnética de altíssima intensidade como fonte de aquecimento para soldagem na forma de fótons. A densidade de energia é de aproximadamente  $10^{10}\text{W/m}^2$  a  $10^{13}\text{W/m}^2$  “versus”  $5 \times 10^6\text{W/m}^2$  ou  $5 \times 10^8\text{W/m}^2$  para processos convencionais de soldagem a arco. A conversão da energia cinética dos fótons (LBW) em calor ocorre quando essas partículas atingem a peça, levando à fusão e vaporização. A Figura 3.14 ilustra esquematicamente um sistema de soldagem a *laser*.

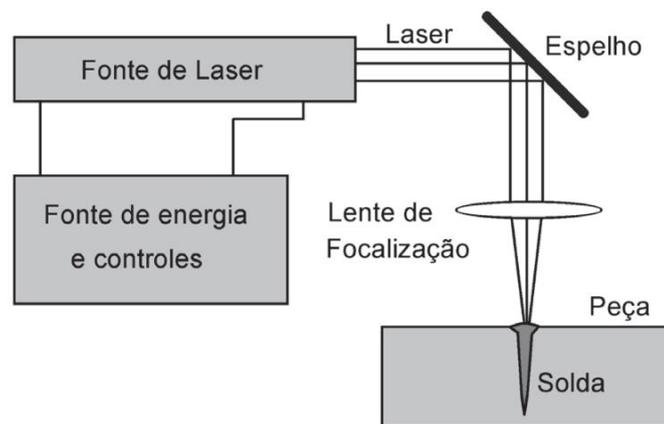


Figura 3.14: Esquema básico de um sistema para soldagem a *laser*.

Fonte: Marques *et al.* (2016)

Dois tipos de *lasers* são comumente usados para soldagem: o de  $\text{CO}_2$  e o de Nd:YAG (*Neodymium – Yttrium Aluminum Garnet*). As principais variáveis da soldagem a *laser* são a energia do feixe, a distância focal, a velocidade de soldagem, a refletividade das peças e a duração do pulso, no caso de laser pulsado. Normalmente, a soldagem é autógena, isto é, não é necessária a adição de material, contudo, e pode ser usada na união de peças de grandes espessuras. A técnica *keyhole* é a mais utilizada, como ilustrado na Figura 3.15 (MARQUES *et al.*, 2016).

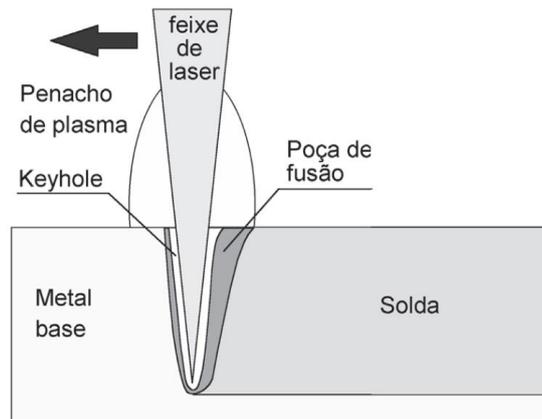


Figura 3.15: Esquema da Técnica *keyhole*.

Fonte: Marques *et al.* (2016).

Para a realização da técnica é necessário que o feixe esteja perpendicular à superfície das peças e que seja bem absorvido. Pode ocorrer alguma vaporização do material. As temperaturas dentro do furo podem alcançar valores extremamente altos, tornando a técnica *keyhole* muito eficiente, pois o calor é conduzido em forma radial para fora, formando uma região fundida que cerca o vapor. Quando o feixe de laser se move ao longo da peça, o metal fundido preenche o espaço atrás do furo e se solidifica, formando a solda. Essa técnica permite velocidades de soldagens muito altas e é necessário um controle muito preciso das variáveis operacionais para que a operação tenha sucesso (MARQUES *et al.*, 2016).

Dentre as características da soldagem a *laser*, de acordo com Cândido (2022):

- Vantagens: baixo aporte térmico; ZTA estreita e altas velocidades de aquecimento e resfriamento; facilidade de soldar materiais diferentes; não contamina a solda (se medidas de proteção adequadas forem aplicadas); possibilidade de soldar em locais de difícil acesso (empregando-se espelhos); pode-se soldar a partir de materiais transparentes e em qualquer atmosfera; o “spot” pode ter menos de 0,2mm de diâmetro; relação penetração largura de 5:1 a 12:1; desenvolve “boa” estrutura cristalina na ZTA.
- Desvantagens: equipamento relativamente caro; problema na soldagem do Al devido à baixa viscosidade e a tensão superficial e alta pressão de vapor provocando tendência a porosidade.

## 4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão abordadas informações a respeito dos procedimentos que foram desenvolvidos ao longo do trabalho. Sendo avaliados os materiais do estudo, bem como os procedimentos desenvolvidos ao longo deste trabalho, como ensaios de tração, microdureza e análise metalográfica respeitando a normas técnicas da ASTM e a metodologia seguida para realizar a caracterização microestrutural da região soldada.

### 4.1 Materiais

Para o presente estudo, foram analisados 6 corpos de provas, tipo ASTM Grau 5 (Ti-6Al-4V), recebidas pelo Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET) vindos do CTA (Ciência e Tecnologia Aeroespacial), de São José dos Campos/SP. Confeccionados nos padrões da Norma ASTM E8M – 21, de uma liga Ti-6Al-4V, de dimensões largura,  $w = 12,5\text{mm}$ , comprimento útil  $L_0 = 50\text{mm}$  e espessura  $T = 2,2\text{mm}$  nos quais três estão sem a presença de cordão de solda e três soldados a *laser*. Os corpos de provas foram submetidos a ensaios de tração, ensaios de microdureza, análises metalográfica por meio de microscopia ótica. A Figura 4.1 apresenta os corpos de prova.

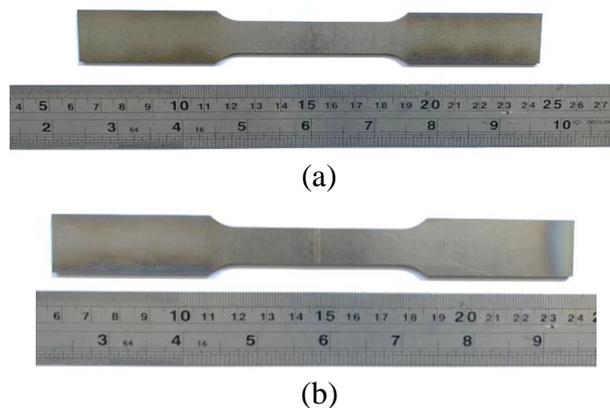


Figura 4.1: Corpos de prova para os ensaios de tração; (a) sem solda; (b) com solda no centro da área útil do CP.

A Tabela 4.1, apresenta a composição química nominal, em massa, de uma liga Ti-6Al-4V utilizada para confeccionar os corpos de prova utilizados nesse estudo.

Tabela 4.1: Composição química teórica (% em massa) da liga Ti-6Al-4V.

Elementos	% em massa
<b>Ti</b>	<b>89,33</b>
<b>Al</b>	<b>6,00</b>
<b>V</b>	<b>4,00</b>
<b>N</b>	<b>0,05</b>
<b>C</b>	<b>0,10</b>
<b>H</b>	<b>0,01</b>
<b>Fe</b>	<b>0,30</b>
<b>O</b>	<b>0,20</b>

Fonte: Adaptado de (ASM, 2004).

Na Tabela 4.2, estão destacadas as principais propriedades da liga Ti-6Al-4V, bem como algumas aplicações usuais desse material, ressaltando a importância e destaque da mesma.

Tabela 4.2: Propriedades mecânicas de uma liga de titânio e titânio comercialmente puro.

Tipo da Liga	Nome comum (Número UNS)	Composição (% em massa)	Condição	Propriedades Mecânicas Médias		
				Limite de Resistência à Tração [Mpa (ksi)]	Limite de Escoamento [Mpa (ksi)]	Ductilidade [%Al em 50mm (2 in)]
Comercialmente puro	Não ligada (R50250)	95% Ti	Recozida	240 (35)	170 (25)	24
$\alpha + \beta$	Ti-6Al-4V (R56400)	6Al, 4V, restante Ti.	Recozida	947 (137)	877 (127)	14

Fonte: Adaptado de Callister Jr e Rethwisch, 2016.

## 4.2 Metodologia

A Figura 4.2 ilustra um fluxograma esquemático dos procedimentos desenvolvidos neste estudo. Sendo ensaios de tração, para determinar o limite de escoamento e de resistência. Perfil de microdureza em uma amostra, transversal ao cordão de solda, no sentido longitudinal do CP. Por fim, uma análise por microscopia óptica na região longitudinal do CP, área útil do CP, e via MEV na secção da espessura do CP observando

a profundidade de penetração, investigando os efeitos causados na microestrutura pelo processo de soldagem a *laser*. Cada etapa citada será tratada de forma detalhada a seguir.

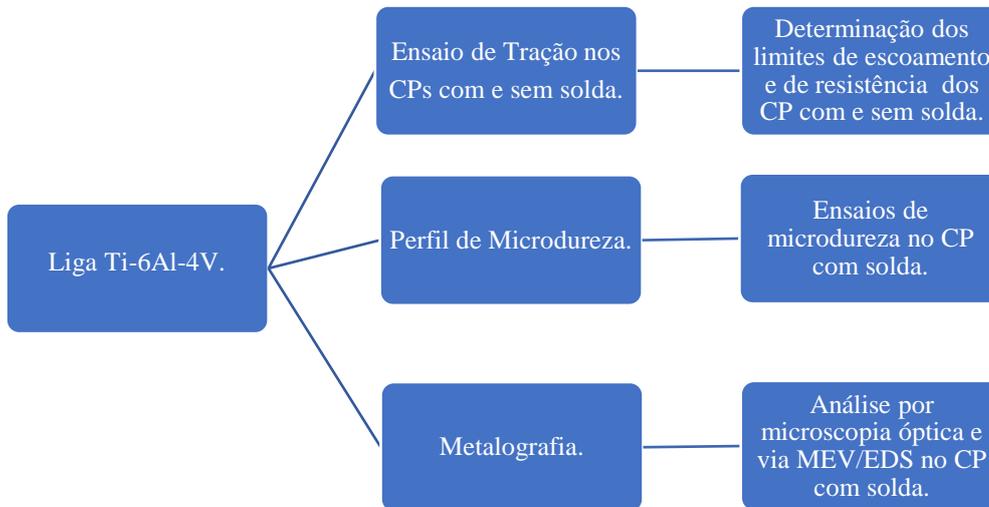


Figura 4.2: Fluxograma das etapas desenvolvidas no trabalho.

#### 4.2.1 Ensaio de tração

Foram realizados três ensaios de tração, com velocidade de 3mm/min, comparando três corpos de prova (CPs) com a presença do cordão de solda a *laser* e três sem a presença do cordão, de acordo com a Norma ASTM-E8M - 21. A Figura 4.3 ilustra o equipamento utilizado para os ensaios de tração sendo uma máquina universal de ensaios pertencente ao Laboratório de Ensaios Mecânicos do Instituto Federal de Minas Gerais Campus Ouro Preto – IFMG-OP.



Figura 4.3 – Máquina universal – IFMG *Campus* Ouro Preto.

#### 4.2.2 Ensaio de microdureza Vickers

A realização do ensaio seguiu os métodos padrões de lixamento, polimento, embutimento e ataque químico utilizando o reativo Kroll (10mL de HF, 5mL de HNO<sub>3</sub>, 85mL de H<sub>2</sub>O) por aproximadamente 10 segundos. Em seguida, com o auxílio do microdurômetro do Laboratório LTM/DEMET/EM/UFOP, foram realizados ensaios com um penetrador Vickers. O perfil traçado, realizando medições a cada 0,2mm de distância, partindo do metal base (MB), seguindo a região da zona termicamente afetada (ZTA), a zona fundida (ZF), retornando ZTA e MB devido a simetria da peça. A carga empregada foi de 200gf e o tempo de ensaio entre 5 segundos a 10 segundos. A Figura 4.4 ilustra o equipamento para ensaios de microdureza utilizado para a realização das análises.



Figura 4.4: Microdurômetro do Laboratório LTM/DEMET/EM/UFOP utilizado para realização dos ensaios de microdureza Vickers.

A Figura 4.5, ilustra o corpo de prova - CP, após o preparo padrão, com a presença do cordão de solda revelado pelo ataque químico, o qual foi realizado o perfil de microdureza no plano longitudinal da chapa do corpo de prova.



Figura 4.5: Corpo de prova lixado, polido, embutido e atacado quimicamente com reagente Kroll, detalhando a direção do sentido do perfil de microdureza.

#### 4.2.3 Metalografia

Na metalografia, foram utilizadas imagens geradas por microscopia óptica e via MEV, para observar a microestrutura do metal base, zona termicamente afetada e zona fundida. E por meio da Espectroscopia de raios-X de Dispersão de Energia – EDS, foi possível obter a análise quantitativa da composição química da liga do CP presente neste estudo. A Figura 4.6 ilustra o microscópio óptico - MO utilizado e a Figura 4.7 ilustra o Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV.



Figura 4.6: Microscópio Óptico - Laboratório LTM/DEMET/EM/UFOP.



Figura 4.7: Microscópio eletrônico de varredura – MEV - Laboratório NanoLab/DEMET/REDEMAT/EM/UFOP.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Caracterização da Microestrutura

As Figuras 5.1-5.4 ilustram a microestrutura de um corpo de prova com presença de cordão solda, revelada por meio do ataque químico utilizando o Kroll. Nitidamente, pode-se observar as faixas correspondentes aos grãos do metal base - MB, a zona termicamente afetada - ZTA e a zona fundida - ZF, obtidas pela microscopia óptica e via MEV.

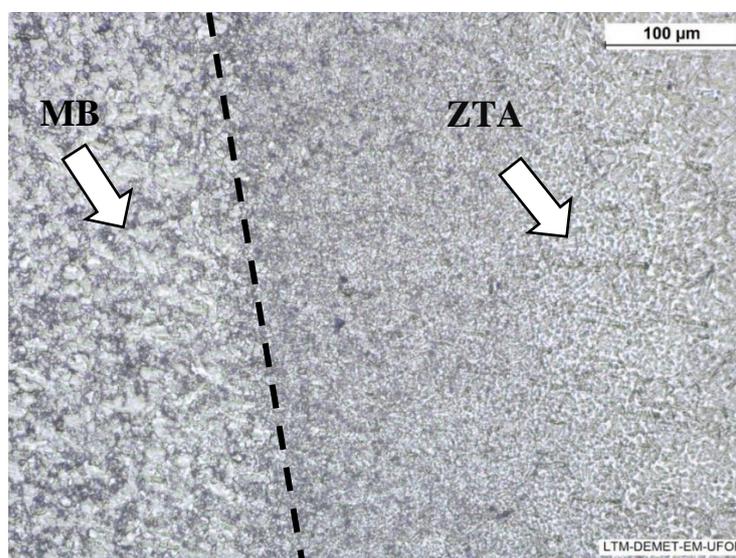


Figura 5.1 – Imagem de microscopia óptica das regiões do MB e ZTA e uma liga Ti-6Al-4V; ataque com reagente Kroll.

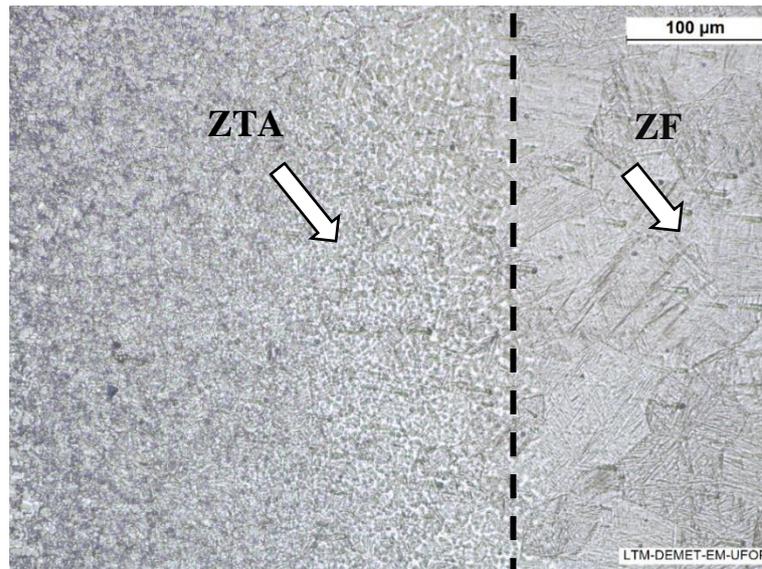


Figura 5.2 – Imagem de microscopia ótica das regiões da ZTA e ZF de uma liga Ti-6Al-4V; ataque com reagente Kroll.

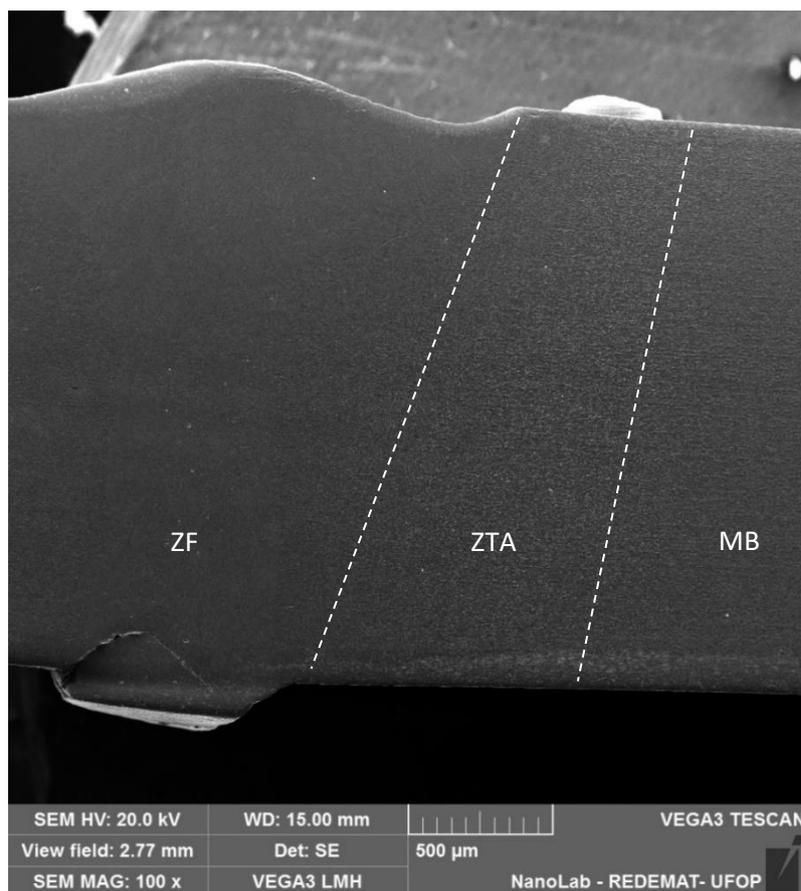


Figura 5.3: Visão geral pela espessura do CP, das regiões da ZF, da ZTA e do MB, via MEV; ataque com reagente Kroll.

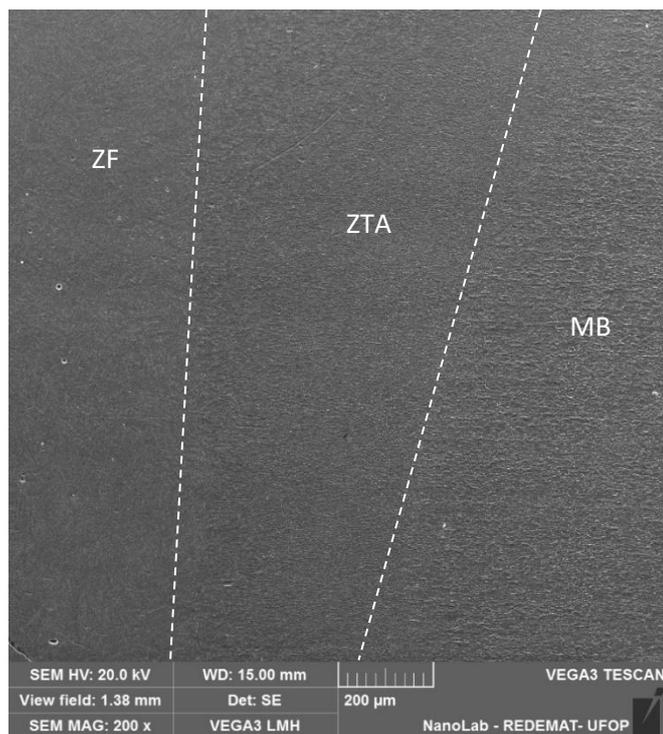


Figura 5.4: Visão geral das zonas ZF, ZTA e MB, via MEV; ataque com reagente Kroll.

Diversos estudos avaliaram as causas das formações microestruturais obtidas após o procedimento de soldagem a *laser*. Por exemplo, de acordo com Akman *et al.* (2009) tal variação microestrutural é explicada por meio da capacidade de transformação de fase reversível das ligas a base de titânio, propriedade na qual se reflete a alotropia da liga, em que se tem a capacidade de mudança de estrutura  $\alpha$  (HC- hexagonal compacta) em  $\beta$  (CCC- cubica de corpo centrado). Este comportamento é explicado por Searles *et al.* (2005), dependendo da quantidade de elementos de liga presentes.

A respeito da presença das fases na microestrutura em questão, sendo Ti-6Al-4V uma liga  $\alpha$ - $\beta$ , pode-se inferir a representação de cada uma fase, de acordo Akman *et al.* (2009) que na região do metal base – MB, encontra-se grão correspondente a fase  $\alpha$ , representado na Figura 5.5 com a cor branca, e fase correspondente a  $\beta$ -intergranular, representado nas regiões dos contornos de grão com a cor escura. Por outro lado, na região da zona fundida – ZF, pode-se perceber a formação de martensita acicular, conforme proposto por Gao *et al.* (2013) ao qual caracterizaram as fases presentes na liga comparando soldagem a *laser* com a soldagem TIG. As Figuras 5.5-5.6 ilustram a caracterização dos grãos referentes a cada fase em cada zona analisada de uma liga Ti-6Al-4V.

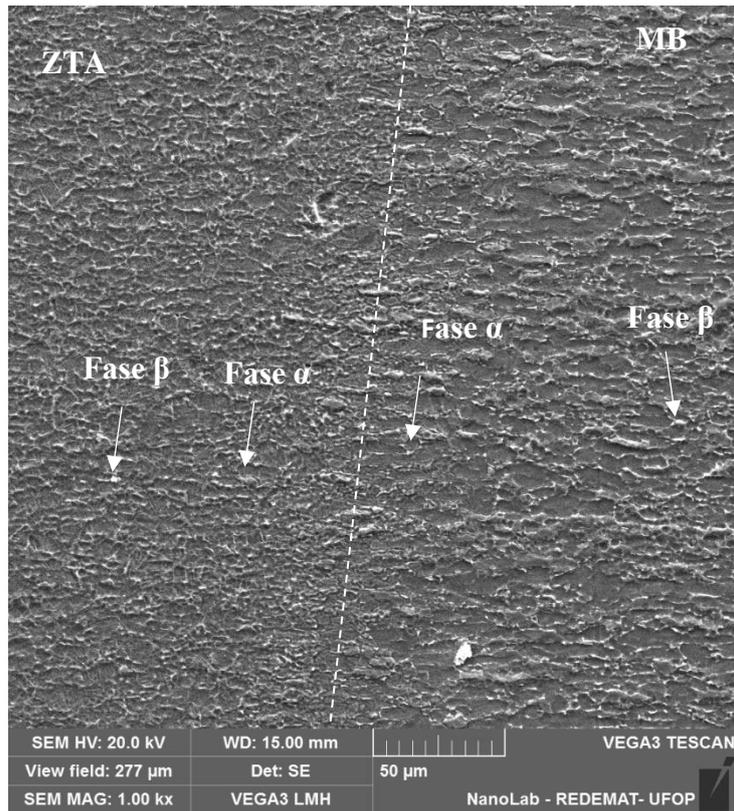
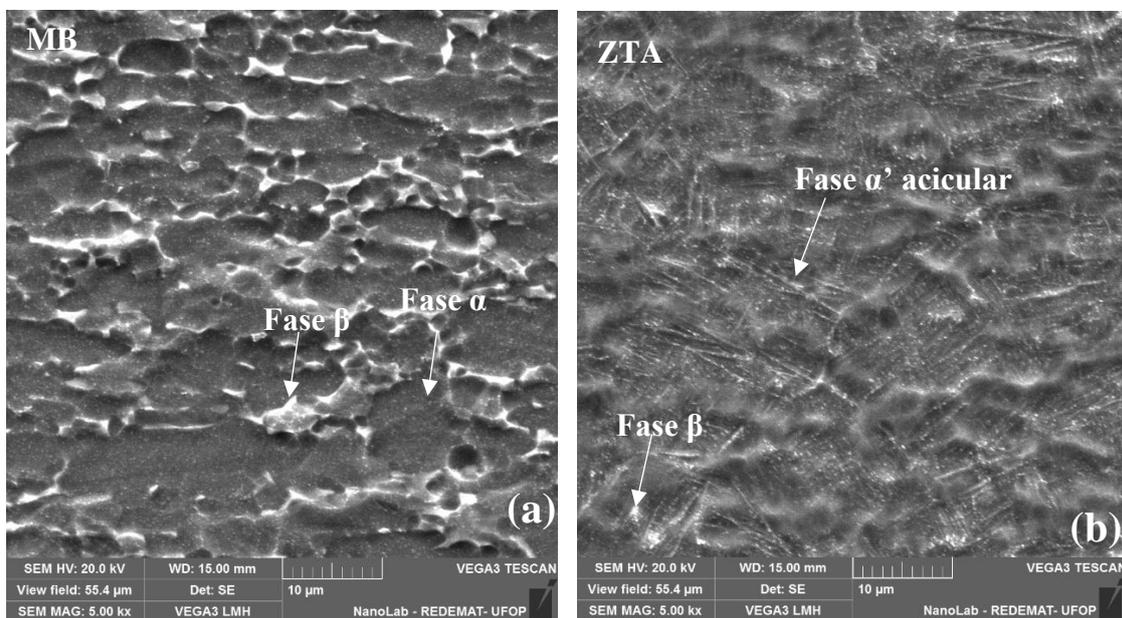


Figura 5.5: Visão parcial das zonas ZTA e MB, identificando as fases presentes, via MEV; ataque com reagente Kroll.



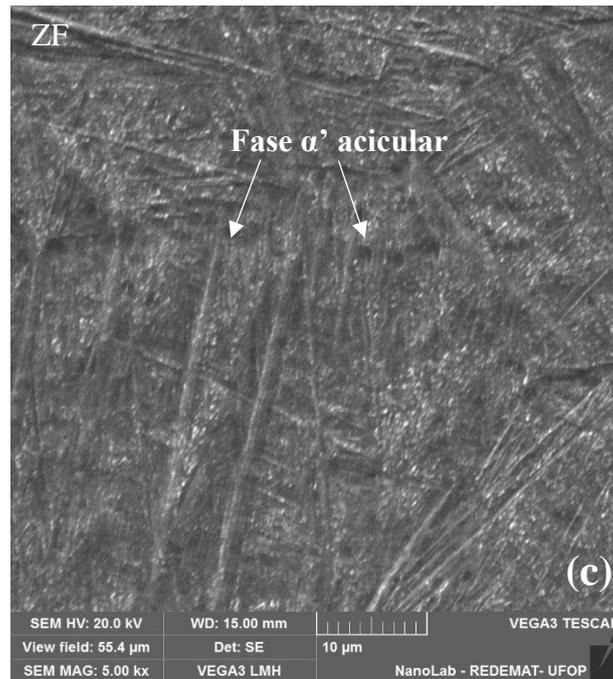


Figura 5.6: Visão das zonas (a) MB, (b) ZTA, (c) ZF, via MEV; ataque reagente Kroll.

Gao *et al.* (2013) correlaciona a presença da fase  $\alpha'$ , a qual representa como martensita acicular, ilustradas na Figura 5.6, com o valor da taxa de resfriamento sendo acima do resfriamento crítico,  $410^{\circ}\text{C/s}$ , que ocorre em decorrência do processo de soldagem a *laser*.

## 5.2 Espectroscopia de Raios-X de Dispersão de Energia - EDS

A realização da Espectroscopia de Raios-X de Dispersão de Energia - EDS, foi feita na região do MB, seguindo o padrão da norma ASTM E1508-12a (2019), utilizando a faixa entre  $0\text{keV}$  e  $10\text{keV}$ , em que se encontra a primeira linha de energia de transição de elétrons K, a segunda linha de energia de transição de elétrons L e a terceira linha de transição de elétrons M. Sendo as linhas da série K analisadas, devido a quantidade de energia de pico acima de  $3,5\text{keV}$ . No intuito de verificar qualitativamente a composição química da liga Ti-6Al-4V. O método foi utilizado para realizar o mapa de composição química do CP estudado, gerando o mapa de acordo com as cores: vermelho referente a concentração de Ti; azul referente a concentração de vanádio; e amarelo referente a concentração de alumínio. Nas Figuras 5.7 - 5.8 pode-se observar as imagens obtidas na análise, em (a) região escolhida do MB e em (b) a mesma posição escolhida e com a representação do mapa das cores, a amostra não sofreu preparação prévia.

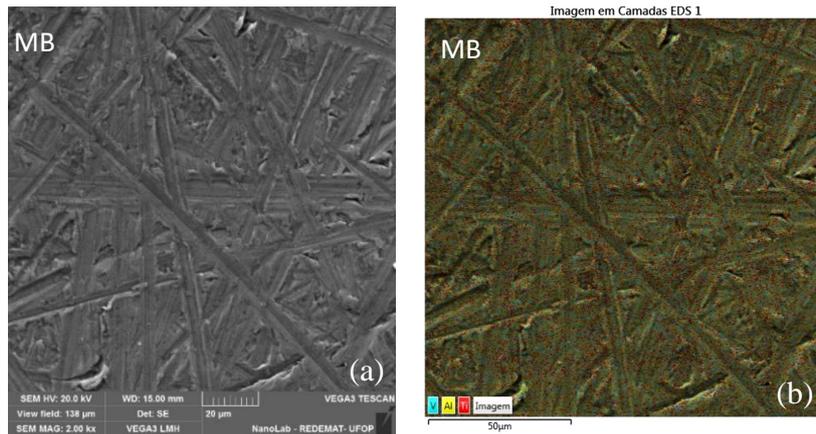


Figura 5.7: Amostra não preparada previamente, em (a) Região escolhida no MB para realização da análise pro EDS. Em (b) Representação da soma do mapa das cores após o EDS.

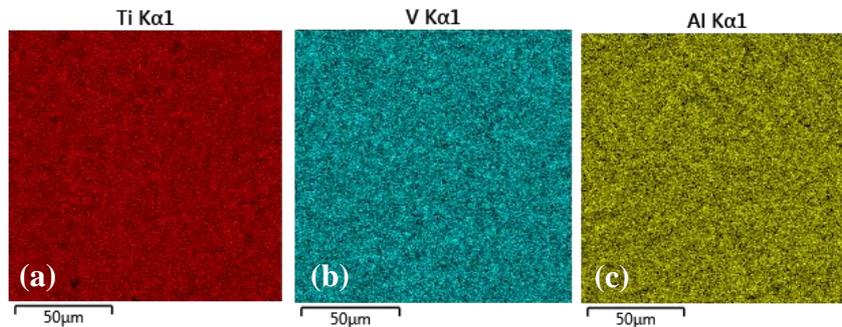


Figura 5.8: Mapa de cor realizado com análise por EDS de acordo com a composição química. Em (a) Vermelho – Ti, em (b) Azul – V e em (c) Amarelo – Al.

Os dados qualitativos da composição química, através do EDS, da região ilustrada na Figura 5.7, pode-se observar na Figura 5.9, em que se nota a presença dos três elementos que compõe a liga, sendo o titânio, alumínio e vanádio, com suas respectivas potências de pico de acordo com a concentração de cada um na liga.

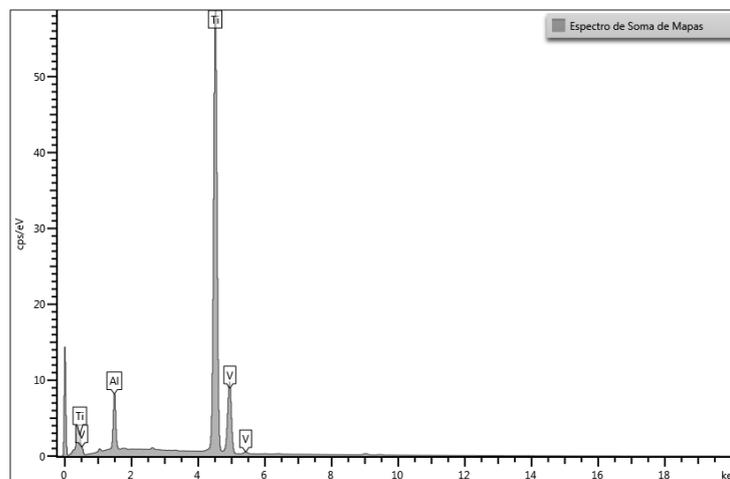


Figura 5.9: Gráfico com a soma dos picos referente a composição química do metal base de uma liga Ti-6Al-4V analisada por EDS.

A partir da análise foi possível obter a composição química qualitativa da liga Ti-6Al-4V em estudo. Na Tabela 5.2.1 podem ser vistos os valores em porcentagem em massa de cada elemento constituinte da liga Ti-6Al-4V, ao se comparar com os dados do referencial teórico apresentados pela Tabela 4.1 (ASM, 2004) percebe-se a proximidade com o valor encontrado experimentalmente via EDS.

Tabela 5.1: Composição química qualitativa via EDS do corpo de prova de uma liga Ti-6Al-4V.

Elemento	Tipo de Linha	Concentração Aparente	Razão k	% em massa	Sigma % em massa	Rótulo Padrão	Padrão de Fábrica
Al	Série K	6.65	0.04778	6.14	0.04	Al2O3	Sim
Ti	Série K	128.58	1.28584	90.01	0.07	Ti	Sim
V	Série K	5.42	0.05418	3.85	0.06	V	Sim
Total:				100.00			

### 5.3 Ensaio de Microdureza

A Tabela 5.2 apresenta os valores de microdureza obtidos pela marcação transversal ao cordão de solda, os quais foram utilizados para traçar o gráfico do perfil de microdureza, Figura 5.10 a qual ilustra um perfil de microdureza não espelhado, sendo possível atrelar a dificuldade de se demarcar a ZTA, sendo muito estreita. As cores, tanto na tabela quanto no gráfico, correspondem aos valores obtidos em cada região da peça, sendo MB cor azul, ZTA cor verde, ZF cor vermelha.

Tabela 5.2: Valores obtidos de microdureza, de uma liga Ti-6Al-4V soldada a *laser*, com carga aplicada de 200gf.

Posição (mm)	Microdureza (Vickers - HV)	Regiões
0,0	319	MB
0,2	344	
0,4	345	
0,6	346	
0,8	318	
1,0	357	ZTA
1,2	394	ZF
1,4	392	
1,6	383	
1,8	394	

2,0	403	
2,2	398	ZTA
2,4	366	
2,6	359	
2,8	330	MB
3,0	336	
3,2	362	
3,4	343	

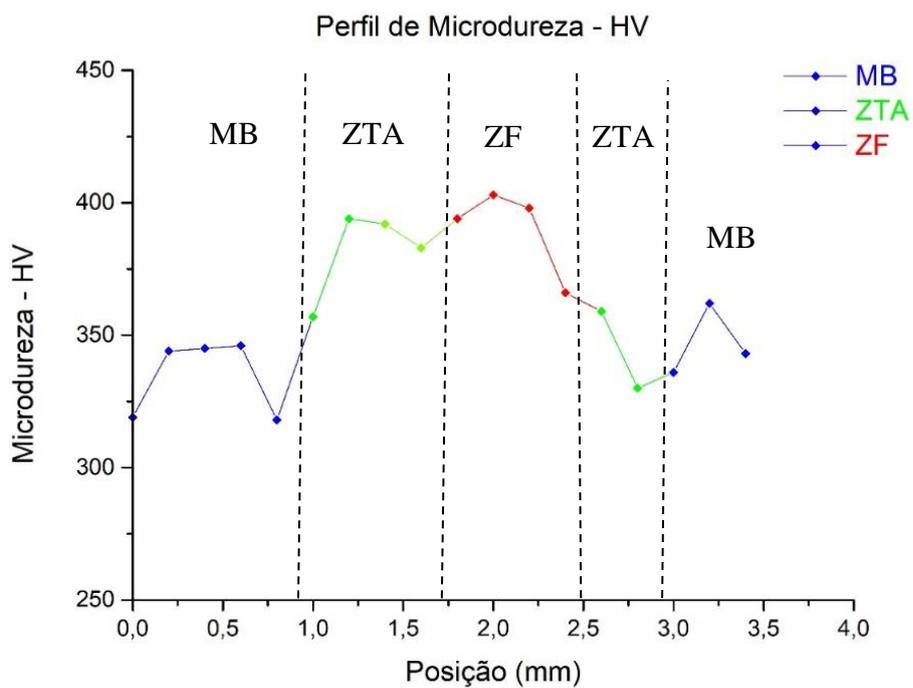


Figura 5.10: Curva do perfil de microdureza traçado com os valores obtidos para uma liga Ti-6Al-4V soldada por *laser*.

Na Figura 5.11 pode ser observado na microestrutura as marcas de indentação feitas pelo penetrador durante a realização do ensaio.

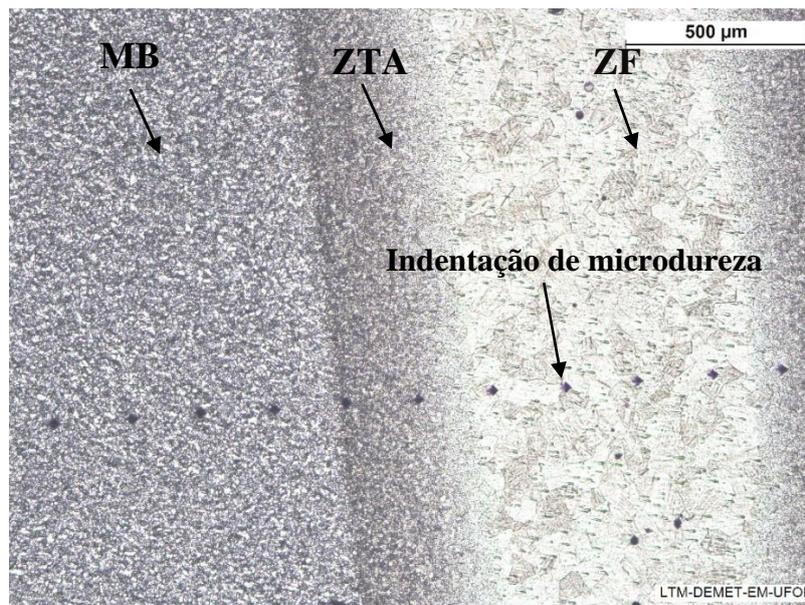


Figura 5.11: Imagem de microscopia ótica de uma liga Ti-6Al-4V das regiões MB, ZTA, ZF, com marcação do perfil de microdureza Vickers.

Pelos resultados obtidos, percebe-se uma variação da microdureza entre metal base e zona fundida, justificada pela transformação martensítica ocorrida nesta região. Trabalhos feitos anteriormente correlacionam a potência de pico utilizada durante o processo de soldagem com os valores de microdureza, como por exemplo, Akman *et al.* (2009). Ao comparar variação da microdureza obtida por estes autores com a obtida neste trabalho, sugere que os CPs analisados foram soldados com uma potência de pico na faixa entre 1,12kW e 2,5kW. Kumar (2006) também relatou tal situação entre as distribuições de dureza na seção transversal dos materiais soldados. Sundaresan e Janaki (1999), em seu trabalho descrevem que devido ao processo de soldagem a *laser* seguida do resfriamento rápido, promove esta transformação martensítica e gera o efeito do aumento de dureza, mas devido às limitações deste trabalho não se pode afirmar com clareza estas comparações com os autores supracitados.

Outros autores justificam a variação da microdureza como, por exemplo, Zabler (2011) a dureza da liga aumenta com a contaminação com oxigênio. Este autor ofereceu uma importante correlação entre o nível de dureza e a quantidade de oxigênio dissolvida na fase  $\alpha$  da liga Ti-6Al-4V. Esta relação também foi relatada por Lima *et al.* (2015), em que descrevem a distribuição não uniforme da dureza, semelhante ao gráfico obtido, sendo uma possível contaminação por oxigênio durante o procedimento de soldagem dos

corpos de prova, contudo não se pode garantir tal efeito, devido às limitações técnicas deste trabalho.

#### 5.4 Ensaio de Tração

As propriedades mecânicas foram determinadas por meio do ensaio de tração a temperatura ambiente, segundo a norma ASTM-E8M – 21, que exige ensaio de no mínimo três CPs (três com solda e três sem solda), para a validação dos dados. Após a obtenção dos resultados e ajustes nos parâmetros dos dados obtidos, foi possível a construção das curvas tensão x deformação, e estabelecer a comparação entre os limites de resistência e limites de escoamento dos CPs analisados. As Figuras 5.12-5.14 ilustram os resultados obtidos.

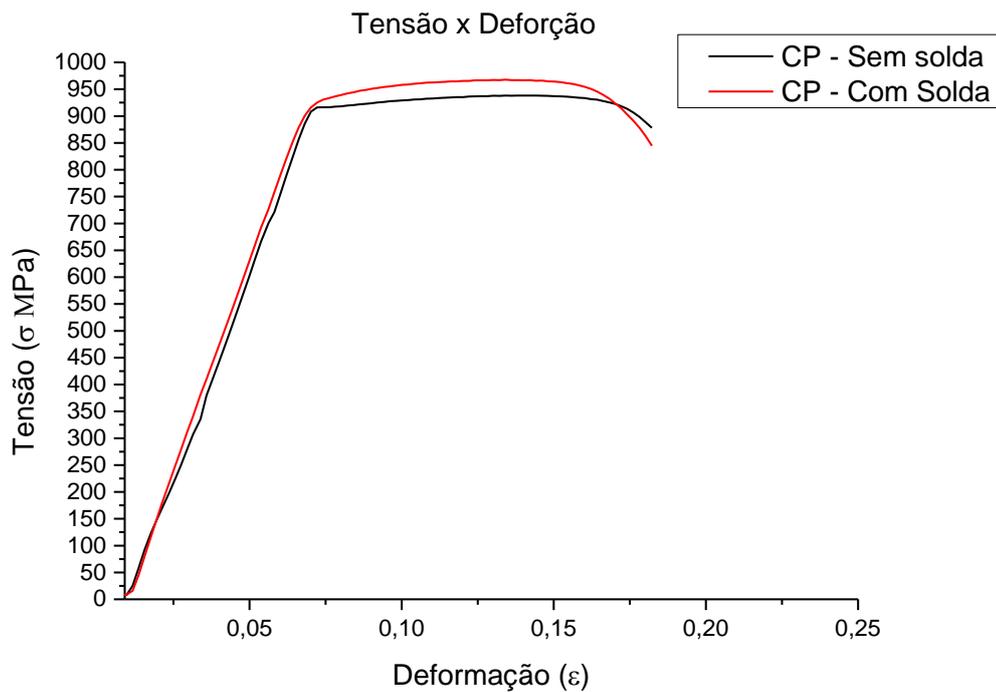


Figura 5.12: Curva de engenharia tensão ( $\sigma$ ) x deformação ( $\epsilon$ ), na comparação entre CP com e sem solda obtida a *laser* de uma liga Ti-6Al-4V.

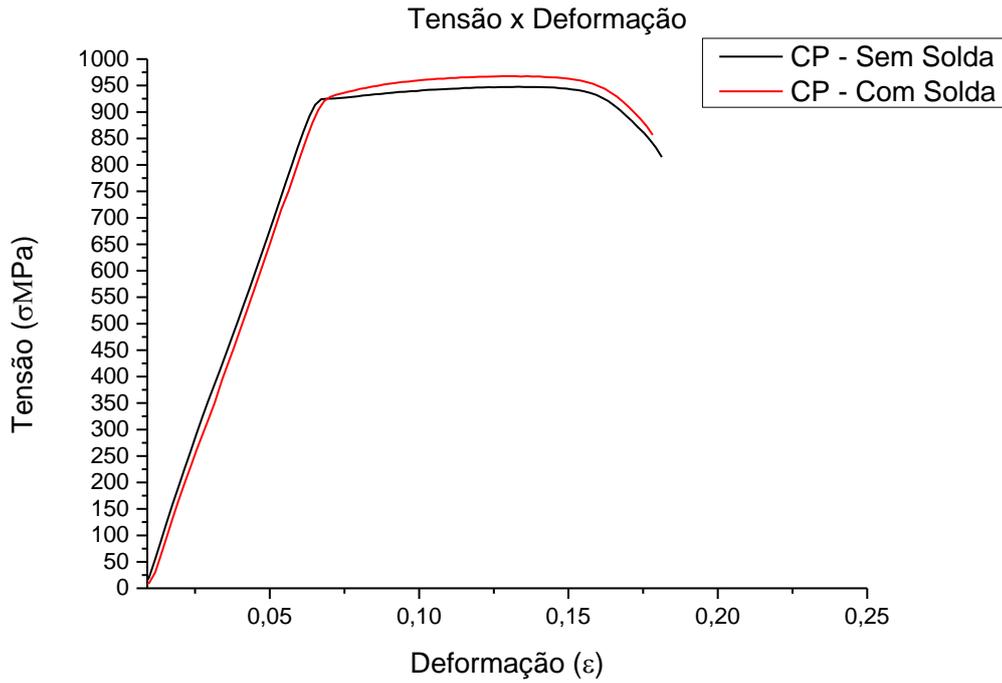


Figura 5.13: Curva de engenharia tensão ( $\sigma$ ) x deformação ( $\epsilon$ ), na comparação entre CP com e sem solda obtida a *laser* de uma liga Ti-6Al-4V.

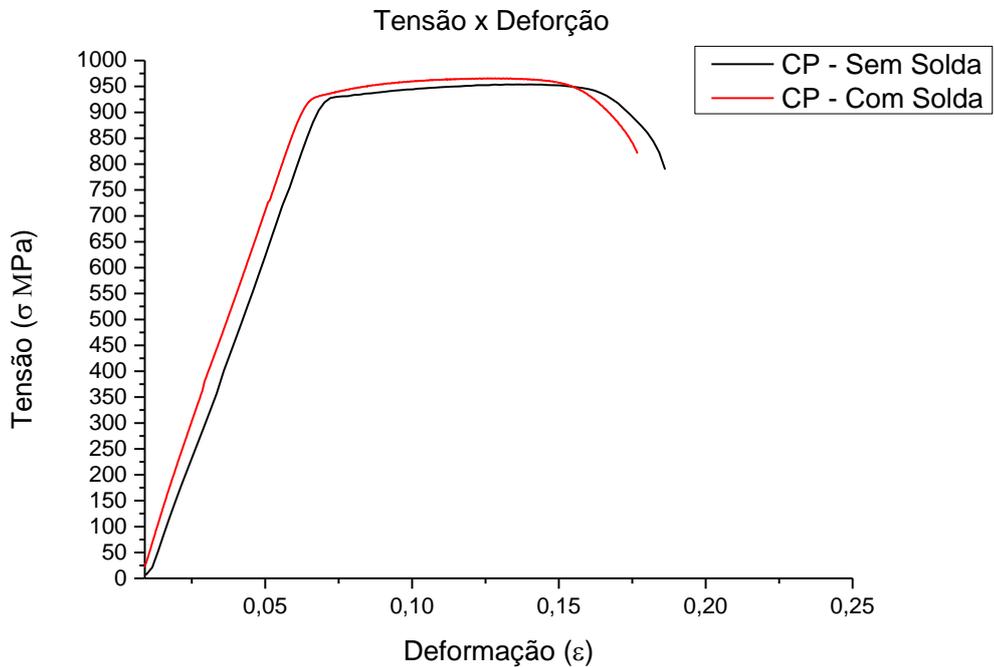


Figura 5.14: Curva de engenharia tensão ( $\sigma$ ) x deformação ( $\epsilon$ ), na comparação entre CP com e sem solda obtida a *laser* de uma liga Ti-6Al-4V.

Pelas curvas obtidas, pode-se inferir que o comportamento mecânico entre os CPs com e sem solda são bem próximos, situando limite de escoamento em torno dos 925MPa para ambos e o limite de resistência sofreu uma variação entre os corpos de prova não soldados situando em torno de 925MPa e para os corpos de prova com solda em torno dos 950Mpa, tais valores de comportamento mecânico próximos aos disponíveis na literatura para ligas de titânio (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2016). A ruptura nos CPs sem solda, ocorreu no centro da peça, já os com cordão solda no centro do CP, a fratura ocorreu fora do centro do CP, a solda resistiu a tração. As Figuras 5.15 e 5.16 ilustram CPs com e sem solda, destacando a região onde se teve o rompimento.

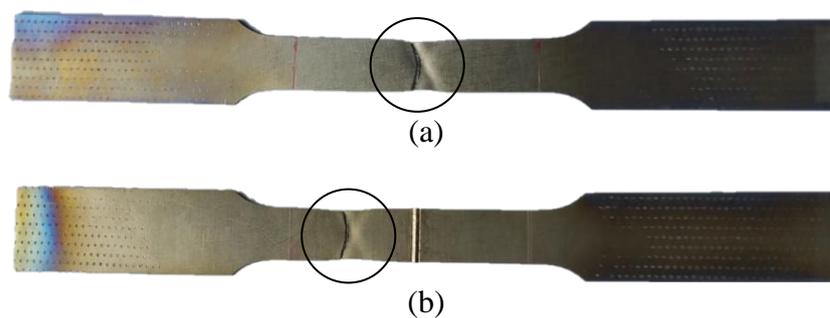


Figura 5.15: CP em (a) – sem solda; CP em (b) – com solda de uma liga Ti-6Al-4V soldada a *laser*. Destaca-se a região da fratura.

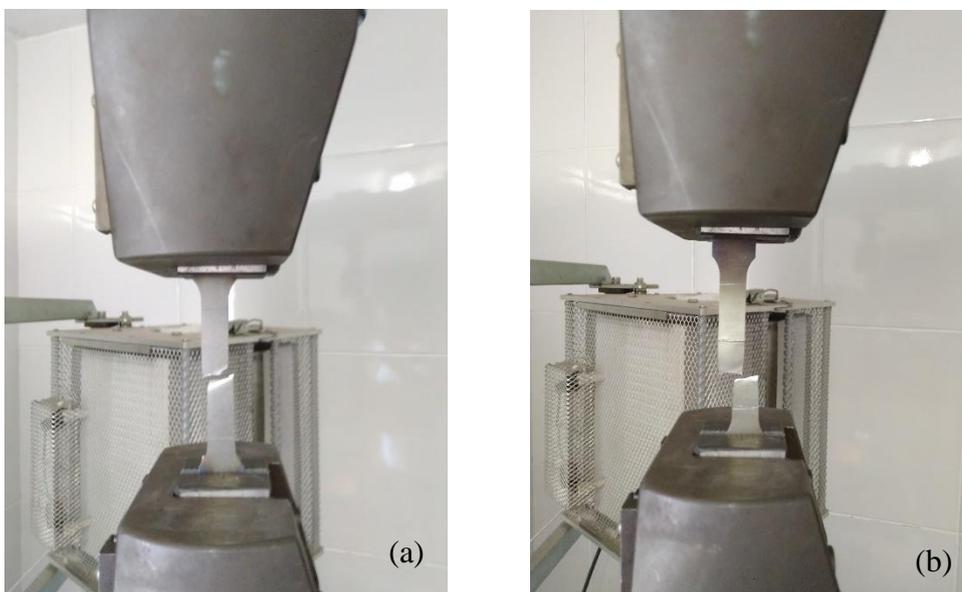
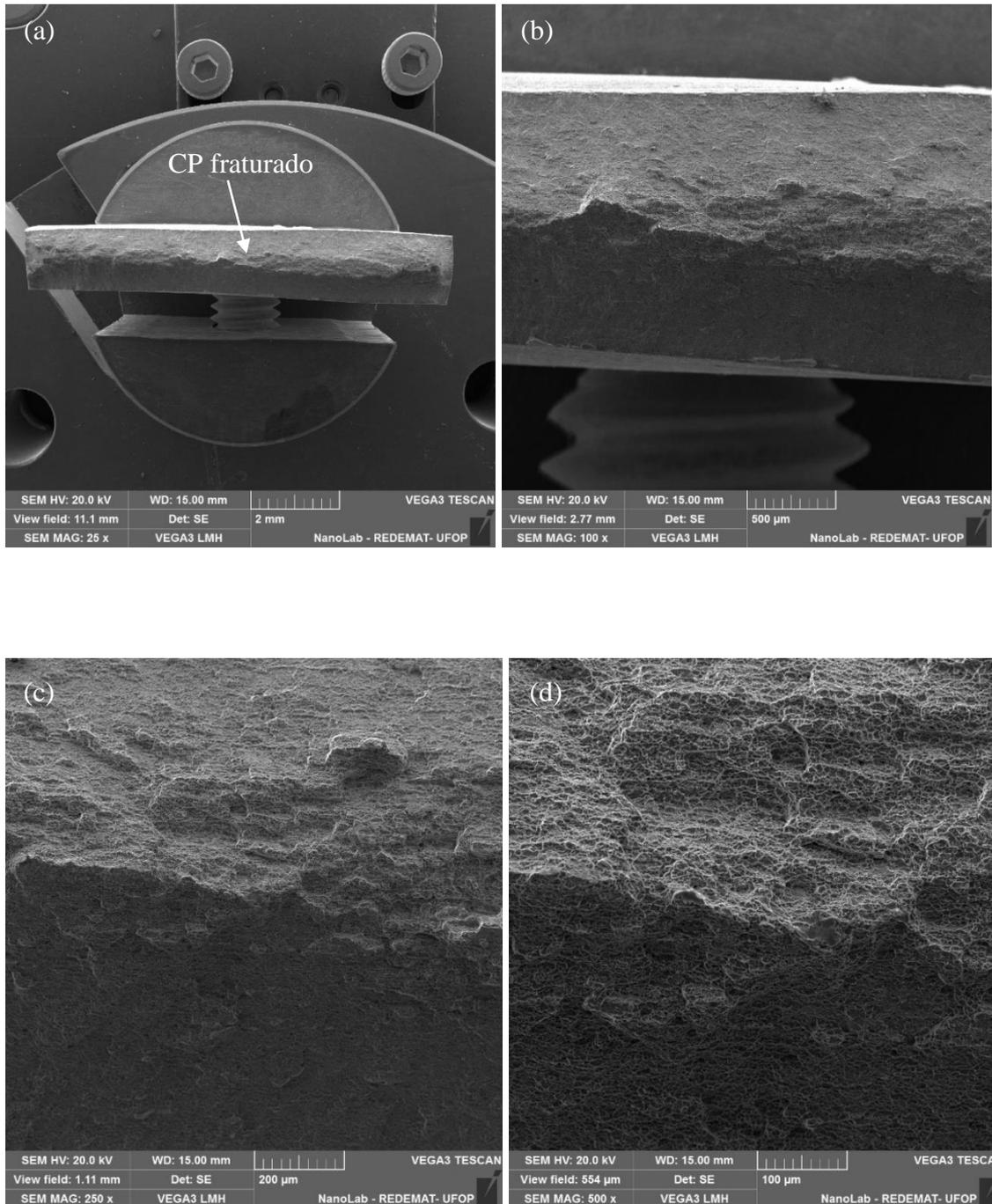


Figura 5.16: Ensaio de tração destacando a ruptura do CP de uma liga Ti-6Al-4V (a) CP sem solda - ruptura aproximadamente no centro; (b) CP com solda a *laser* – ruptura no metal base.

Nota-se que a fratura se desenvolveu aproximadamente a 45° em relação ao eixo de tração, indicando fratura dúctil, destaca-se a região cisalhante a 45° devido a espessura

do CP. Por meio microscopia eletrônica de varredura – MEV, foi possível obter as imagens digitais da região central da fratura e constatar a presença de microcavidades, resultantes de cargas de tração uniaxiais, que segundo Callister Jr e Rethwisch (2016), é característica de fratura dúctil. A Figura 5.17 a ilustra a fractograf obtida via MEV.



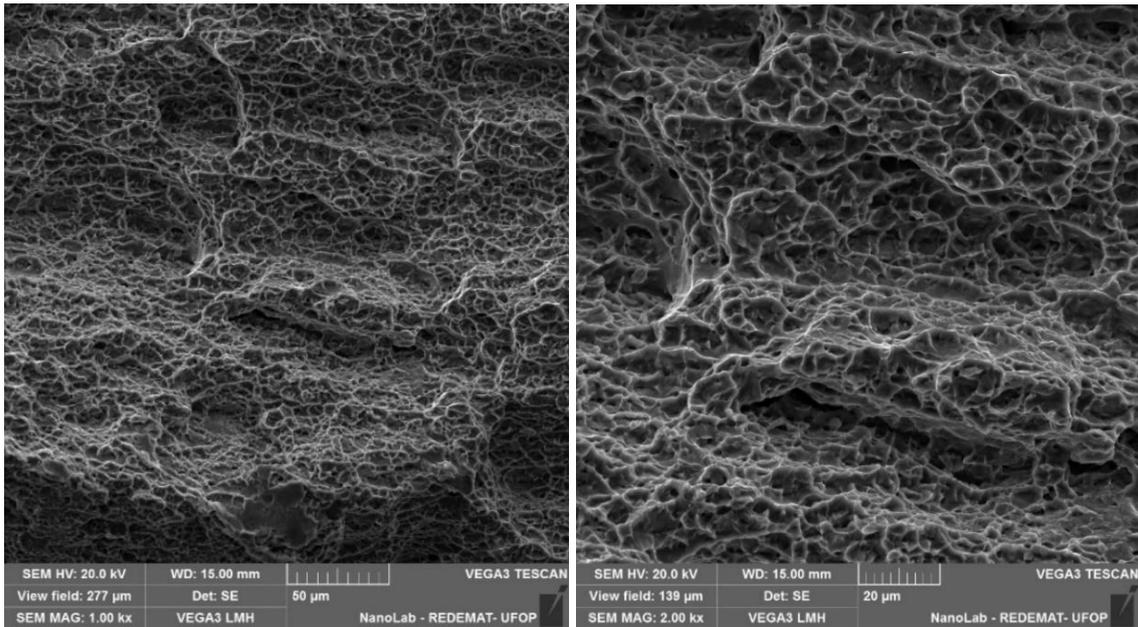


Figura 5.17: Micrografias de uma liga Ti-6Al-4V; (a) Visão geral da fratura, em 25x; (b) 100x; (c) 250x; (d) 500x; (e) 1000x; (f) 2000x – destacando-se as microcavidades. via MEV.

## 7 CONCLUSÕES

Após a realização deste trabalho, a partir dos resultados de microestrutura e propriedades mecânicas obtidas, a soldagem a *laser* realizada se mostrou adequada para a liga Ti-6Al-4V, sendo possível obter as seguintes conclusões

- Variação da microestrutura causada pelo efeito do processo de soldagem *laser*, mediante a alta taxa de resfriamento ocorrida, o que se comprova pelo surgimento de martensita na ZF.
- Variação de microdureza, entre MB, ZTA e ZF, mediante a alteração microestrutural observada via microscopia Óptica e MEV.
- A variação microestrutural observada nas regiões da ZF e ZTA, do CP com a presença de solda a *laser*, não provocou alterações significativas os valores do limite de escoamento e do limite de resistência ao se comparar com o CP sem solda.
- Fratura dúctil observada nos CPs após o ensaio de tração, comprovada pela forma macroscópica com ângulo de cisalhamento aproximadamente a 45° em relação ao eixo das cargas de tração uniaxial e pelo surgimento de microcavidades esféricas observadas via MEV.
- Composição química obtida via EDS relativamente próxima à composição química teórica referente a uma liga Ti-6Al-4V.

## 8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido ao número de corpos de provas limitados da liga Ti-6Al-4V, a quantidade de ensaios feitos foi limitada, mas como sugestão para trabalhos futuros pode-se realizar:

- Efeito do processo de soldagem a *laser* e a contaminação por gases atmosféricos.
- Aplicar a técnica EBSD – *Electron Backscatter Diffraction* – difração de elétrons retroespalhados, para se obter a proporção das fases  $\alpha$  e  $\beta$  presentes na liga Ti-6Al-4V e se possível investigar sobre o efeitos desta proporção de fases na ZF e ZTA.
- Se possível, verificar o efeito da espessura do CP no comportamento da liga soldada.

## REFERÊNCIAS

AKMAN, E.; DEMIR, A.; CANEL, T.; SINMZÇELIK, T. Laser welding of Ti6Al4V titanium alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 8, 2009.

ASM INTERNATIONAL. HANDBOOK COMMITTEE. **ASM Handbook, Materials park**, Ohio: ASM International, 2004.

ASTM - American Society for Testing Materials. E8/E8M- -21. **Standard test methods for tension testing of metallic materials**, 2021.

ASTM E1508-12a (2019), Standard Guide for Quantitative Analysis by Energy-Dispersive Spectroscopy, ASTM International, West Conshohocken, PA.

CÂNDIDO, LUIZ CLÁUDIO, Disciplina MET144 - Seleção de Materiais/UFOP/Escola de Minas/DEMET. Notas de aula, 2022.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. LTC 9ª edição, Rio de Janeiro, 2016.

DONACHIE JR. M. J. **Titanium: A technical guide**. 2ª edição, 2000.

GAO, X.; ZHANG, L.; LIU, J.; ZHANG, J. A comparative study of pulsed Nd:YAG laser welding and TIG welding of thin Ti6Al4V titanium alloy plate. **Materials Science and Engineering: A**, v. 559, 2013.

GILBERT, R.; SHANNON, C.R., **Heat Treating of Titanium**, In: ASM Metals Handbook, 4ª edição. ASM International, Ohio, 1991.

GONÇALVES, F. A. R.; TAKAHASHI, J.; REIS, D. A. P. Estudo do tratamento de oxidação em diferentes microestruturas da liga de titânio. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 18, 2021.

KUMAR, V. C.; Process parameters influencing melt profile and hardness of pulsed laser treated Ti-6Al-4V. **Surface and Coating Technology**, n. 201, p. 3174–3180, 2006.

LIMA, M. S. F.; CORTELLI, B. J.; SIMONI, H. R.; CARVALHO, S. M. **Soldagem a laser da liga Ti-6Al-4V**. In: 70º Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, p. 364-373, 2015.

LEYENS, C. PETERS, M. **Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications.** 1º edição, Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003.  
LUTJERING, G.; WILLIAMNS, J. C. **Titanium: Engeneering Materials and Processes,** 2º edição; Springer-Verlag berlim Heidelberg, 2007.

MARGOLIN, H. Titanium Alloys Fatigue and Fracture. **Fatigue Data Book: Light Structural Alloys.** 1ª. ed. USA: ASM International, v. A279 207-216, 1995.

MARQUES, P. V; MODENESI, P. J.; BACARENSE, A. Q. **Soldagem - Fundamentos e Tecnologia.** 4º edição, Belo Horizonte: Editora UFMG, 2016.

MESSELER Jr, R. W. **Principles of Welding Processes Physics Chemitry and Metallurgy.** WILEI-VCH, Weinheim, 1999).

READY, J. F. **Industrial applications of lasers.** 2º edição. San Diego: Academic Press, 1997.

SEARLES, T., TILEY, J., TANNER, A., WILLIAMS, R., ROLLINS, B., LEE, E., KAR, S., BANERJEE, R., FRASER, H.L., 2005. Rapid characterization of titanium microstructural features for specific modelling of mechanical properties. *Meas. Sci. Technol.* 16, 60–69.

SUNDARESAN, S. JANAKI, R.G.D. Use of magnetic arc oscillation for grain refinement of gas tungsten arc welds in alpha–beta titanium alloys. **Science and Technology Weld Join.** v. 4, 1999.

YOGI; L. M.; SUGAHARA, T.; MOURA NETO, C.; REIS, D.A.P.; PIORINO NETO, F.; BARBOZA, M. J. R. Efeito do tratamento térmico na fluência da liga Ti-6Al-4V. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo,** v. 27, n. 4, 2008.

ZABLER, S. Interstitial Oxygen diffusion hardening: a practical route for the surface protection of titanium. **Materials Characterization,** v. 62, n. 12, p.1205-1213, 2011.

ZIMMER, C. G. **Influência da oxidação térmica sobre as propriedades de fadiga da liga Ti-6Al-4V.** 2011. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, Porto Alegre, 2011.