

NATÁLIA CELESTINO DE CAMPOS

Influência na vida em fadiga da liga Ti-6Al-4V tratada com 3IP + *shot peening* e *shot peening* + 3IP

Natália Celestino de Campos

Influência na vida em fadiga da liga Ti-6Al-4V tratada com 3IP + *shot peening* e *shot peening* + 3IP

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador (a): Prof. Dra. Verônica Mara de Oliveira Velloso

Coorientador (a): Prof. Dr. Herman Jacobus Cornelis Voorwald

Guaratinguetá
2021

C198i	<p>Campos, Natália Celestino de</p> <p>Influência na vida em fadiga da liga Ti-6Al-4V tratada com 3IP + shot peening e shot peening + 3IP / Natália Celestino de Campos – Guaratinguetá, 2021.</p> <p>55 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 52-55</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021.</p> <p>Orientadora: Prof^a Dr^a Verônica Mara de Oliveira Cardoso</p> <p>Coorientador: Prof. Dr. Herman Jacobus Cornelis Voorwald</p> <p>1. Fadiga. 2. Ligas de titânio. 3. Aço – Fadiga. I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 620.178.3</p>
-------	---

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595


NATÁLIA CELESTINO DE CAMPOS


ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO(A) EM ENGENHARIA MECÂNICA”

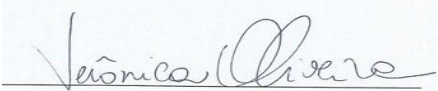
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof.^(a) Dr.^(a) CELSO EDUARDO TUNA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


MARTIN FERREIRA FERNANDES
UNESP-FEG


Prof.^(a) Dr.^(a) MIDORI YOSHIKAWA PITANGA
UNESP-FEG


Prof.^(a) Dr.^(a) VERÔNICA MARA DE OLIVEIRA VELLOSO
Orientador(a)/UNESP-FEG

Fevereiro, 2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Grupo de Pesquisa de Fadiga e Materiais Aeronáuticos por todo apoio durante a realização deste trabalho, à minha orientadora Verônica Mara de Oliveira Velloso e ao meu co-orientador Prof. Herman Jacobus Cornelis Voorwald por todo aprendizado neste período, à todos os técnicos dos laboratórios que me ajudaram a realizar ensaios e análises e à FAPESP pelo apoio financeiro que permitiu a conclusão deste estudo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) - número do processo 2017/23796-6.

RESUMO

A liga Ti-6Al-4V é utilizada no setor aeronáutico devido à algumas de suas propriedades como alta resistência específica, alta resistência mecânica e alto limite de escoamento. Devido a sua aplicação, ela pode ser submetida à carregamentos cíclicos, que são responsáveis por iniciar o fenômeno da fadiga. A fim de melhorar as propriedades tribológicas e a vida em fadiga da liga Ti-6Al-4V, neste trabalho foram realizados dois tratamentos superficiais: o 3IP que tem caráter protetivo e o *shot peening*, que influencia diretamente na vida em fadiga do material. Foram realizadas análises na microestrutura e na resistência à fadiga da liga primeiramente tratada com 3IP seguido de *shot peening* e depois na condição tratada com *shot peening* seguido de 3IP. Os resultados do ensaio de fadiga por flexão rotativa realizado com razão de carga $R=-1$ mostraram que a combinação dos tratamentos provocou um aumento na vida em fadiga do material para as duas condições de tratamento. Neste trabalho o tratamento superficial 3IP não causou queda na vida em fadiga da liga Ti-6Al-4V, devido à baixa temperatura usada e também devido à sua combinação com o *shot peening*. A inversão dos tratamentos não causou mudanças significativas na vida em fadiga, quando comparada as duas condições de tratamento.

PALAVRAS-CHAVE: Fadiga. Ti-6Al-4V. Tratamentos superficiais. *Shot peening*. 3IP.

ABSTRACT

The Ti-6Al-4V alloy is widely used in the aeronautic sector due to some of its properties such as high specific strength, high mechanical strength and high yield strength. Due to the application in which the material is used, it can be subjected to cyclic loading, which is responsible for initiating the fatigue phenomenon. In order to improve the tribological properties and fatigue life of Ti-6Al-4V alloy, in this work two surface treatments were performed: 3IP, which has a protective character and shot peening, which directly influences the fatigue life of the material. Analyses were performed on the microstructure and fatigue resistance of the alloy first treated with 3IP followed by shot peening and then in the condition treated with shot peening followed by 3IP. The results of the rotating bending fatigue test performed with load ratio $R=-1$ showed that the combination of treatments caused an increase in the fatigue life of the material for both treatment conditions. In this work the 3IP surface treatment did not cause a drop in the fatigue life of the alloy, due to the low temperature used and also due to its combination with shot peening. The inversion of the treatments did not cause significant changes in fatigue life when comparing the two treatment conditions.

KEYWORDS: Fatigue. Ti-6Al-4V. Surface treatments. Shot peening. 3IP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Máquina Instron 8801 utilizada nos ensaios de tração.....	21
Figura 2 – Corpo de prova do ensaio de fadiga por flexão rotativa.....	22
Figura 3 – Equipamento R.R. Moore.....	22
Figura 4 – (a) ampliação de 50X, (b) ampliação de 100X, (c) ampliação de 200X, (d) ampliação de 500X, (e) ampliação de 1000X.....	24
Figura 5 – Proporção de fases da liga Ti-6Al-4V sem tratamento.....	25
Figura 6 – Posição da amostra utilizada para as medidas de microdureza Vickers.....	26
Figura 7 – Difractometria de raios X da liga Ti-6Al-4V.....	27
Figura 8 – Gráfico tensão x deformação.....	28
Figura 9 – Gráfico tensão x número de ciclos da liga Ti-6Al-4V sem tratamento.....	29
Figura 10 – Gráfico de tensão x número de ciclos.....	31
Figura 11 – MEV da liga Ti-6Al-4V submetida a 1000 MPa com R=0,1: (a) regiões I, II e III; (b) concentrador de tensão encontrado na região I; (c) presença de dimples na região II.....	32
Figura 12 – MEV da liga Ti-6Al-4V submetida a 1000 MPa com R=0,5: (a) regiões I, II e III; (b) concentrador de tensão encontrado na região I; (c) presença de dimples na região II.....	33
Figura 13 – MEV da liga Ti-6Al-4V submetida a 1000 MPa com R=0,8: (a) regiões I, II e III; (b) concentrador de tensão encontrado na região I; (c) presença de dimples na região II.....	34
Figura 14 – Seção transversal da fratura do corpo de prova ensaiado com R=0,1.....	35
Figura 15 – Seção transversal da fratura do corpo de prova ensaiado com R=0,5.....	35
Figura 16 – Seção transversal da fratura do corpo de prova ensaiado com R=0,8.....	36
Figura 17 – (a) ampliação de 200X, (b) ampliação de 500X, (c) ampliação de 1000X.....	37
Figura 18 – Perfil de rugosidade em 2D do corpo de prova tratado com 3IP + SP.....	37
Figura 19 – Topografia do corpo de prova tratado com 3IP + SP.....	38
Figura 20 – Amostra tratada com 3IP + SP em campo claro: (a) ampliação de 500X, (b) ampliação de 2000X.....	39
Figura 21 – Amostra tratada com 3IP + SP em campo escuro: (a) ampliação de 500X, (b) ampliação de 2000X.....	39
Figura 22 – Amostra tratada com 3IP à 800 °C em campo escuro com ampliação de 500X.....	40

Figura 23 – Gráfico tensão x número de ciclos da liga Ti-6Al-4V tratada com 3IP + SP....	41
Figura 24 – (a) ampliação de 50X, (b) ampliação de 100X, (c) ampliação de 200X, (d) ampliação de 500X, (e) ampliação de 1000X.....	42
Figura 25 – Gráfico tensão x ciclos para todas as condições do estudo.....	44
Figura 26 – Teste de normalidade para a liga sem tratamento.....	45
Figura 27 – Teste de normalidade para a liga tratada com 3IP+SP.....	46
Figura 28 – Teste de normalidade para a liga tratada com SP+3IP.....	47
Figura 29 – Regressão linear da liga sem tratamento.....	48
Figura 30 – Regressão linear da liga tratada com 3IP+SP.....	48
Figura 31 – Regressão linear da liga tratada com SP+3IP.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Proporção das fases α e β	25
Tabela 2 – Medidas horizontais e verticais de microdureza Vickers.....	26
Tabela 3 – Propriedades da liga Ti-6Al-4V sem tratamento.....	28
Tabela 4 - Tensão e número de ciclos de cada ensaio.....	28
Tabela 5 – Resultados dos ensaios de fadiga axial.....	30
Tabela 6 – Tensões e ciclos para Ti-6Al-4V tratado com 3IP+SP.....	41
Tabela 7 – Tensões e ciclos para Ti-6Al-4V tratado com SP + 3IP.....	43
Tabela 8 – Análise de Weibull para a liga Ti-6Al-4V tratada.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3IP	Implantação Iônica por Imersão em Plasma
ASTM	American Society for Testing and Materials
SAE	Society of Automotive Engineers
SP	Shot peening

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS.....	13
2	DESENVOLVIMENTO	15
2.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1.1	Fadiga	15
2.1.2	Liga Ti-6Al-4V	16
2.1.3	Shot Peening	17
2.1.4	Implantação Iônica por Imersão em Plasma (3IP)	18
2.2	JUSTIFICATIVAS	19
2.3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
2.3.1	Liga Ti-6Al-4V	20
2.3.2	Caracterização metalográfica	20
2.3.3	Ensaio de microdureza Vickers	20
2.3.4	Ensaio de tração	20
2.3.5	Ensaio de fadiga axial	21
2.3.6	Ensaio de fadiga por flexão rotativa	21
2.3.7	Fractografias	22
2.3.8	Tratamento superficial por 3IP	22
2.3.9	Tratamento superficial por <i>shot peening</i>	23
2.3.10	Perfilometria	23
2.3.11	Microscopia óptica em campo claro e escuro	23
2.4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	23
2.4.1	Liga Ti-6Al-4V sem tratamento	23
2.4.1.1	Microscopia óptica.....	23
2.4.1.2	Análise de proporção de fases.....	24
2.4.1.3	Ensaio de microdureza Vickers.....	25
2.4.1.4	Difratometria de raios X.....	26
2.4.1.5	Ensaio de tração.....	27
2.4.1.6	Ensaio de fadiga por flexão rotativa.....	28
2.4.1.7	Ensaio de fadiga axial.....	30
2.4.1.8	Fractografias.....	31
2.4.2	Liga Ti-6Al-4V tratada com 3IP+SP	36

2.4.2.1	Microscopia óptica.....	36
2.4.2.2	Perfilometria.....	37
2.4.2.3	Imagens em campo claro e escuro.....	38
2.4.2.4	Ensaio de fadiga por flexão rotativa.....	40
2.4.3	Liga Ti-6Al-4V tratada com SP+3IP.....	42
2.4.3.1	Microscopia óptica.....	42
2.4.3.2	Ensaio de fadiga por flexão rotativa.....	43
2.4.4	Análise estatística.....	44
2.4.4.1	Modelos de regressão.....	44
2.4.4.2	Análise de Weibull.....	49
3	CONCLUSÃO.....	51
	REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

Estudos revelaram que cerca de 90% das falhas em materiais estruturais são devido à fadiga e ocorrem em tensões inferiores à resistência de escoamento do material (SHIGLEY, 2005). Como este fenômeno ocorre de forma repentina, graves acidentes envolvendo componentes aeronáuticos, por exemplo, podem ocorrer (CALLISTER, 2008).

A resistência à fadiga dos materiais é influenciada por sua condição superficial (SILVA *et al.*, 2017). Portanto, a presença de pites por corrosão e entalhes na superfície podem afetar na vida em fadiga deste material, pois os mesmos atuam como concentradores de tensão, que aceleram a nucleação de trincas e ruptura do material (NASCIMENTO, 2010; TORRES, 2002).

A liga Ti-6Al-4V é utilizada no setor aeronáutico devido às suas propriedades mecânicas como resistência à fluência, resistência ao impacto e resistência à corrosão (MOURA, 2017). Apesar de possuir boas propriedades mecânicas, essa liga possui propriedades tribológicas ruins e reatividade superficial quando submetida a altas temperaturas, fazendo com que o seu desempenho em relação à fadiga seja prejudicado (OLIVEIRA, 2018).

Os tratamentos superficiais ajudam a melhorar as propriedades superficiais não só das ligas de titânio, mas também de outras ligas metálicas. O *shot peening* é um tratamento superficial que introduz tensões residuais compressivas na superfície desses componentes, retardando as falhas por fadiga (BHUVARAGHAN, 2010). A técnica de implantação iônica por imersão em plasma, conhecida como 3IP, modifica as características mecânicas, físicas e químicas na superfície do componente, através de átomos que são acelerados e então introduzidos na superfície do material (OLIVEIRA, 2017). Esses e outros tratamentos superficiais ajudam a aumentar a vida em fadiga dos materiais, através das modificações na superfície.

Entretanto, não existem trabalhos que associem os tratamentos de 3IP + *shot peening* ou *shot peening* + 3IP e analisem as mudanças microestruturais e mecânicas causadas por tais tratamentos combinados. Este trabalho irá realizar o estudo dessas mudanças microestruturais e mecânicas correlacionadas com as mudanças causadas na vida em fadiga da liga.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo do trabalho foi analisar a influência dos tratamentos superficiais de 3IP e SP na liga Ti-6Al-4V, bem como, se a ordem dos tratamentos afetaria nas propriedades mecânicas da liga: primeiro foi usada a combinação 3IP + SP (*shot peening* como pós tratamento) e depois SP + 3IP (*shot peening* como pré tratamento). Foram realizadas análises da microestrutura das amostras e foram feitos ensaios mecânicos de fadiga.

Os corpos de prova foram estudados em três estados: sem tratamento, tratados com *shot peening* + 3IP e 3IP + *shot peening*.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1 Fadiga

A fadiga está associada a esforços cíclicos; a ruptura de componentes estruturais por fadiga ocorre, na maioria das vezes, em tensão inferior ao limite de escoamento do material (LIMA, 2019). Grande parte dos componentes mecânicos e estruturais, quando em serviço, são submetidos a carregamentos dinâmicos (VOORWALD, 2007).

A fadiga é um fenômeno que consiste em uma alteração na estrutura de um componente, que ocorre de forma localizada e gradual. A falha por fadiga é um fenômeno que ocorre em três estágios: a nucleação de trincas, a propagação de trincas e a ruptura do material (BRANCO, 1999). Durante a nucleação, as discordâncias movimentam-se ao longo dos contornos de grão. Com o passar dos ciclos, as discordâncias se coalescem, iniciando o processo de nucleação de microtrincas. Depois de formadas as trincas, à medida que as tensões de tração continuam sendo aplicadas no material, ocorre o crescimento das mesmas até que atinjam um tamanho crítico e o material frature.

Análises da superfície de um material que fraturou devido a fadiga podem apresentar marcas na superfície, chamadas marcas de praia (LIMA, 2019). Estas marcas informam sobre o local de nucleação da trinca (se a trinca foi originada na superfície do material ou não). Segundo estudos, grande parte das falhas que ocorrem nos materiais tem suas trincas iniciadas a partir da superfície, em regiões de concentradores de tensão como defeitos superficiais que surgem durante processos de deformação ou usinagem (CLAROS, 2016).

Existem alguns parâmetros que são importantes no estudo da fadiga de um material indicados nas equações (1), (2), (3) e (4) (CORDEIRO, 2011):

Variação de tensão:

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (1)$$

Amplitude de tensão:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (2)$$

Tensão média:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (3)$$

Razão de tensão:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (4)$$

Para se encontrar o limite de resistência à fadiga é realizado um levantamento da curva S-N do material, que é um gráfico que relaciona a tensão máxima aplicada pelo número de ciclos até ruptura, para determinada razão de tensão (CORDEIRO, 2011).

Revestimentos podem ser aplicados em materiais a fim de combinar sua resistência à fadiga com maiores resistências ao desgaste e corrosão (BONORA, 2010). Doria (2019) estudou a influência da duração de oxidação térmica no comportamento em fadiga da liga Ti-6Al-4V e constatou que quanto maior o tempo de oxidação, maior a camada de óxido formada, porém não foi constatado nenhuma influência significativa na vida em fadiga.

Estudos realizados por Pastorek *et al.* (2015) analisaram a resistência à corrosão da liga Ti-6Al-4V submetida ao *shot peening* e à oxidação anódica. Foram utilizadas esferas de cerâmica com intensidade de Almen de 0.13 mmA e a uma solução ácida de 7% H_2SO_4 , com tensão constante de 65 V para a oxidação anódica. A liga que foi tratada anteriormente com *shot peening* obteve uma melhora na resistência à corrosão quando comparada a liga que não passou pelo *shot peening*.

2.1.2 Liga Ti-6Al-4V

O titânio e suas ligas possuem excelente combinação de propriedades. O metal puro possui baixa massa específica, elevado ponto de fusão (1668 °C) e módulo de elasticidade de 107 GPa (XU *et al.*, 2016). As ligas de titânio podem ser classificadas como α e *near* α (estrutura hexagonal compacta), β (estrutura cúbica de corpo centrado) e $\alpha+\beta$ que tem como sua representante a liga Ti-6Al-4V (MOURA, 2017). A adição dos elementos de liga nas proporções de 6% de alumínio e 4% de vanádio, respectivamente, são responsáveis por propriedades da liga como alta resistência mecânica, dureza, alto limite de escoamento e estabilidade das fases α e β a temperatura ambiente (BRITTO, 2015) e sua produção representa mais de 50% da produção de ligas de titânio (LEYENS, 2003).

As diferentes ligas de titânio existentes são formadas a partir da combinação das variações cristalográficas, adição de elementos de liga e tratamentos termomecânicos (LIMA, 2019). A liga Ti-6Al-4V possui alta resistência específica, que é uma propriedade que relaciona o módulo de elasticidade do material com a sua massa específica. Esta possui um alto módulo de elasticidade combinado com uma baixa massa específica, o que a torna um material resistente e ao mesmo tempo leve. Por possuir um alto ponto de fusão, a liga possui alta resistência a degradação, permitindo que seja trabalhada em altas temperaturas (VELLOSO, 2018).

Porém, existe uma preocupação relacionada as suas propriedades tribológicas e sua reatividade superficial (OLIVEIRA, 2018). Em relação as suas propriedades tribológicas, as ligas de titânio apresentam baixa resistência ao desgaste e alto coeficiente de atrito, fazendo com que o material tenha uma baixa resistência ao atrito. E sua alta reatividade superficial faz com que a liga reaja com o oxigênio e forme óxidos em sua superfície, essa reatividade torna-se maior com o aumento da temperatura de trabalho (ZEPKA, 2015). O filme óxido que se forma sobre a superfície do titânio, à temperatura ambiente, tem caráter protetor, contudo, em altas temperaturas, a espessura do óxido aumenta e sua aderência ao substrato diminui, expondo o metal a processos corrosivos e diminuindo a área útil de sustentação da peça em serviço (OLIVEIRA, 2016).

Ligas de titânio são tratadas superficialmente para que suas propriedades superficiais sejam melhoradas e, ao mesmo tempo, para garantir a manutenção de suas boas propriedades mecânicas. Zepka *et al.* (2015) trataram amostras com 3IP e constataram uma diminuição no coeficiente de desgaste em relação à amostra não tratada, portanto o material apresentou um aumento em sua dureza. Outros estudos realizados por Barriuso *et al.* (2014) consistiram em jatear a liga Ti-6Al-4V com ZrO_2 e Al_2O_3 . O jateamento com ZrO_2 provocou uma redução na rugosidade do material e um aumento em sua dureza; já o jateamento com Al_2O_3 provocou a formação de pontos concentradores de tensão, causando uma diminuição na vida em fadiga do material.

A influência de tratamentos superficiais no comportamento em fadiga de ligas de titânio, contudo, é um assunto controverso. Portanto, é importante que sejam realizados estudos que combinem mais de um tratamento, a fim de proteger sua superfície e melhorar seu comportamento em fadiga.

2.1.3 Shot peening

O tratamento superficial de *shot peening* é um trabalho a frio que introduz tensões residuais compressivas na superfície do material através do impacto causado pelo bombardeamento de pequenas esferas. Quando ocorre o impacto da esfera em alta velocidade na superfície da peça, uma deformação plástica no formato de uma pequena concavidade é produzida, conhecida como *dimple* (KOUKETSU, 2017). Abaixo da região deformada, são criadas tensões residuais compressivas, responsáveis por aumentar a vida em fadiga do material e as esferas utilizadas neste processo podem ser de vidro, cerâmica ou aço (GALLITELLI, 2016).

Os parâmetros utilizados no processo como intensidade Almen, cobertura, tamanho das esferas, velocidade de bombardeamento, material e dureza das esferas, ângulo de impacto e atrito são capazes de melhorar não só o comportamento em fadiga do material, mas também sua resistência ao atrito e corrosão, por exemplo (GALLITELLI, 2016). Como existem várias combinações diferentes dos parâmetros citados, também serão gerados diferentes valores de tensão residual compressiva (BHUVARAGHAN, 2010).

Este tratamento, além de provocar o encruamento na superfície do material, também aumenta sua dureza, seu limite de escoamento e sua rugosidade, propriedades estas que influenciam na vida em fadiga dos componentes (SCURACCHIO, 2012).

A resistência à fadiga por contato da liga Ti-6Al-4V foi estudada por Yang *et al.* Os autores realizaram tratamento por *shot peening* na liga e constataram um aumento significativo em sua vida em fadiga por contato (YANG *et al.*, 2017). Estudos realizados por Bertuol (2014) mostraram um aumento na dureza superficial do aço ASTM A743-CA6NM, sendo o ângulo de ataque o parâmetro que mais influenciou. Yu *et al.* (2015) combinaram amostras de Ti-6Al-4V cromadas com plasma e tratadas posteriormente por *shot peening*. Ocorreu pequeno aumento da vida em fadiga das amostras que passaram pelos dois tratamentos quando comparadas as que passaram apenas pelo tratamento de *shot peening*, mostrando que o uso de mais de um tratamento pode trazer benefícios aos materiais (YU *et al.*, 2015).

2.1.4 Implantação Iônica por Imersão em Plasma (3IP)

A implantação iônica por imersão em plasma, conhecida como 3IP, é uma tecnologia disponível para formação de camadas protetivas. A técnica consiste no bombardeamento de um material sólido com átomos ionizados de média e alta energia e pode ser aplicada inclusive nos casos de peças que possuam geometria complexa (OLIVEIRA *et al.*, 2017)

A amostra a ser tratada é imersa em um plasma de baixa pressão e então é aplicada uma tensão neste plasma, que fará com que os íons sejam acelerados e implantados na superfície do material, modificando suas características mecânicas, físicas e químicas na região da superfície (OLIVEIRA, 2017).

Durante a implantação de nitrogênio por 3IP, pode ocorrer ou não a formação de nitretos na superfície, sendo que os efeitos desses nitretos na resistência à fadiga do material podem variar caso a caso. A formação ou não desses nitretos depende da combinação de parâmetros que foi utilizada e, dependendo dessa combinação, as propriedades da liga podem melhorar, piorar ou permanecer inalteradas (OLIVEIRA, 2018).

O 3IP apresenta-se como um processo alternativo ao processo de nitretação convencional, pois é mais rápido e não produz necessariamente um filme na superfície do material. Este filme obtido em tratamentos convencionais pode acumular tensões que poderão interferir negativamente em seu comportamento em fadiga (SILVA, 2007).

A liga Ti-6Al-4V foi tratada via 3IP por Zepka *et al.* (2015) e foi observada uma diminuição no coeficiente de atrito destas amostras. Os parâmetros utilizados no processo interferem diretamente nos resultados obtidos e neste mesmo estudo realizado por Zepka *et al.* (2015) foi observado que as amostras que ficaram imersas por mais tempo apresentaram menor coeficiente de atrito comparadas com as que ficaram menos tempo (ZEPKA *et al.*, 2015).

Em outro estudo realizado por Velloso *et al.* (2018) foi mostrado que o tratamento por 3IP causou uma diminuição na resistência à fadiga da liga Ti-6Al-4V. O tratamento foi realizado nas temperaturas de 390 °C e 800 °C e para ambas as situações ocorreu a diminuição da resistência à fadiga, com um decréscimo de 50 vezes e 346 vezes, respectivamente. O estudo mostra que a escolha dos parâmetros do 3IP influencia diretamente na vida em fadiga da liga sendo, portanto, importante fazer a escolha certa dos mesmos para obter resultados que não afetem na resistência à fadiga e ao mesmo tempo proteja a superfície do material.

2.2 JUSTIFICATIVAS

A liga Ti-6Al-4V é muito utilizada no setor aeronáutico e, apesar de possuir propriedades mecânicas muito boas, possui limitações relacionadas às suas propriedades superficiais, que podem diminuir a vida em fadiga dos componentes em que for utilizada. Diante disto, a realização do tratamento por 3IP surge como uma potencial solução para os problemas que esta liga possui em relação às suas propriedades tribológicas; já o tratamento

por *shot peening* poderá resolver a questão da geração de tensões residuais trativas pelo tratamento de 3IP desta liga.

Para tentar melhorar as propriedades mecânicas da liga, é importante fazer a combinação desses dois tratamentos superficiais, a fim de entender se a combinação e inversão dos tratamentos anulam o efeito um do outro e se juntos são capazes de oferecer a manutenção da vida em fadiga do material.

2.3 MATERIAIS E MÉTODOS

2.3.1 Liga Ti-6Al-4V

Foram utilizadas barras cilíndricas com 1,0 m de comprimento e 14 mm de diâmetro fornecidas pela Empresa Realum Indústria e Comércio de Metais Puros e Ligas Ltda.

2.3.2 Caracterização metalográfica

As amostras foram cortadas a partir das barras cilíndricas de 1,0 m de comprimento e 14 mm de diâmetro e passaram por um embutimento à quente. Após, foram lixadas manualmente com lixas d'água a base de SiC nas granas de 220, 400, 600, 1000, 1200 e 1500 e polidas com uma suspensão de sílica coloidal. Em seguida, foi realizado o ataque químico das amostras com uma solução de 1% HF, 4% HNO₃ e água (ataque Kroll).

As imagens apresentadas neste trabalho foram obtidas através do microscópio óptico Nikon Epiphot 200.

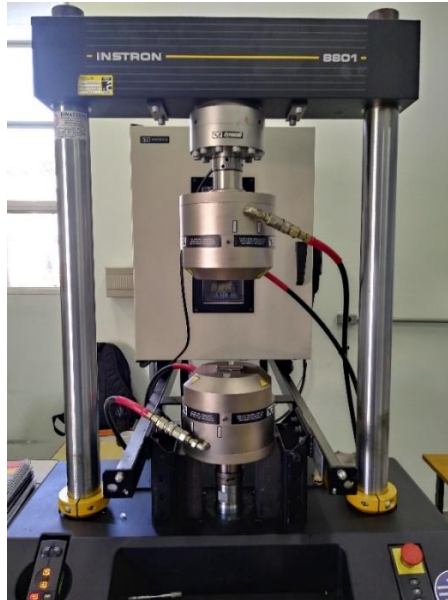
2.3.3 Ensaio de microdureza Vickers

O ensaio de microdureza Vickers foi realizado com o auxílio de um microdurômetro digital HMT-2T da Shimadzu instalado no Departamento de Materiais e Tecnologia – DMT - UNESP – Guaratinguetá, com uma carga de 200 gf e foram obtidas medidas verticais e horizontais ao longo da amostra.

2.3.4 Ensaio de tração

Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de tração na máquina Instron 8801, seguindo a norma ASTM E8M. A Figura 1 mostra a máquina utilizada para a realização dos ensaios:

Figura 1 - Máquina Instron 8801 utilizada nos ensaios de tração



Fonte: Autor

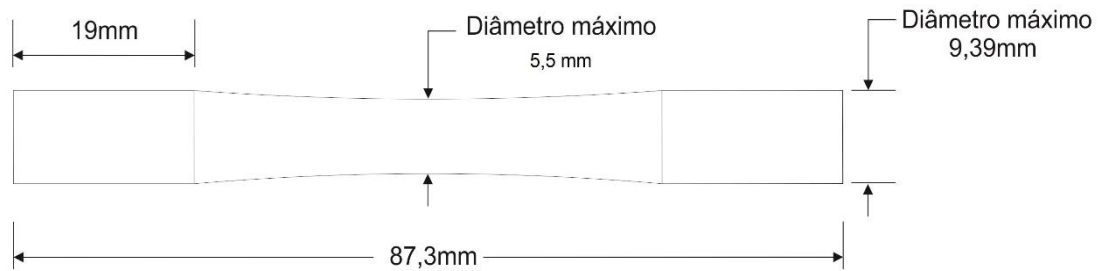
2.3.5 Ensaio de fadiga axial

Os ensaios de fadiga axial foram realizados no equipamento Instron 8801 (Figura 1) instalada no Departamento de Materiais e Tecnologia – DMT - UNESP – Guaratinguetá, seguindo a norma ASTM E466. Os testes foram conduzidos até a fratura ou até um número de ciclos igual a 10^6 ciclos para $R = 0,1$, $R = 0,5$ e $R = 0,8$.

2.3.6 Ensaio de fadiga por flexão rotativa

Os ensaios de fadiga por flexão rotativa foram realizados no equipamento R.R. Moore. Os ensaios foram realizados com frequência de 30 Hz e $R = -1$, conduzidos até 10^6 ciclos ou até a ruptura. A Figura 2 mostra as dimensões do corpo de prova utilizado e a Figura 3 mostra o equipamento Instron R.R. Moore para ensaios de fadiga por flexão rotativa:

Figura 2 - Corpo de prova do ensaio de fadiga por flexão rotativa



Fonte: Autor

Figura 3 - Equipamento R.R. Moore



Fonte: Autor

2.3.7 Fractografias

Foram realizadas fractografias dos corpos de prova que fraturam com $R=0,1$, $R=0,5$ e $R=0,8$, submetidos à tensão de 1050 MPa. As imagens da região fraturada durante os ensaios de fadiga axial foram realizadas com o microscópio eletrônico de varredura LEO modelo 1450-VP.

2.3.8 Tratamento superficial por 3IP

Os seguintes parâmetros foram utilizados neste tratamento: tensão de 9,5 kV, frequência de bombardeamento de 1200 Hz, ou seja, 1200 pulsos por segundo que ficam ativos por 40 microsegundos. O tempo de implantação foi de 120 min e a temperatura da amostra foi mantida em 390 °C.

2.3.9 Tratamento superficial por *shot peening*

O tratamento superficial de *shot peening* foi realizado na forma de dual peening, portanto foi realizado um duplo jateamento. O primeiro jateamento foi feito com intensidade variando entre 0,41–0,49 mmA, com a esfera S230, que possui dureza de 57-62 HRC. Já o segundo jateamento foi realizado com intensidade variando entre 0,22-0,30 mmA, com esfera S110 de dureza 57-62 HRC. Ambas as esferas são do material SAE J2441.

2.3.10 Perfilometria

Foi utilizado o perfilmetro óptico modelo Leica DCM 3D para determinar a rugosidade da amostra de Ti-6Al-4V tratada com 3IP + *shot peening*. O equipamento está instalado no Departamento de Materiais e Tecnologia – DMT – UNESP – Guaratinguetá.

2.3.11 Microscopia óptica em campo claro e escuro

Estas imagens foram realizadas com o microscópio óptico Zeiss Axio Imager.Z2m nas amostras tratadas com 3IP + *shot peening*. O equipamento está instalado no Departamento de Materiais e Tecnologia – DMT – UNESP – Guaratinguetá.

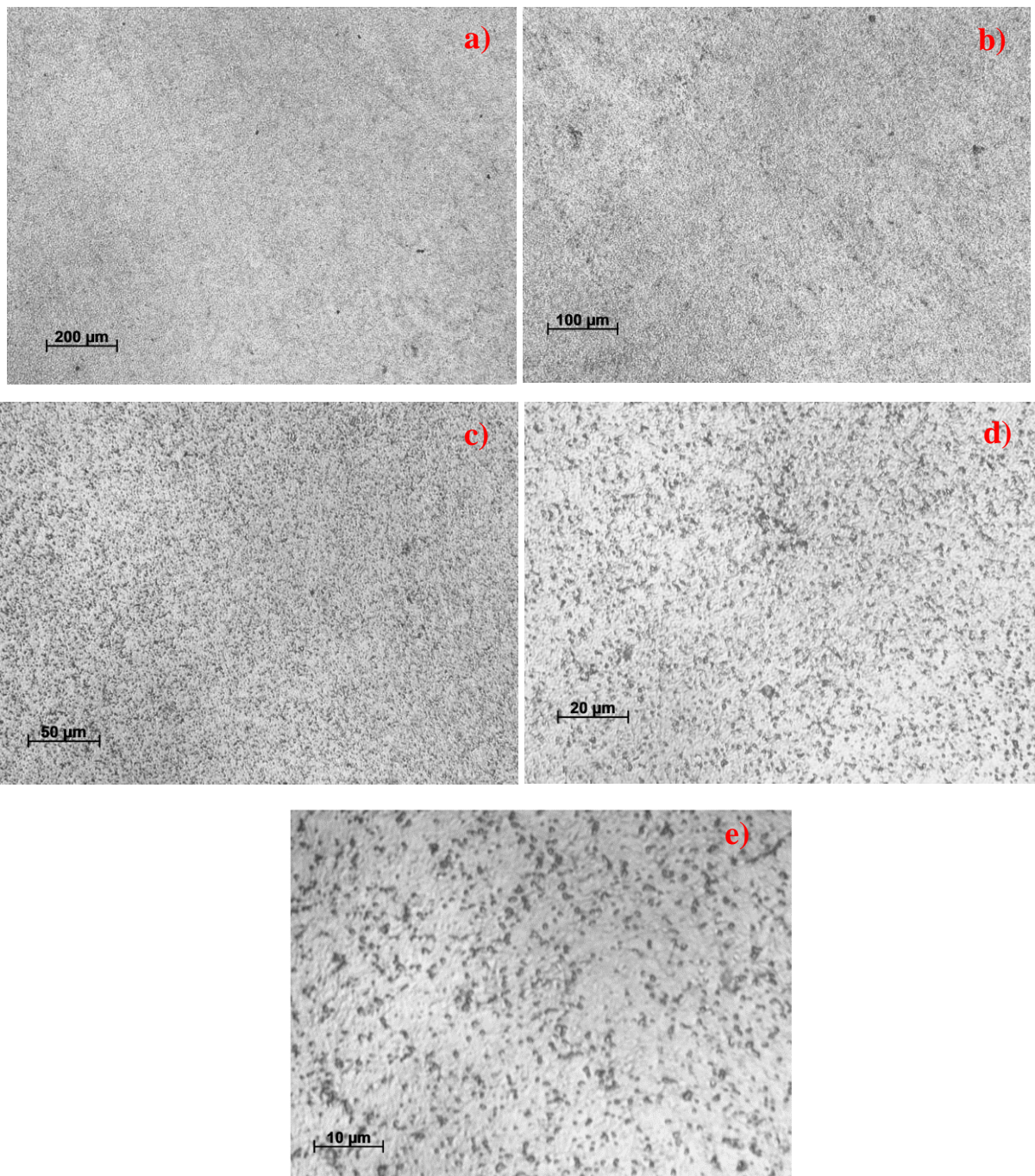
2.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

2.4.1 Liga Ti-6Al-4V sem tratamento

2.4.1.1 Microscopia óptica

A Figura 4 mostra a microestrutura da liga TI-6Al-4V sem tratamento. A parte mais clara representa a fase α e a parte mais escura representa a fase β .

Figura 4 – (a) ampliação de 50X, (b) ampliação de 100X, (c) ampliação de 200X, (d) ampliação de 500X, (e) ampliação de 1000X

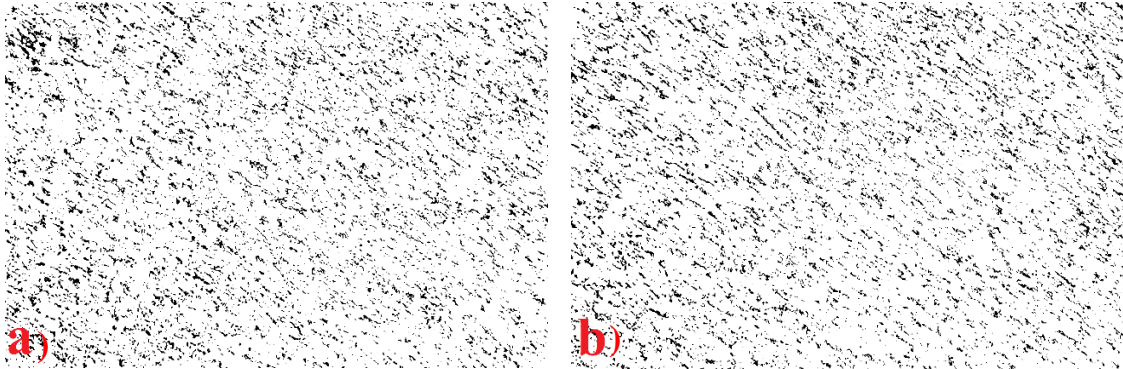


Fonte: Autor

2.4.1.2 Análise de proporção de fases

Com o auxílio do software ImageJ, foi calculada a porcentagem da fase α e β em cinco micrografias de 200x obtidas por microscopia óptica. Na Figura 5, a fase α é representada pela parte mais clara e a fase β pela parte mais escura:

Figura 5 - Proporção de fases da liga Ti-6Al-4V sem tratamento



Fonte: Autor

A Tabela 1 mostra a porcentagem de fase para cada figura, assim como sua média e desvio padrão:

Tabela 1 - Proporção das fases α e β

Figura	Proporção de α	Proporção de β
1	76,5	23,5
2	76,9	23,0
3	78,8	21,2
4	77,1	22,9
5	76,8	23,2
Média	77,2	22,8
Desvio padrão	0,9	0,9

Fonte: Autor

A média obtida nessas análises encontra-se próxima da calculada por Oliveira *et. al.* (2018) que são 22,5% de β e 77,5% de α .

2.4.1.3 Ensaio de microdureza Vickers

Neste ensaio as medidas horizontais e verticais foram realizadas de acordo com a posição da amostra mostrada na Figura 6:

Figura 6 - Posição da amostra utilizada para as medidas de microdureza Vickers



Fonte: Autor

A Tabela 2 mostra os valores obtidos na horizontal e vertical, assim como sua média e desvio padrão:

Tabela 2 - Medidas horizontais e verticais de microdureza Vickers

nº medida	horizontal	vertical
1	313,6	319,5
2	313,4	312,2
3	318,9	315,7
4	319,5	317,4
5	311	-
6	314,9	-
7	315,4	-
8	323,8	-
9	326	-
10	335	-
Média	319,15	316,2
Desvio padrão	7,32	3,09

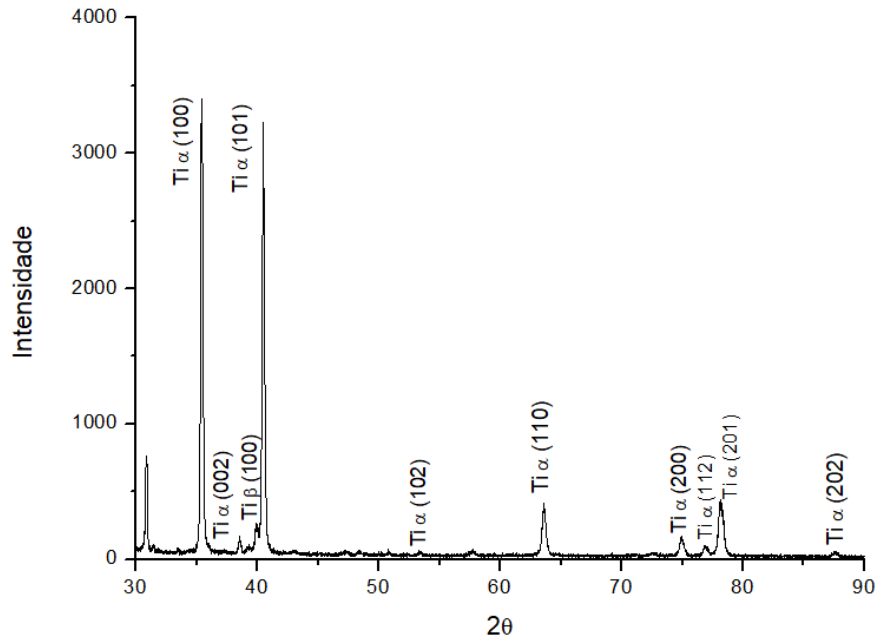
Fonte: Autor

Os valores de microdureza Vickers apresentados estão dentro do intervalo de 334 ± 18 (HV) obtidos por Oliveira *et. al.* (2015). As medidas tanto na horizontal como na vertical apresentam valores equivalentes, mostrando que o material é isotrópico.

2.4.1.4 Difractometria de raios X

A Figura 7 mostra a análise de difratometria de raios X para a liga Ti-6Al-4V sem tratamento:

Figura 7 - Difratometria de raios X da liga Ti-6Al-4V



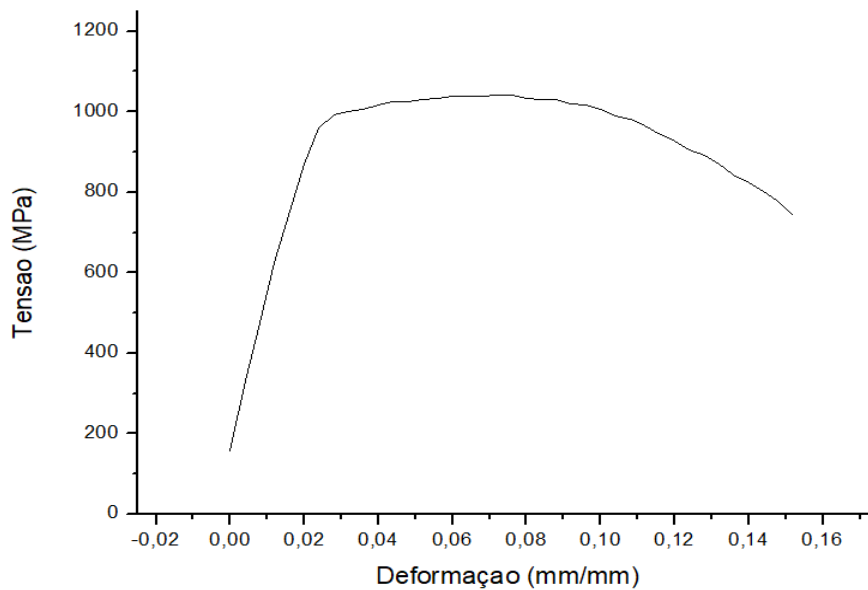
Fonte: Autor

A partir da difratometria de raios X é possível ver qual fase é predominante. Foi possível observar que os picos mais intensos representam a fase α , que foram encontrados nos ângulos $2\theta = 35,5^\circ$, $2\theta = 38,4^\circ$, $2\theta = 40,5^\circ$, $2\theta = 66,6^\circ$ e $2\theta = 78,1^\circ$. A fase β foi identificada em um pequeno pico no ângulo $2\theta = 39,9^\circ$. Os picos que apresentam as duas fases coincidem com os picos encontrados por Oliveira *et al.* (2018) e assim fica comprovado que a fase α é predominante em relação a fase β .

2.4.1.5 Ensaio de tração

A Figura 8 mostra o gráfico obtido a partir do ensaio de tração para o material sem tratamento:

Figura 8 - Gráfico tensão x deformação



Fonte: Autor

Foram realizados três ensaios e a Tabela 3 mostra os valores de algumas propriedades obtidas através destes ensaios:

Tabela 3 - Propriedades da liga Ti-6Al-4V sem tratamento

Limite de resistência a tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)	Alongamento (%)	Redução da área (%)
1040,76±100	988,67±20	721,84±29	29,55±10	48,72±12

Fonte: Autor

2.4.1.6 Ensaio de fadiga por flexão rotativa

A Tabela 4 mostra as tensões utilizadas no ensaio e o seu respectivo número de ciclos:

Tabela 4 - Tensão e número de ciclos de cada ensaio

(continua)

nº ensaio	Tensão aplicada (MPa)	Número de ciclos
1	811	5.413
2	752	15.316

Tabela 4 – Tensão e número de ciclos de cada ensaio

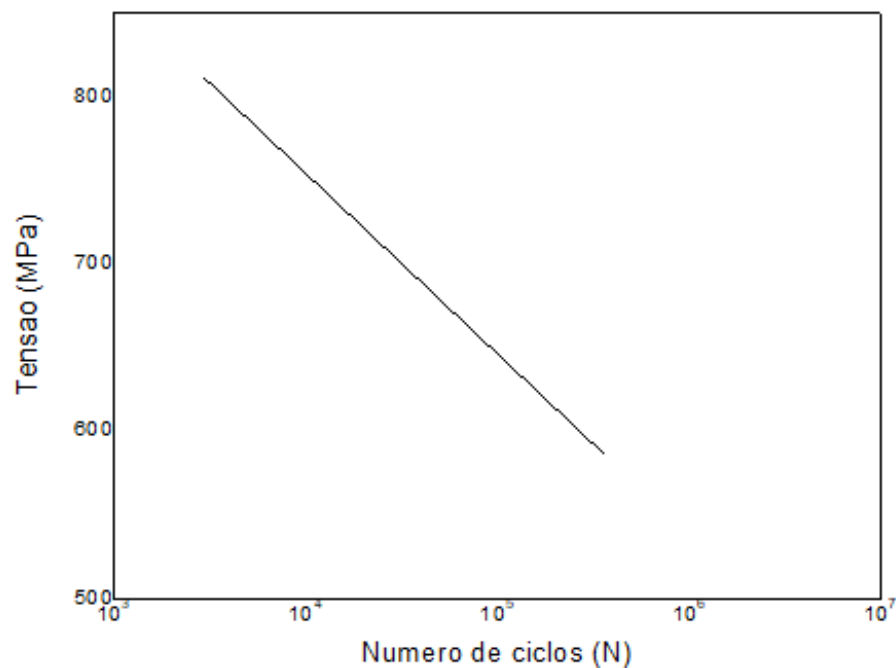
(conclusão)

nº ensaio	Tensão aplicada (MPa)	Número de ciclos
4	705	29.027
5	685	13.537
6	674	45.705
7	662	73.480
8	607	112.679
9	586	1.030.713

Fonte: Autor

Com os dados da Tabela 4, foi construído o gráfico mostrado na Figura 9:

Figura 9 - Gráfico tensão x número de ciclos da liga Ti-6Al-4V sem tratamento



Fonte: Autor

Oliveira *et al.* (2018) estudou o comportamento da liga Ti-6Al-4V submetida à fadiga axial, nas mesmas condições de dureza encontradas neste presente trabalho. Segundo os autores, para um tempo de vida de 10^6 ciclos a liga suportou um nível de tensão igual a 915 MPa, tensão esta que representou 91% do limite de escoamento ou 88% do limite de resistência à tração do material base utilizado pelos autores.

Os ensaios de fadiga por flexão rotativa são mais severos, pois todo o corpo de prova é submetido a tensão máxima enquanto na flexão rotativa apenas a superfície está sob

máxima tensão, exigindo mais da superfície. Neste presente trabalho, para um tempo de vida de 10^6 ciclos o material suportou uma tensão de 586 MPa, que representa 59% do limite de escoamento e 56% do seu limite de resistência a tração. Já para o tempo de vida de 10^3 ciclos, a liga suportou uma tensão de 811 MPa, que equivale a 81% do seu limite de escoamento e 78% do seu limite de resistência a tração.

2.4.1.7 Ensaio de fadiga axial

Neste ensaio, foram utilizadas as razões de tensão de $R = 0,1$, $R = 0,5$ e $R = 0,8$, sendo que para cada razão de carga, os corpos de provas foram ensaiados com tensões de 1000, 1050 e 1100 MPa. A Tabela 5 mostra os resultados obtidos:

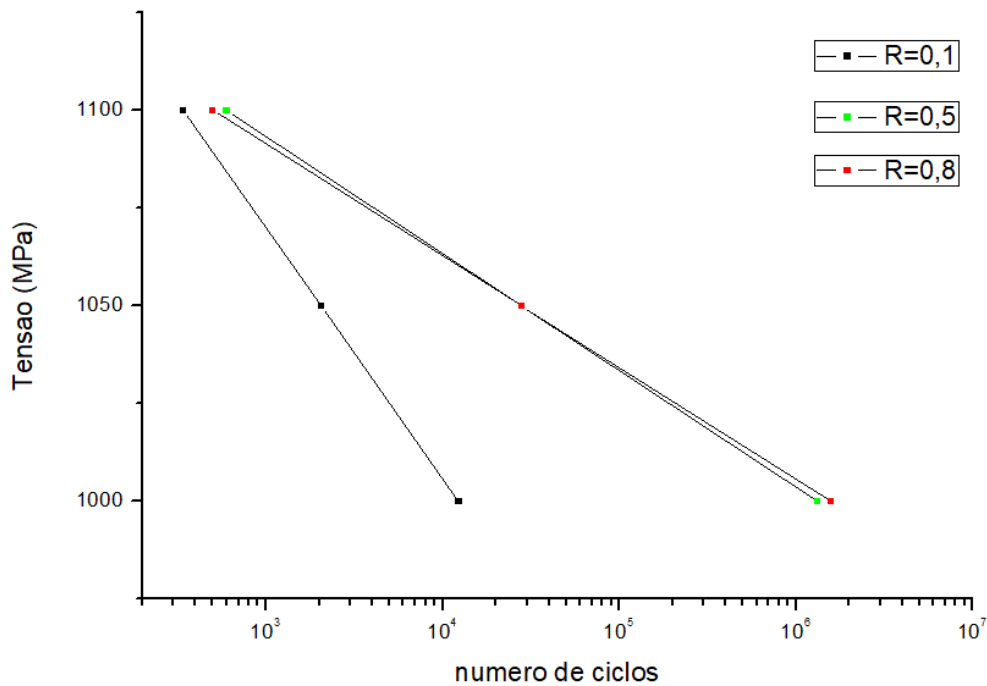
Tabela 5 - Resultados dos ensaios de fadiga axial

Razão de carga	Tensão (MPa)	n° de ciclos
0,1	1100	3,70E+02
	1050	1,76E+03
	1000	1,34E+04
0,5	1100	4,54E+02
	1050	4,94E+04
	1000	1,00E+06
0,8	1100	3,14E+02
	1050	7,82E+04
	1000	1,00E+06

Fonte: Autor

Com os resultados da Tabela 5, foram construídas as curvas mostradas na Figura 10, utilizando o Método dos Mínimos Quadrados:

Figura 10 - Gráfico de tensão x número de ciclos



Fonte: Autor

A Tabela 5 e a Figura 10 mostram que para a tensão de 1100 MPa, a liga Ti-6Al-4V suportou menos que 500 ciclos e isso ocorreu porque a tensão utilizada encontra-se acima do valor da tensão de escoamento do material, que é aproximadamente 1000 MPa.

Para a tensão de 1000 MPa a razão de carga igual a 0,1 suportou cerca de 13000 ciclos; já as razões de carga de 0,5 e 0,8 apresentaram tempo de vida de 10⁶ ciclos. Os resultados mostram que para baixas razões de carga, é suportado um número menor de ciclos; esse resultado já era esperado, já que para qualquer tensão máxima dada, a amplitude da tensão diminui com o aumento da razão de carga (KRIJGER *et. al.*, 2017).

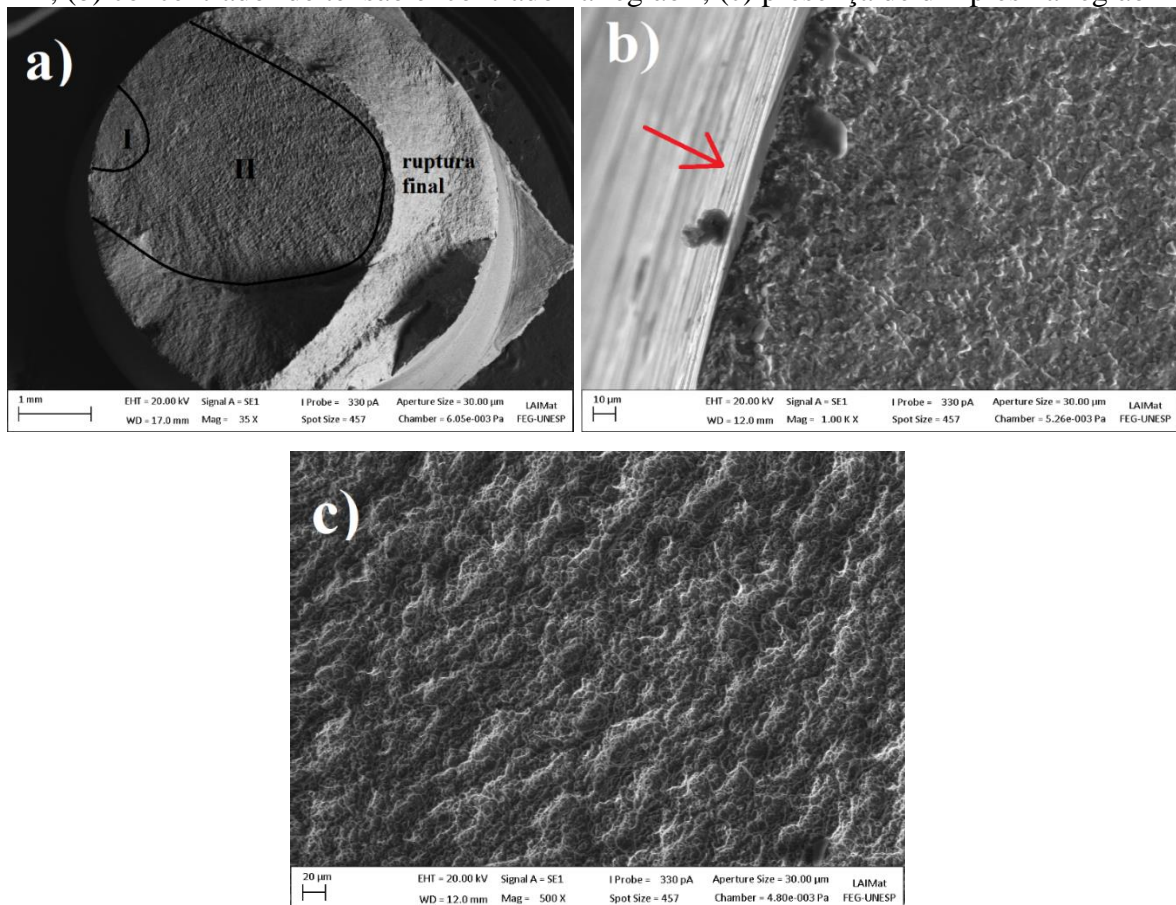
Estudos realizados por Krijger *et. al.* (2017) analisaram os efeitos de diferentes razões de carga na vida em fadiga de um biomaterial feito com a liga Ti-6Al-4V e constataram uma pequena diminuição na vida em fadiga para altas razões de carga. Guennec *et. al.* (2018) também estudaram os efeitos da razão relacionados a resistência a fadiga, porém em um material intermetálico e também constataram uma pequena diminuição na vida em fadiga com o aumento da razão de carga.

2.4.1.8 Fractografias

As figuras abaixo mostram as fractografias realizadas nos corpos de prova que foram submetidos ao ensaio de fadiga axial com $R=0,1$, $R=0,5$ e $R=0,8$. Existem três regiões que são tipicamente encontradas em uma superfície fraturada: região de iniciação da trinca e propagação da trinca (I), região de deformação plana (zona de deformação plástica dúctil com presença de *dimples*) (II) e região de ruptura final, que podem ser observadas na Figura 11 (a). Esse mesmo tipo de fratura foi encontrado no estudo realizado por Tan *et. al.* (2018) em uma liga de titânio.

A Figura 11 (b) é uma aproximação realizada dentro da região I, que mostra o ponto onde a trinca foi nucleada, apontado pela seta. A Figura 11 (c) mostra a região II com a presença de *dimples* e segundo Huang *et. al.* (2017), esse aspecto de fratura é comumente encontrada nessa área para materiais dúcteis.

Figura 11 - MEV da liga Ti-6Al-4V submetida a 1000 MPa com $R=0,1$: (a) regiões I, II e III; (b) concentrador de tensão encontrado na região I; (c) presença de *dimples* na região II

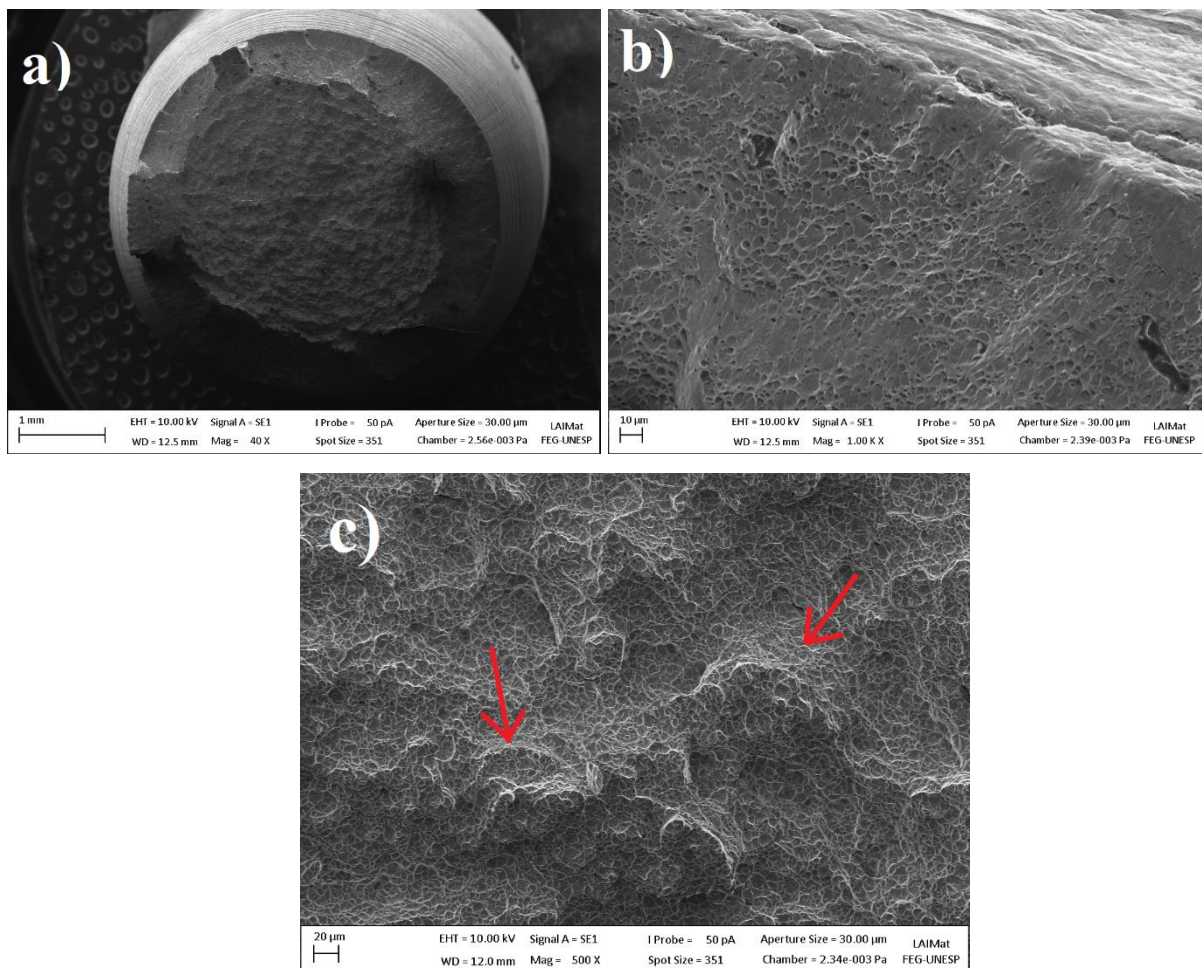


Fonte: Autor

A Figura 12 mostra as imagens obtidas para o corpo de prova com $R = 0,5$. A fratura neste corpo de prova ocorreu no formato de taça-cone, típica de ensaio de tração,

caracterizado por uma área central com *dimples* cercada por partes cisalhadas. Esse mesmo tipo de fratura foi encontrado por Farokhzadeh (2015) em um estudo sobre o aumento da resistência à fadiga da liga Ti-6Al-4V. A Figura 12 (b) mostra um dos vários sítios de nucleação de trincas que, diferente da amostra anterior, não apresentou um ponto de nucleação principal ou que tenha majoritariamente determinado o tempo de vida em fadiga do corpo de prova. A Figura 12 (c) mostra os *dimples* e microtrincas na região de ruptura, mostrados pelas setas.

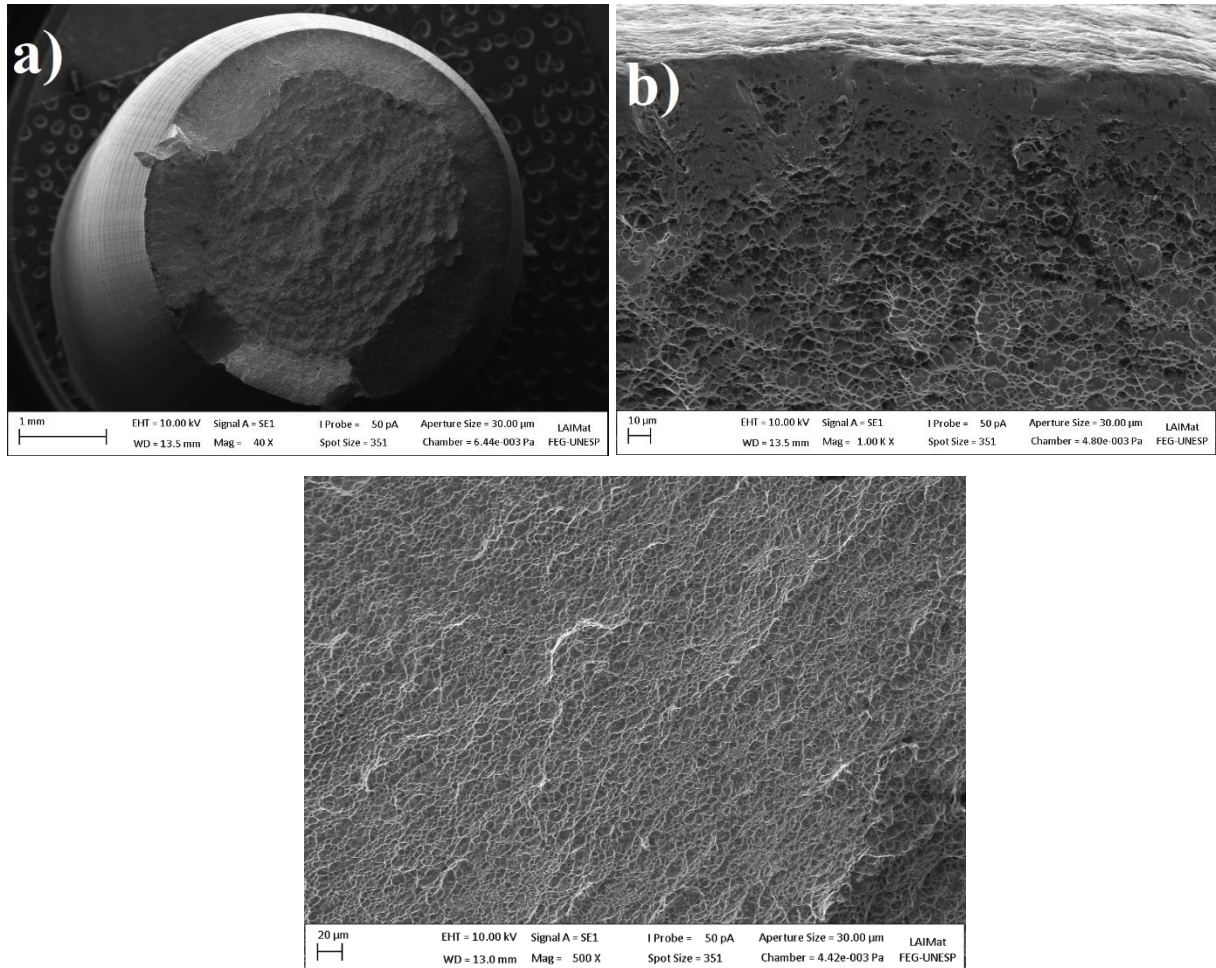
Figura 12 - MEV da liga Ti-6Al-4V submetida a 1000 MPa com R=0,5: (a) regiões I, II e III; (b) concentrador de tensão encontrado na região I; (c) presença de *dimples* na região II



Fonte: Autor

A fratura para o corpo de prova ensaiado em $R = 0,8$ pode ser observado na Figura 13. A Figura 13 (a) mostra que o tipo de fratura que ocorreu também foi taça-cone. O ponto de nucleação das trincas é mostrado na Figura 13 (b) e a Figura 13 (c) é uma ampliação da área de ruptura, mostrando os *dimples*.

Figura 13 - MEV da liga Ti-6Al-4V submetida a 1000 MPa com R=0,8: (a) regiões I, II e III; (b) concentrador de tensão encontrado na região I; (c) presença de dimples na região II

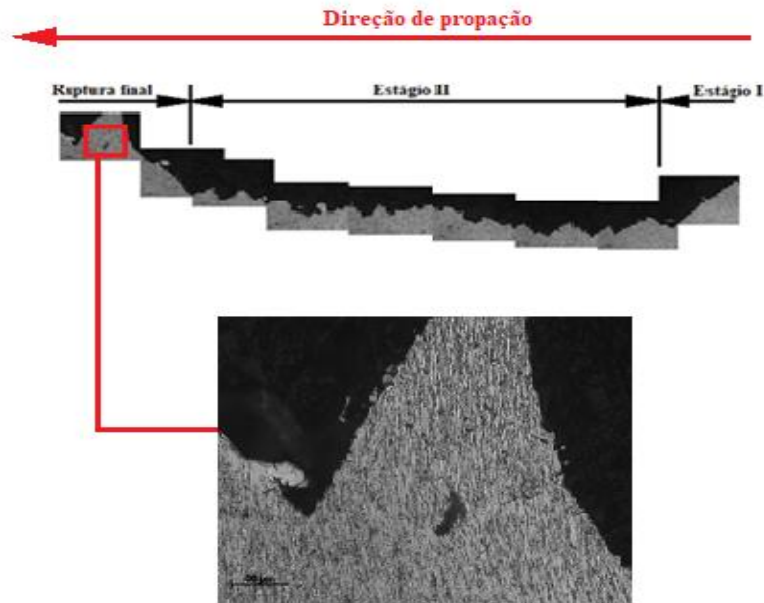


Fonte: Autor

As fractografias mostraram que para razões de carga maiores, como R=0,5 e R=0,8, o tipo de fratura que ocorreu foi do tipo taça-cone.

Também foram realizadas fractografias na seção transversal da fratura, como mostrado nas Figuras 14, 15 e 16, de corpos de prova submetidos à tensão de 1050 MPa, para R=0,1, R=0,5 e R=0,8. O local mostrado pelo quadrado vermelho na Figura 14 foi ampliado e mostra uma microcavidade formada na região da ruptura final.

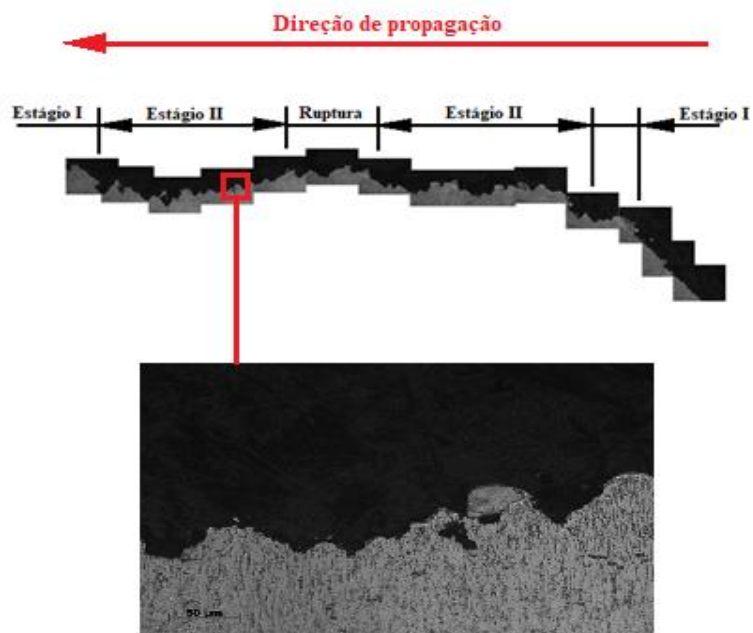
Figura 14 – Seção transversal da fratura do corpo de prova ensaiado com $R=0,1$



Fonte: Autor

A parte que foi ampliada na Figura 15 também mostra a existência de uma microvoidade na região do estágio II, que pode ter atuado como um concentrador de tensão.

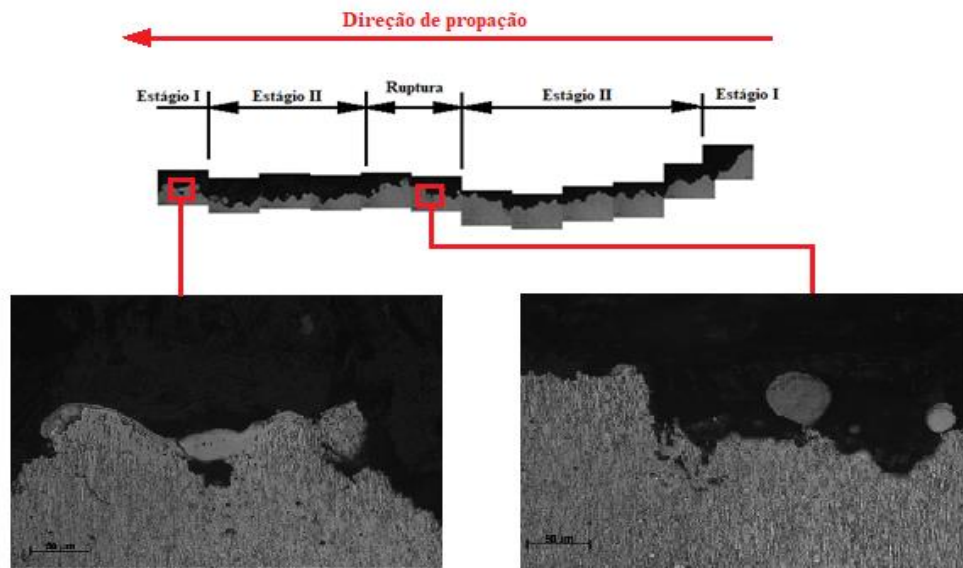
Figura 15 - Seção transversal da fratura do corpo de prova ensaiado com $R=0,5$



Fonte: Autor

Na Figura 16 foram encontrados dois locais onde ocorreu a formação de microcavidades: o primeiro que foi formado na região do estágio I e que pode ter atuado como concentrador de tensão e o segundo que foi encontrado na região de ruptura, porém é menor se comparado com o primeiro.

Figura 16 - Seção transversal da fratura do corpo de prova ensaiado com $R=0,8$



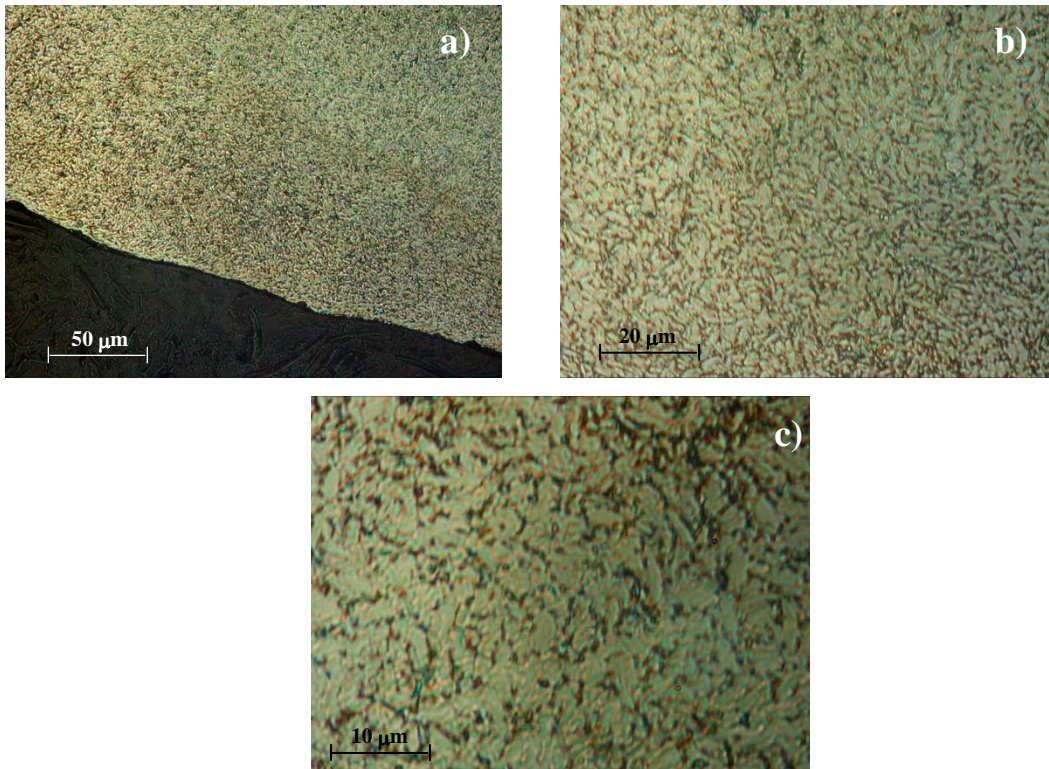
Fonte: Autor

2.4.2 Liga Ti-6Al-4V tratada com 3IP+SP

2.4.2.1 Microscopia óptica

A Figura 17 mostra a microestrutura do material tratado com 3IP seguido de *shot peening* por meio de imagens obtidas via microscópio óptico, com diferentes ampliações. Nota-se a presença da fase β (mais escura) e da fase α (mais clara).

Figura 17 – (a) ampliação de 200X, (b) ampliação de 500X, (c) ampliação de 1000X

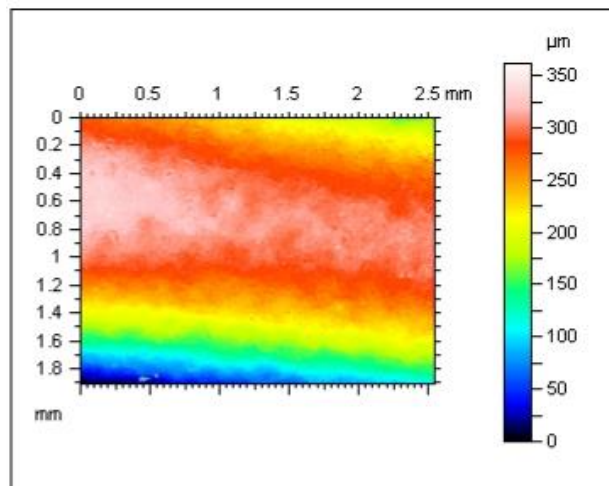


Fonte: Autor

2.4.2.2 Perfilometria

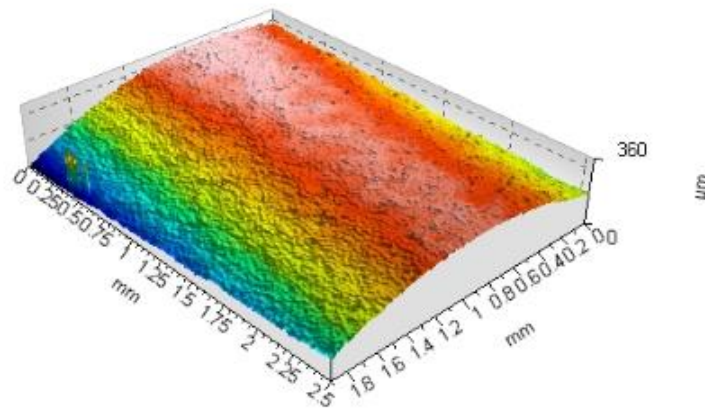
A perfilometria óptica realizada no corpo de prova tratado com 3IP + *shot peening* é mostrada nas Figuras 18 e 19:

Figura 18 - Perfil de rugosidade em 2D do corpo de prova tratado com 3IP + SP



Fonte: Autor

Figura 19 - Topografia do corpo de prova tratado com 3IP + SP



Fonte: Autor

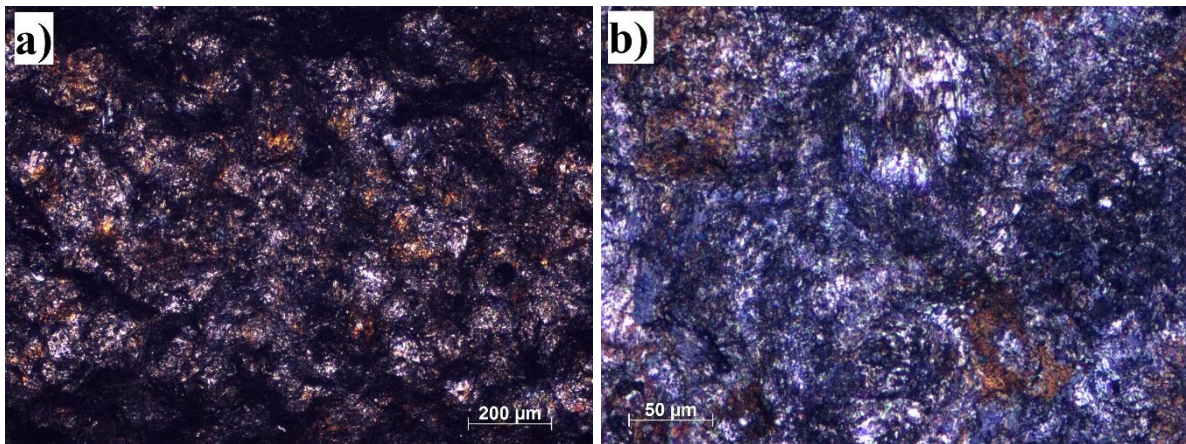
A rugosidade média obtida através da perfilometria foi $R_a = 2,90 \mu\text{m}$, sendo o aumento na rugosidade média da liga sem tratamento e tratada com 3IP + *shot peening* de aproximadamente 181%; esse aumento na rugosidade média ocorreu devido ao tratamento superficial de *shot peening*. Em outro trabalho realizado pelo Grupo de Pesquisa de Fadiga e Materiais Aeronáuticos da UNESP/FEG com a liga Ti-6Al-4V, ao realizar o tratamento superficial de *shot peening* utilizou intensidade de 0,41 – 0,49 A, com esfera S230. Esses são os mesmos parâmetros utilizados no primeiro jateamento deste trabalho.

No estudo pelo grupo, a rugosidade média obtida foi $R_a = 5,88 \mu\text{m}$, valor maior que o obtido neste trabalho. Essa diferença das rugosidades é devido ao duplo jateamento adotado neste trabalho, pois o segundo jateamento foi feito com menor intensidade Almen e esferas com menor diâmetro, fazendo com que a rugosidade obtida fosse menor que a do estudo do grupo. Ao realizar o tratamento de *shot peening*, é preferível que a menor rugosidade possível seja obtida, pois altas rugosidades podem causar diminuição na resistência à fadiga do material.

2.4.2.3 Imagens em campo claro e escuro

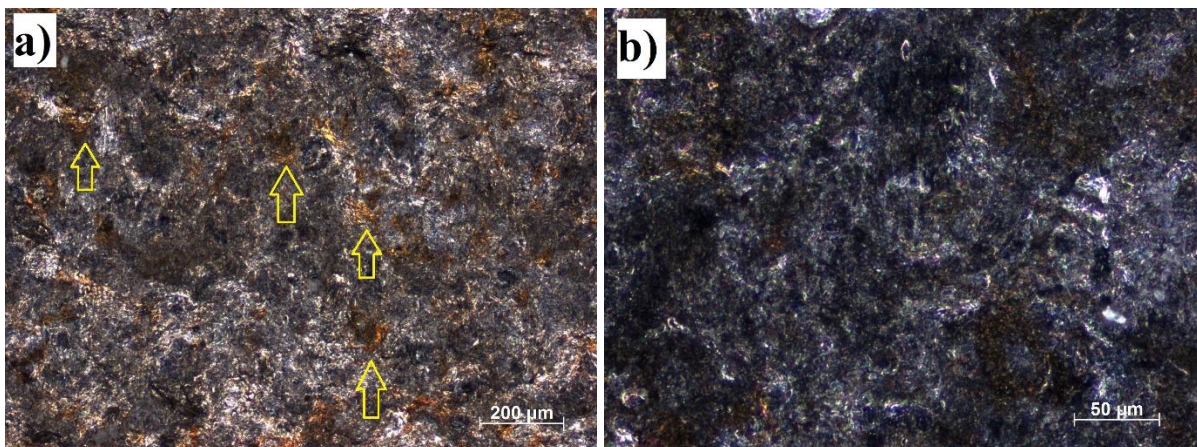
As Figuras 20 e 21 apresentam a microscopia óptica nas ampliações de 500X e 2000X, em campo claro e escuro.

Figura 20 - Amostra tratada com 3IP + SP em campo claro: (a) ampliação de 500X, (b) ampliação de 2000X



Fonte: Autor

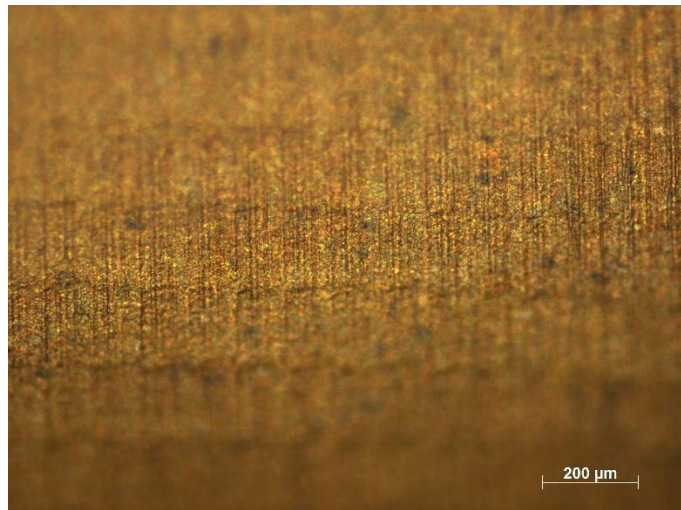
Figura 21 - Amostra tratada com 3IP + SP em campo escuro: (a) ampliação de 500X, (b) ampliação de 2000X



Fonte: Autor

As setas da Figura 21 indicam pontos concentrados de nitretos de titânio, que tipicamente possuem a cor amarelada. Como o tratamento de 3IP foi realizado em uma temperatura relativamente baixa (390 °C), não ocorreu a formação de uma película de nitretos, mas sim a formação heterogênea desses nitretos que estão espalhados por toda a amostra. A Figura 22 mostra a microscopia com ampliação de 500X de uma mostra da liga Ti-6Al-4V tratada com 3IP, porém à uma temperatura de 800 °C:

Figura 22 - Amostra tratada com 3IP à 800 °C em campo escuro com ampliação de 500X



Fonte: Velloso (2018)

A Figura 22 foi obtida em um estudo realizado por Velloso *et al.* (2018), é possível perceber a predominância da cor amarela, que representa os nitretos de titânio. Quanto maior a temperatura utilizada no tratamento de 3IP, maior é a reatividade do nitrogênio com o titânio e, assim, maior a velocidade de reação entre nitrogênio e titânio e mais rapidamente se forma o revestimento protetor.

Apesar de não ter sido formado um filme por toda a amostra, como mostrado na Figura 21 (a), a formação de nitretos em alguns pontos da superfície também pode ser vantajoso, pois pode oferecer resistência aos deslizamentos de discordâncias antes do processo de nucleação.

Também é possível perceber a presença de vales nas Figuras 20 e 21, que foram formados devido ao tratamento de *shot peening*.

2.4.2.4 Ensaio de fadiga por flexão rotativa

A Tabela 6 mostra as tensões utilizadas no ensaio de fadiga por flexão rotativa e os números de ciclos para a amostra tratada por 3IP + SP.

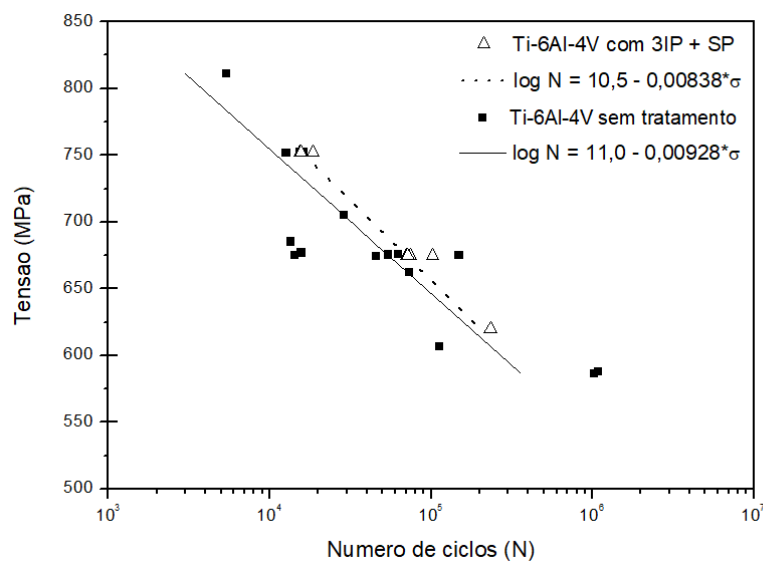
Tabela 6 - Tensões e ciclos para Ti-6Al-4V tratado com 3IP+SP

Ti-6Al-4V TRATADO COM 3IP+SP		
nº ensaio	Tensão aplicada (MPa)	Número de ciclos
1	752	15.427
2	752	18.578
3	752	15.598
4	675	101.873
5	675	70.797
6	675	74.481
7	675	71.833
8	620	233.595
9	620	178.207

Fonte: Autor

Foi realizado um ajuste dos valores através do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) no *software* MiniTab. A Figura 23 mostra as curvas obtidas pelo MMQ para o corpo de prova com 3IP + SP e sem tratamento, além de apresentar os pontos experimentais:

Figura 23 - Gráfico tensão x número de ciclos da liga Ti-6Al-4V tratada com 3IP + SP



Fonte: Autor

Comparando os ensaios de fadiga por flexão rotativa realizados na liga Ti-6Al-4V sem tratamento e os ensaios realizados na liga com 3IP+SP, é possível notar um pequeno aumento

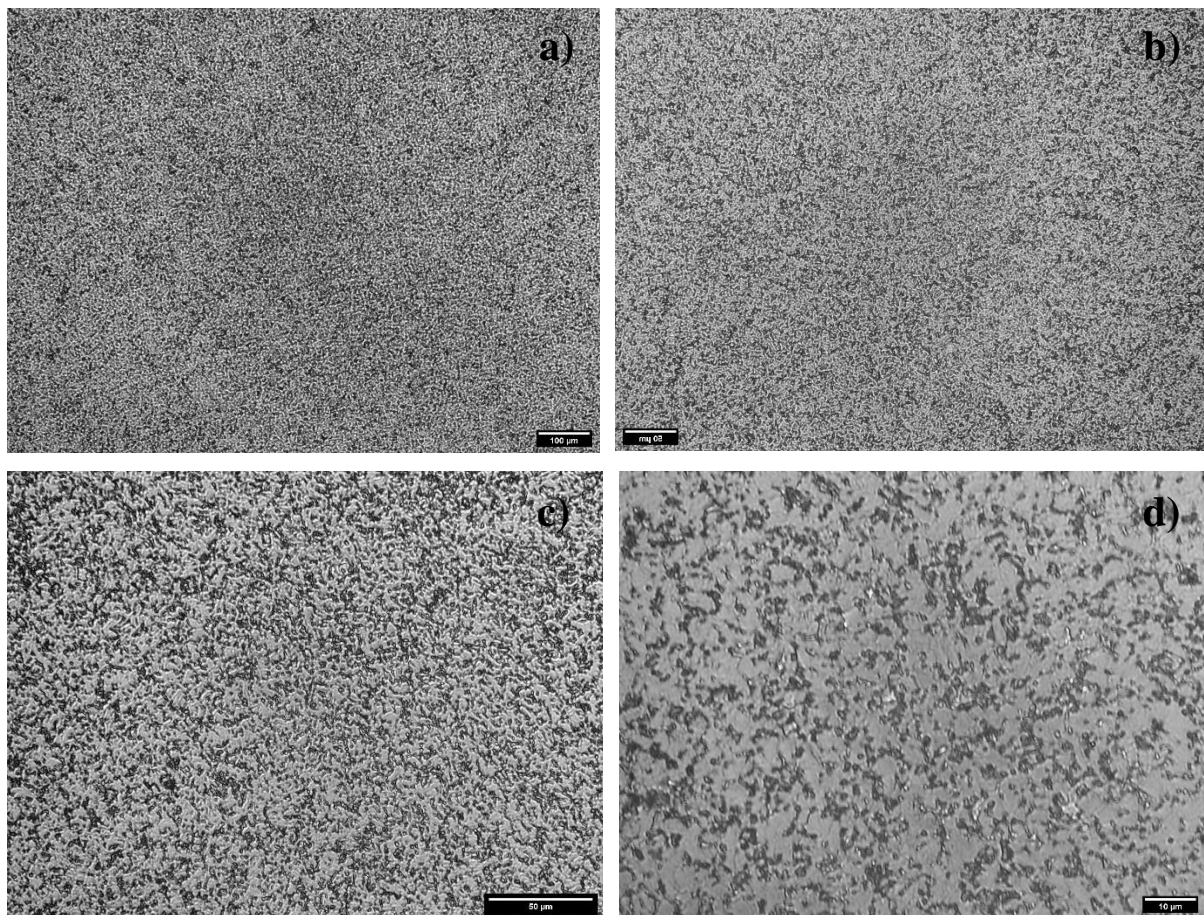
na resistência à fadiga. Para a tensão de 752 MPa, por exemplo, o aumento percentual foi de 18%; para 675 MPa o aumento foi de 74%. No geral, ocorreu um aumento da resistência do material.

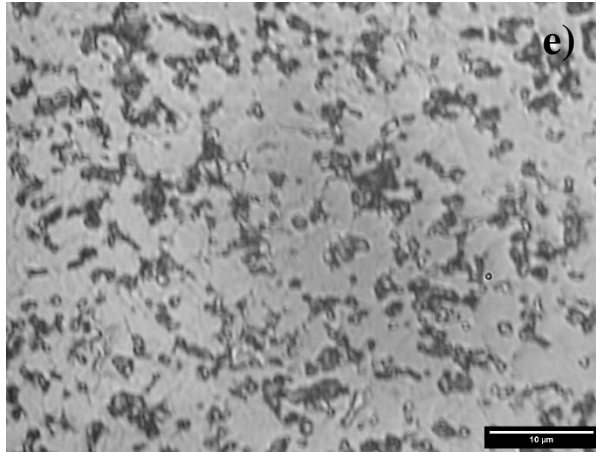
2.4.3 Liga Ti-6Al-4V tratada com SP+3IP

2.4.3.1 Microscopia óptica

A Figura 24 mostra a microestrutura do material tratado com *shot peening* seguido de 3IP por meio de imagens obtidas via microscópio óptico, com diferentes ampliações. Nota-se a presença da fase β (mais escura) e da fase α (mais clara).

Figura 24 – (a) ampliação de 50X, (b) ampliação de 100X, (c) ampliação de 200X, (d) ampliação de 500X, (e) ampliação de 1000X





Fonte: Autor

2.4.3.2 Ensaio de fadiga por flexão rotativa

A Tabela 7 mostra as tensões utilizadas no ensaio de fadiga por flexão rotativa e os números de ciclos para a amostra tratada por SP + 3IP:

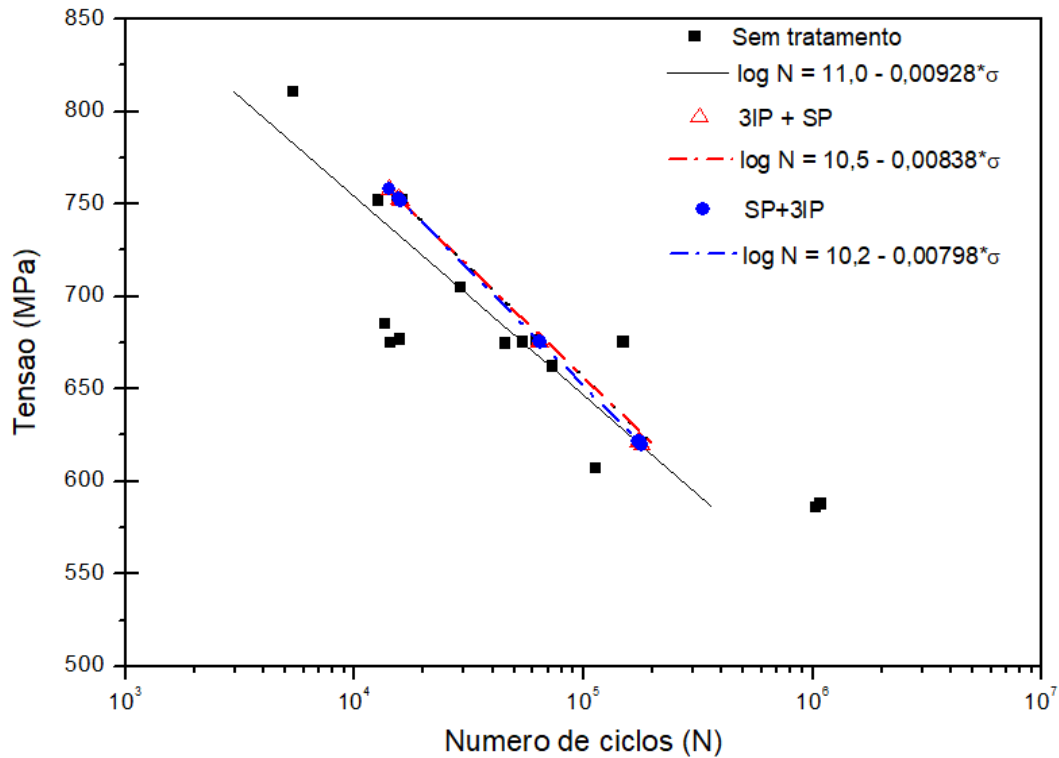
Tabela 7 - Tensões e ciclos para Ti-6Al-4V tratado com SP + 3IP

Ti-6Al-4V TRATADO COM SP + 3IP		
n° ensaio	Tensão aplicada (MPa)	Número de ciclos
1	752	24.862
2	752	19.524
3	752	8.941
4	675	49.943
5	675	50.144
6	675	50.042
7	620	485.564
8	620	323.893

Fonte: Autor

A Figura 25 mostra as curvas obtidas pelo MMQ para o corpo de prova com SP + 3IP, 3IP + SP e sem tratamento, além de apresentar os pontos experimentais:

Figura 25 - Gráfico tensão x ciclos para todas as condições do estudo



Fonte: Autor

A Figura 25 mostra que a liga tratada apresentou uma resistência à fadiga maior que a liga não tratada, tanto para a condição 3IP+SP quanto para a condição SP+3IP. Pela Figura 25 é possível ver que a inversão dos tratamentos superficiais não causou grandes mudanças na vida em fadiga, já que as duas curvas estão bem próximas e quase se sobrepõem. Com esses resultados fica evidente que a combinação dos tratamentos resultou no aumento da vida em fadiga da liga e, portanto, o tratamento por 3IP não causou queda na resistência à fadiga como em outros trabalhos.

2.4.4 Análise estatística

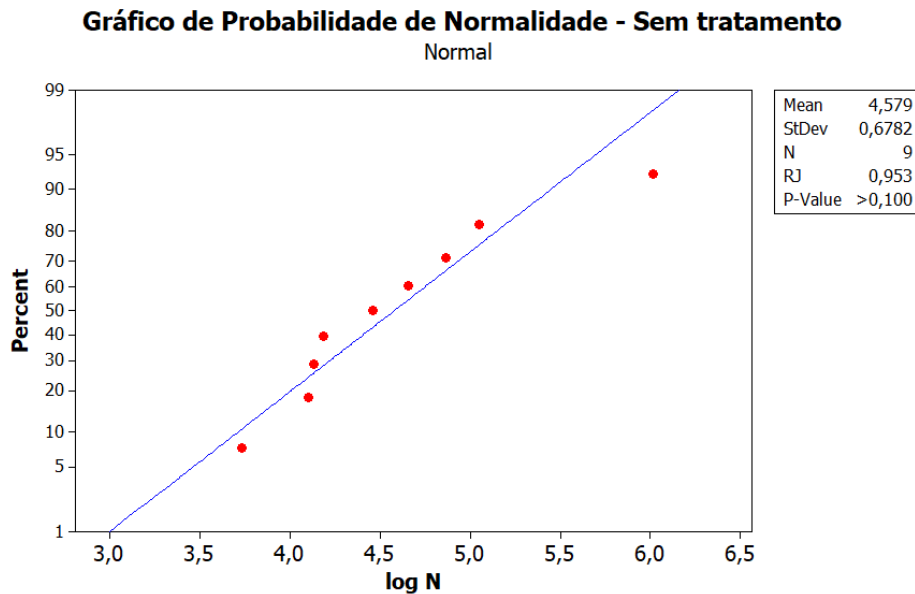
2.4.4.1 Modelos de regressão

Os modelos de regressão mostram a confiabilidade dos resultados de fadiga obtidos nesse trabalho. O teste de normalidade de Ryan-Joiner é baseado em regressão e correlação e avalia a normalidade dos dados de fadiga experimentais através do cálculo da correlação e as contagens normais de seus dados. Quanto mais próximo o parâmetro de Ryan-Joiner

estiver de 1,0 a população tende a ser normal e, portanto, os dados obtidos experimentalmente podem ser considerados dentro da normalidade.

A metodologia de Ryan-Joiner foi utilizada com nível de confiança de 95%. Abaixo está a Figura 26, que mostra os resultados para o material sem tratamento:

Figura 26 – Teste de normalidade para a liga sem tratamento

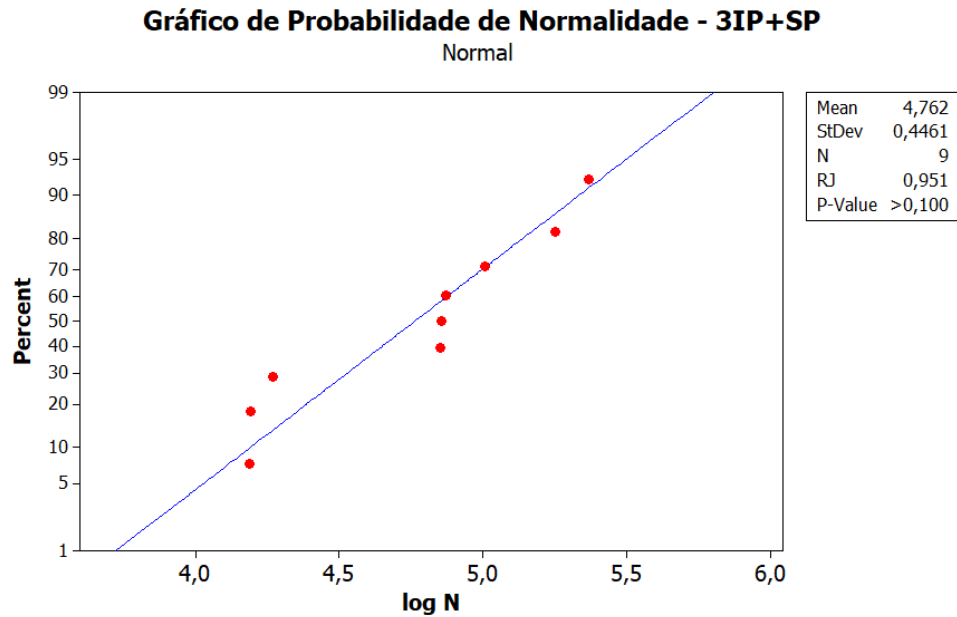


Fonte: Autor

O gráfico mostra que o parâmetro de Ryan-Joiner obtido foi de 0,953, mostrando que os dados apresentados estão próximos da normalidade. Pela Figura 26 também é possível ver que os dados de vida em fadiga obtidos experimentalmente estão próximos da linha de ocorrência de probabilidade, indicando uma distribuição normal dos dados e provando que os dados de vida em fadiga estão dentro da normalidade.

A Figura 27 mostra o gráfico de probabilidade de normalidade para a liga tratada com 3IP+SP.

Figura 27 – Teste de normalidade para a liga tratada com 3IP+SP

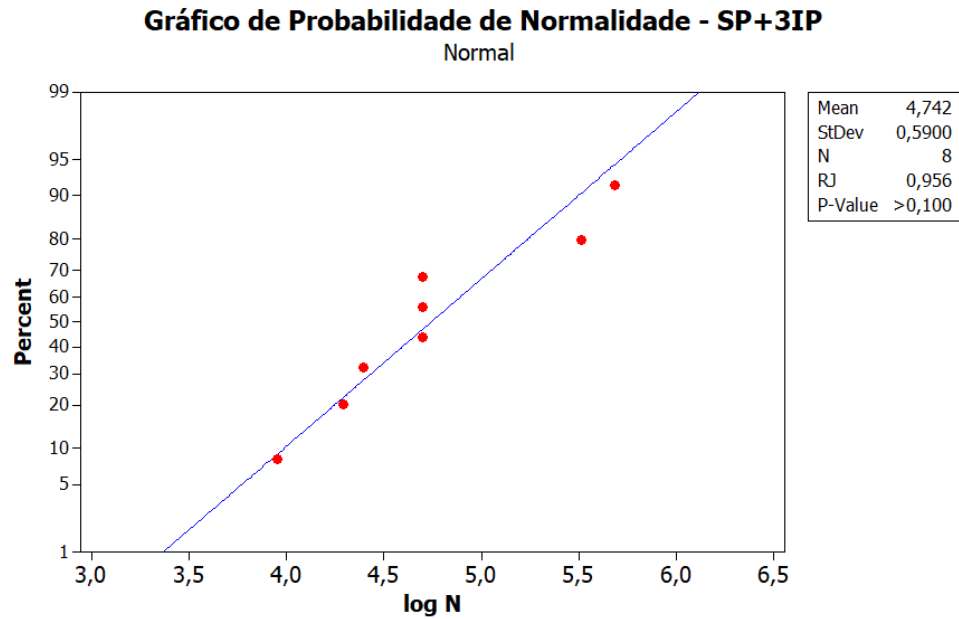


Fonte: Autor

O parâmetro de Ryan-Joiner foi de 0,951 mostrando normalidade dos dados, assim como também pode ser observado na Figura 27, em que os dados de vida em fadiga encontram-se próximos a linha de ocorrência de probabilidade.

Para a última condição de estudo, está apresentada na Figura 28 o gráfico de probabilidade de normalidade da liga tratada com SP+3IP. O parâmetro de Ryan-Joiner foi de 0,956 e os dados de vida em fadiga também se encontram próximos à linha de ocorrência de probabilidade, mostrando que os dados para esta condição de estudo também estão dentro da normalidade.

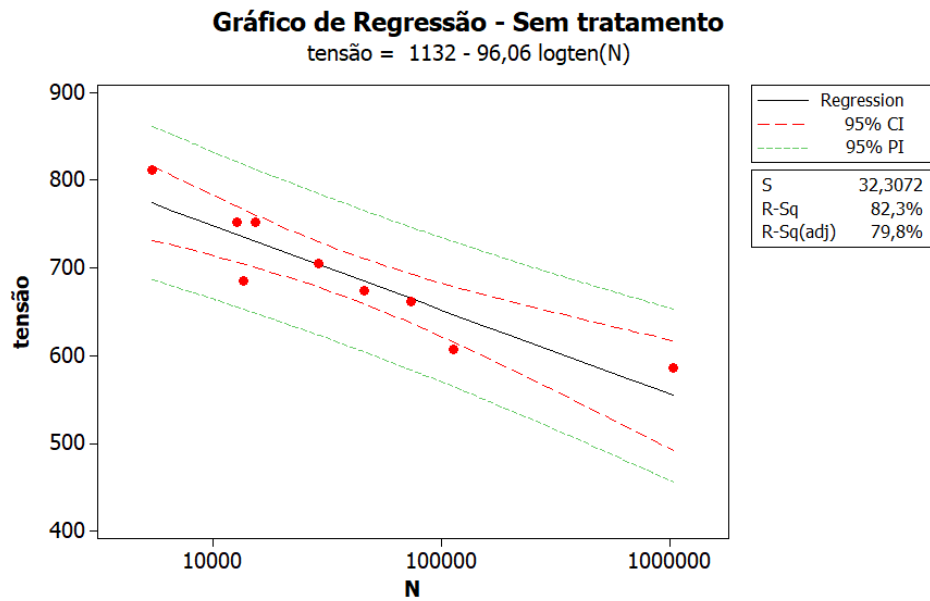
Figura 28 – Teste de normalidade para a liga tratada com SP+3IP



Fonte: Autor

Os gráficos de regressão linear foram realizados de acordo com a norma ASTM E739, plotando uma curva de tensão por número de ciclos com os dados experimentais. A Figura 29 mostra o gráfico de regressão para a liga sem tratamento. A curva preta mostra a linha de regressão dos dados experimentais; as curvas pontilhadas em vermelho mostram o intervalo em que a linha de regressão poderia estar; e as curvas pontilhadas em verde mostram o intervalo em que os pontos poderiam estar.

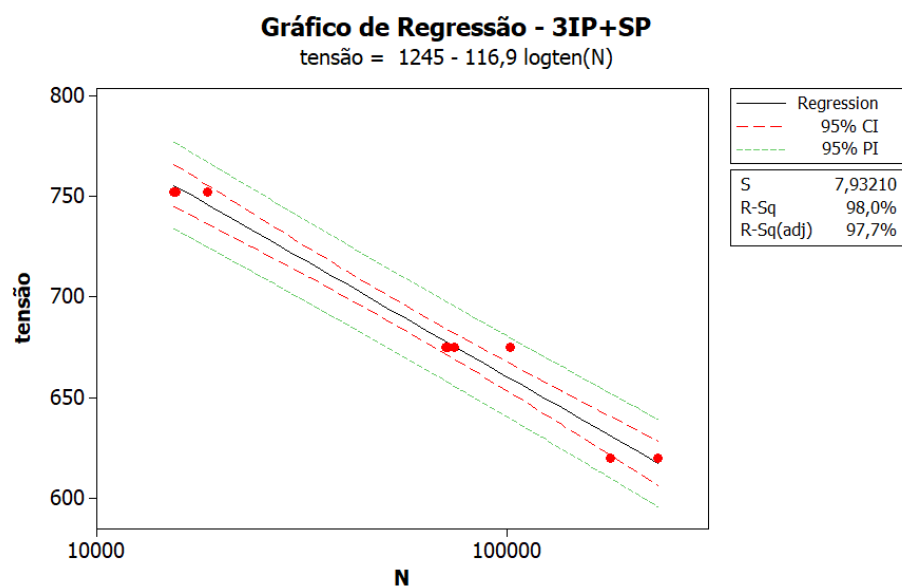
Figura 29 – Regressão linear da liga sem tratamento



Fonte: Autor

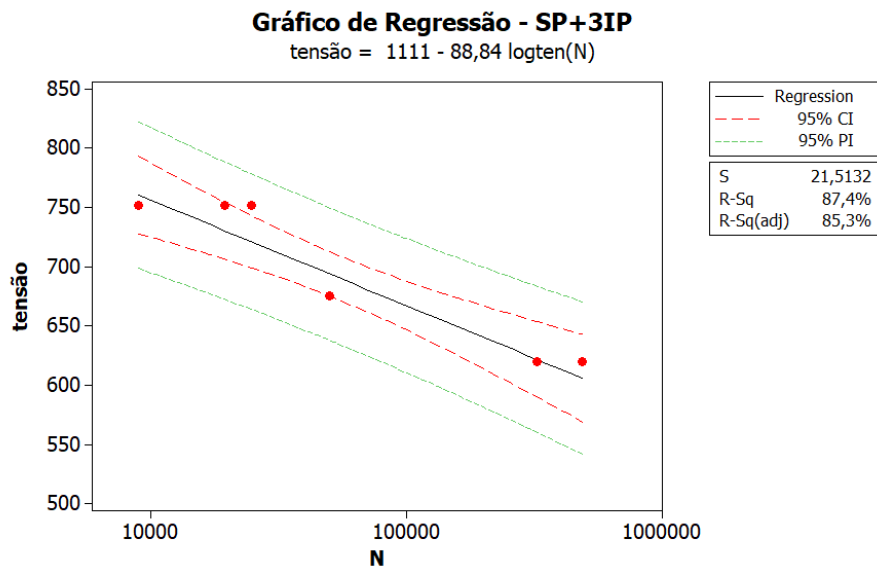
As Figuras 30 e 31 mostram os gráficos de regressão linear para a liga tratada com 3IP+SP e SP+3IP, respectivamente. Ambos os gráficos mostram as mesmas linhas da Figura 29 e mostram que tanto a curva de regressão como os dados experimentais estão entre as curvas pontilhadas em vermelho e verde.

Figura 30 – Regressão linear da liga tratada com 3IP+SP



Fonte: Autor

Figura 31 – Regressão linear da liga tratada com SP+3IP



Fonte: Autor

2.4.4.2 Análise de Weibull

A distribuição de Weibull mostra a probabilidade de falha do material para um certo número de ciclos em determinada tensão. A distribuição de Weibull foi realizada com as confiabilidades de 50%, 70% e 90%, para as tensões de 752 MPa e 625 MPa da liga tratada. A Tabela 8 mostra os resultados obtidos através da análise:

Tabela 8 – Análise de Weibull para a liga Ti-6Al-4V tratada

Confiabilidade	Número de ciclos			
	752 MPa		675 MPa	
	3IP+SP	SP+3IP	3IP+SP	SP+3IP
50%	16667	17194	80730	50053
70%	15320	11812	69960	49983
90%	13123	5931	53791	49856

Fonte: Autor

A Tabela 8 mostra que para a tensão de 752 MPa, a liga tratada com 3IP+SP e SP+3IP suporta números de ciclos próximos para as três confiabilidades, mostrando que a inversão dos tratamentos não causa grandes mudanças na vida em fadiga. Já para a tensão de 675 MPa, é possível ver que a liga tratada com 3IP+SP suporta um número de ciclos maior do que a liga tratada com SP+3IP para as confiabilidades de 50% e 70%, mostrando que na região de alto ciclo a liga com 3IP+SP tem probabilidade de apresentar um desempenho melhor em

relação a vida em fadiga. Uma hipótese pode ser levantada para explicar esses resultados: na condição SP+3IP, a temperatura do tratamento do 3IP pode ter aliviado as tensões compressivas do tratamento de SP, fazendo com que a condição 3IP+SP apresentasse um desempenho melhor para as confiabilidades de 50% e 70%. Como sugestão, a ordem dos tratamentos 3IP+SP é recomendada por este trabalho devido à essas análises.

3 CONCLUSÃO

- Ocorreu aumento na resistência à fadiga do material tratado pela combinação de tratamentos 3IP+SP e SP+3IP.

- A baixa temperatura (390 °C) utilizada no tratamento superficial de 3IP fez com que se formassem nitretos de forma heterogênea e não uma película uniforme por toda a amostra. Como foi discutido anteriormente, esses pontos de nitretos concentrados em algumas regiões ajudaram a aumentar a resistência do material, ao impedir que as discordâncias caminhassem pelo material.

- O tratamento de 3IP não diminui a vida em fadiga do material, como já ocorreu em alguns estudos que utilizaram esse tratamento. Portanto, a baixa temperatura do 3IP ajudou a aumentar a resistência, tanto na condição de 3IP+SP quanto na condição SP+3IP.

- A realização do duplo jateamento (*dual peening*) resultou em uma rugosidade menor quando comparada com outros trabalhos que utilizaram um único jateamento no tratamento de *shot peening*, fator que também pode ter contribuído para o aumento na vida em fadiga.

- A realização do tratamento por 3IP combinado ao SP tem o potencial de melhorar as suas propriedades tribológicas sem reduzir a resistência à fadiga do material.

- De acordo com os resultados obtidos com o ensaio de fadiga por flexão rotativa, a inversão da ordem dos tratamentos superficiais não causou grande mudança na resistência à fadiga.

- Ao ser submetido a ensaios de fadiga por flexão rotativa, a liga sem tratamento suporta uma tensão menor do que quando submetida a ensaios de fadiga axial. Isso ocorre devido a severidade do ensaio de fadiga por flexão rotativa.

- A vida em fadiga aumenta com o aumento da razão de carga. Quanto maior a razão de carga, maior a tendência em ocorrer uma fratura do tipo taça cone. Para baixas razões de carga, é possível identificar um sítio de nucleação principal, já para altas razões de carga, existem vários sítios de nucleação das trincas.

REFERÊNCIAS

BARRIUSO, S. *et al.* Fatigue behavior of Ti6Al4V and 316 LVM blasted with ceramic particles of interest for medical devices. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, Madrid, v. 30, p. 30-40, fev. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2013.10.013>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1751616113003408>. Acesso em: 23 fev. 2021.

BERTUOL, K. **Análise da influência de parâmetros de *shot peening* na dureza superficial, rugosidade e tensão residual em aço ASTM A743-CA6NM**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2014. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/16371>. Acesso em: 23 fev. 2021.

BHUVARAGHAN, B.; SRINIVASA, S. M.; MAFFEO, B. Optimization of the fatigue strength of materials due to shot peening: A Survey. **International Journal of Structural Changes in Solids**, Bangalore, n. 2, v. 2, p. 33-63, nov. 2010. Disponível em: <https://journals.tdl.org/ijscs/index.php/ijscs/article/view/2338>. Acesso em: 23 fev. 2021.

BONORA, R. G. *et al.* Fatigue in AISI 4340 steel thermal spray coating by HVOF for aeronautic application. **Procedia Engineering**, Guaratinguetá, v. 2, p. 1617-1623, abr. 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581000175X>. Acesso em: 23 fev. 2021.

BRANCO, C. M.; FERNANDES, A. A.; CASTRO, P. M. T. **Fadiga de estruturas soldadas**. 2. ed. Lisboa: Calouste Gulbenkian, 1999. 902p.

BRITTO, C. E. S. **Influência da orientação de prototipagem no comportamento mecânico da liga Ti-6Al-4V produzida por sinterização direta de metal por laser (DMLS)**. 2015. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/145475>. Acesso em: 23 fev. 2021.

CALLISTER JÚNIOR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 844p.

CLAROS, C.A.E. **Estudo da resistência à fadiga da liga Ti6Al4V com superfície modificada por tratamento químico**. 2016. 83f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/8016>. Acesso em: 23 fev. 2021.

CORDEIRO, L. C.; COSTA, M. V. M. **Estudo da metodologia para estimativa do limite de resistência a fadiga usando técnicas de Monte Carlo**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2011. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/14994>. Acesso em: 23 fev. 2021.

GALLITELLI, D. *et al.* Simulation of shot peening: from process parameters to residual stress fields in a structure. **Comptes Rendus Mecanique**, Troyes, v. 344, p. 355-374, abr. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631072116000279>. Acesso em: 23 fev. 2021.

KOUKETSU, F. **Efeito dos parâmetros de shot peening no perfil de tensões residuais de um ferro fundido nodular temperado**. 2017. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Disponível em <http://riut.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/10572>. Acesso em: 23 fev. 2021.

LEYENS, C.; PETERS, M. **Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications**. Koln: Weinheim Wiley-VHC, 2003. 532p.

LIMA, G. D. **Influência da duração da oxidação térmica no comportamento à fadiga da liga Ti-6Al-4V**. 2019. 67 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2019. Disponível em <https://ri.ufs.br/handle/riufs/10596>. Acesso em: 23 fev. 2021.

MOURA, R. R. **Usinagem da liga Ti6Al4V com aplicação de lubrificantes sólidos no torneamento**. 2017. 131 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. Disponível em <http://repositorio.ufu.br/handle/123456789/18968>. Acesso em: 23 fev. 2021.

NASCIMENTO, M.P.; VOORWALD, H.J.C. Considerations on corrosion and weld repair effects on the fatigue strength of a steel structure critical to the flight-safety. **International Journal of Fatigue**, Guaratinguetá, v. 32, p. 1200-1209, jul. 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142112310000034>. Acesso em: 23 fev. 2021.

OLIVEIRA, A. C. *et al.* Cordões de solda de Nióbio tratados termicamente via implantação Iônica por Imersão em Plasma. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, [s.l.], n. 1, v. 14, p. 61-68, 2017. Disponível em: <https://tecnologiamm.com.br/doi/10.4322/2176-1523.1057>. Acesso em: 23 fev. 2021.

OLIVEIRA, V.M.C.A. *et al.* Plasma immersion ion implantation (PIII) influence on Ti-6Al-4V alloy: Frequency effect. **International Journal of Fatigue**, Guaratinguetá, v. 109, p. 157-165, abr. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142112317304632>. Acesso em: 23 fev. 2021.

OLIVEIRA, V.M.C.A. *et al.* Short-term creep properties of Ti-6Al-4V alloy subjected to surface plasma carburizing process. **Journal of Materials Research and Technology**, Lorena, v. 4, p. 359–366, out. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785415000782>. Acesso em: 23 fev. 2021.

OLIVEIRA, V.M.C.A. *et al.* Nitride coatings improve Ti-6Al-4V alloy behavior in creep tests. **Materials Science & Engineering A**, Lorena, v. 670, p. 357–368, jul. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509316306980>. Acesso em: 23 fev. 2021.

PASTOREK, F. *et al.* Influence of anodic oxidation on the polarization resistance of Ti6Al4V alloy after shot peening. **Materials Science Forum**, Žilina, v. 811, p. 59-62, dez. 2014. Disponível em: <https://www.scientific.net/MSF.811.59>. Acesso em: 23 fev. 2021.

SCURACCHIO, B. G. **Tensões residuais induzidas por Shot Peening e durabilidade de molas em lâmina**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-14032013-171049/en.php>. Acesso em: 23 fev. 2021.

SHIGLEY, J.E.; MISCHKE, C.R.; BUDYNAS, R.G. **Projeto de engenharia mecânica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 960p.

SILVA, M. M. *et al.* Surface modification of Ti6Al4V alloy by PIII at high temperatures: effects of plasma potential. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, São José dos Campos, v. 257, p. 722-726, abr. 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168583X07001280>. Acesso em: 23 fev. 2021.

SILVA, S. P. D. *et al.* Análise de tensão e fadiga axial do aço ABNT 4140 utilizando o método de elementos finitos. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 9., 2017, Joinville. **Anais [...]**. Santa Catarina: Cobef, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Sinval-Da-Silva/publication/319996251_ANALISE_DE_TENSAO_E_FADIGA_AXIAL_DO_ACO_ABNT_4140_UTILIZANDO_O_METODO_DE_ELEMENTOS_FINITOS/links/5a4d372e458515a6bc6dd412/ANALISE-DE-TENSAO-E-FADIGA-AXIAL-DO-ACO-ABNT-4140-UTILIZANDO-O-METODO-DE-ELEMENTOS-FINITOS.pdf. Acesso em: 23 fev. 2021.

TORRES, M. A. S. **Uma avaliação do efeito do shot peening na vida em fadiga do aço ABNT 4340 com e sem revestimento de cromo duro**. 2002. 223 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2002.

TORRES, M.A.S.; VOORWALD, H.J.C. An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel. **International Journal of Fatigue**, Guaratinguetá, v. 24, p. 877-886, ago. 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142112301002055>. Acesso em: 23 fev. 2021.

VELLOSO, V. *et al.* Fatigue behavior of Ti-6Al-4V alloy modified by plasma immersion ion implantation: temperature effect. **MATEC Web Conference**, Guaratinguetá, v. 165, p. 6, 2018. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/176410>. Acesso em: 23 fev. 2021.

VOORWALD, H.J.C. *et al.* Effect of electroless nickel interlayer on the fatigue strength of chromium electroplated AISI 4340 steel. **International Journal of Fatigue**, Guaratinguetá, n. 4, v. 29, p. 695-704, abr. 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142112306002039>. Acesso em: 23 fev. 2021.

XU, T. W. *et al.* Cold deformation behavior of the Ti-15Mo-3Al-2.7Nb-0.2Si alloy and its effect on α precipitation and tensile properties in aging treatment. **Journal of Alloys and Compounds**, Xi'an, v. 682, p. 404-411, out. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838816312804>. Acesso em: 23 fev. 2021.

YANG, Q. *et al.* Investigation on the fretting fatigue behaviors of Ti-6Al-4V dovetail joint specimens treated with shot peening. **Wear**, Dalian, v. 372-373, p. 81-90, fev. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.12.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164816307372>. Acesso em: 23 fev. 2021.

YU, S. *et al.* Effects of combined plasma chromizing and shot peening on the fatigue properties of a Ti-6Al-4V alloy. **Applied Surface Science**, Xi'an, v. 353, p. 995-1002, out. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169433215016037>. Acesso em: 23 fev. 2021.

ZEPKA, S. *et al.* Efeito do tratamento de implantação iônica por imersão em plasma na resistência ao desgaste da liga Ti-6Al-4V. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São José dos Campos, n. 2, v.12, p. 97-101, 2015. Disponível em: <https://tecnologiamm.com.br/doi/10.4322/2176-1523.0674>. Acesso em: 23 fev. 2021.