



WILIAM TEAN SU

# **Manufatura aditiva da liga Ti-6Al-4V aplicada em uma biela automotiva**

84/2013

CAMPINAS  
2013



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**WILIAM TEAN SU**


# **Manufatura aditiva da liga Ti-6Al-4V aplicada em uma biela automotiva**

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia

Coorientadora: Dr<sup>a</sup>. Maria Aparecida Larosa

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Materiais e Processos de Fabricação.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO  
FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO  
ALUNO WILIAM TEAN SU, E ORIENTADA PELA  
PROF<sup>a</sup>. DR<sup>a</sup>. CECÍLIA AMÉLIA DE CARVALHO ZAVAGLIA

  
.....  
ASSINATURA DA ORIENTADORA

**CAMPINAS  
2013**

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

Su, Wiliam Tean  
Su1m      Manufatura aditiva da liga Ti-6Al-4V aplicada em uma biela automotiva / Wiliam Tean Su. – Campinas, SP: [s.n.], 2013.

Orientador: Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia.  
Coorientador: Maria Aparecida Larosa.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Manufatura aditiva. 2. Ligas de titânio. 3. Método dos elementos finitos. I. Zavaglia, Cecília Amélia de Carvalho, 1954-. II. Larosa, Maria Aparecida. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Additive manufacturing of the Ti-6Al-4V alloy applied to an automotive connecting rod

**Palavras-chave em inglês:**

Additive manufacturing

Titanium alloys

Finite element method

**Área de concentração:** Materiais e Processos de Fabricação

**Titulação:** Mestre em Engenharia Mecânica

**Banca examinadora:**

Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia [Orientador]

Noé Cheung

Manoel Ribeiro da Silva

**Data de defesa:** 30-08-2013

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO**

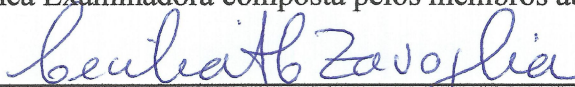
**Manufatura aditiva da liga Ti-6Al-4V aplicada  
em uma biela automotiva**

Autor: Wiliam Tean Su

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia

Coorientadora: Dr<sup>a</sup>. Maria Aparecida Larosa

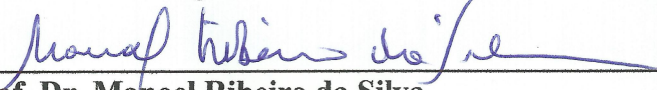
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia, Presidente  
Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas**



**Prof. Dr. Noé Cheung  
Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas**



**Prof. Dr. Manoel Ribeiro da Silva  
Instituto de Física e Química – Universidade Federal de Itajubá**

Campinas, 30 de agosto de 2013.



## **Dedicatória**

Dedico esse trabalho à minha família.

## Agradecimentos

Gostaria agradecer às seguintes pessoas, as quais contribuíram direta ou indiretamente para a realização desse trabalho:

À minha família, por sempre me apoiar nos momentos difíceis;

À minha orientadora, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia, pelo suporte e compreensão;

À minha coorientadora, Dr<sup>a</sup>. Maria Aparecida Larosa, pela imensa colaboração, ajuda, paciência e amizade durante todo o trabalho;

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Maria Clara Filippini Ierardi e ao Prof. Dr. Noé Cheung, pelas valiosas considerações no Exame de Qualificação;

Ao Instituto Biofabris, por possibilitar o uso da máquina de prototipagem e por ceder o material necessário;

Ao Dr. André Luiz Jardim Munhoz e Luiz Fernando Bernardes, pela ajuda com a prototipagem;

À Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas pelo Programa de Pós-Graduação;

À Claudenete Vieira Leal, José Luis Lisboa, Eduardo José Bernardes, Sérgio Gomes da Cruz Neto, Nelson Benedito de Sales, João Eduardo Polis, Denise Aparecida Villela, Bruna Freitas Romero e Patrícia Tibirica Gomes Guimarães, pelas grandes ajudas nos ensaios ou nas questões administrativas da FEM;

Aos amigos da Unicamp Felipe Zavaglia, Crystopher, Felipe Bertelli, Talita, Guinéa, Lonetá, pela amizade, ajuda em ensaios ou resolução de dúvidas em algum momento do trabalho e;

À Thyssenkrupp Metalúrgica Campo Limpo Ltda., que permitiu a realização deste trabalho e aos amigos e colegas de trabalho Luis Galli, Alex Rodrigues, Almir Attoate, Diogo Alves, Rafael Lima e Silva, Pedro Ferreira e Robson Cruz pela ajuda em algum momento do trabalho.

“Só existem dois dias no ano que nada pode ser feito.  
Um se chama ontem e outro se chama amanhã,  
portanto hoje é o dia certo para amar, acreditar,  
fazer e principalmente viver.”

*Dalai Lama*

## Resumo

Atualmente, o mercado automotivo tem buscado cada vez mais a redução de peso e aumento de resistência mecânica de seus componentes. Dentro deste contexto, este trabalho tem como objetivo verificar se uma biela automotiva feita da liga de titânio Ti-6Al-4V obtida pelo processo de manufatura aditiva chamado Sinterização Direta de Metais por Laser (DMLS) apresenta os mesmos resultados estruturais que uma biela de Ti-6Al-4V laminada e recozida (comercial) ou que uma biela feita de aço C70, bastante utilizada no mercado. A liga Ti-6Al-4V é utilizada principalmente nas áreas aeronáutica e biomédica, mas também possui aplicações na indústria automotiva, principalmente no segmento de alta performance, graças a fatores como boa resistência mecânica, excelente resistência à corrosão e baixa densidade. As características mecânicas e microestruturais de amostras da liga Ti-6Al-4V prototipada por DMLS e de amostras da liga Ti-6Al-4V laminada e recozida foram avaliadas e comparadas através de ensaios de tração e microdureza, de análises em microscópio óptico e eletrônico de varredura (para a verificação da microestrutura e da porosidade), de ensaios de difração de raios-X (DRX) (para a análise das fases presentes no material), da análise da composição química por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) e da análise de densidade pelo princípio de Arquimedes. Bielas de Ti-6Al-4V também foram produzidas por DMLS e ensaios de tração experimentais foram realizados, simulando uma condição de contorno típica utilizada em desenvolvimentos de bielas pela indústria automotiva. Com base nos resultados experimentais, foram realizadas análises de elementos finitos utilizando a mesma condição de contorno dos ensaios, com o intuito de se obter uma correlação entre os resultados experimentais e os virtuais. De uma maneira geral, todos os resultados indicam que a biela de Ti-6Al-4V produzida pelo processo DMLS possui um comportamento estrutural similar à biela de Ti-6Al-4V laminada e recozida.

*Palavras Chave:* Manufatura Aditiva; Ligas de Titânio; Método dos Elementos Finitos.

## **Abstract**

Nowadays, the automotive market has been looking for more and more lightweight and better strength components. In this context, the objective of this work is to verify if a connecting rod made of the titanium alloy Ti-6Al-4V produced by an additive manufacturing process named Direct Metal Laser Sintering (DMLS) would have equivalent structural results of a connecting rod made of rolled annealed Ti-6Al-4V or even the C70 steel (widely used on the market for this application). This Titanium alloy is primary used in aerospace and biomedical areas, but is also used in the automotive industry, especially on the high performance segment, due to factors like good mechanical strength, excellent corrosion resistance and low density. The mechanical and microstructural properties of Ti-6Al-4V samples obtained by DMLS and rolling and annealing processes were compared through the realization of tensile and micro hardness tests and through the microstructural characterization, composed of scanning electron microscopy (microstructure verification), optical microscopy (porosity verification), X-ray diffraction analysis for phases quantification, energy dispersive spectroscopy (chemical composition verification) and density analysis using the Arquimedes principle. Ti-6Al-4V connecting rods were also produced by the DMLS process and tensile experimental tests were performed using the same boundary condition as commonly seen on connecting rod development at automotive industry. Based on the experimental results, finite element analyses were performed in order to correlate the experimental and the virtual results. Generally, all the results indicate that the Ti-6Al-4V connecting rod produced by DMLS process has a structural behavior similar to the Ti-6Al-4V connecting rod produced by rolling and annealing process.

*Key words:* Additive Manufacturing; Titanium Alloys; Finite Element Method.



## Lista de Ilustrações

Figura 2.1	Resistência específica versus a temperatura de trabalho de alguns materiais estruturais comparados com ligas de titânio e aluminetos [Peters et al., 2003]	06
Figura 2.2	Comparação da densidade do titânio com outros metais [Peters et al., 2003]	06
Figura 2.3	Influência dos agentes estabilizadores nos diagramas de fase das ligas de titânio [Lutjering e Williams, 2007]	08
Figura 2.4	Microestrutura lamelar da liga Ti-6Al-4V [Peters et al., 2003]	12
Figura 2.5	Microestrutura equiaxial fina (a) e grosseira (b) da liga Ti-6Al-4V devido à recristalização [Peters et al., 2003]	12
Figura 2.6	Microestrutura bimodal [Peters et al., 2003]	12
Figura 2.7	Diagrama de fases das ligas Ti-6Al-V (a) e microestrutura da liga Ti-6Al-4V após resfriamento lento (b), (d) e (f) e resfriamento rápido (c), (e) e (g) [Peters et al., 2003]	14
Figura 2.8	Estrutura Widmanstätten [Barbieri, 2001]	15
Figura 2.9	Características gerais e aplicações das ligas de titânio [Adaptada de Joshi, 2006]	17
Figura 2.10	Exemplos de possíveis aplicações do titânio em automóveis. Adaptada de Schauerte [2003]	19
Figura 2.11	Exemplos de aplicações do titânio em componentes de automóveis e motocicletas: biela de Ti-6Al-4V da Ducati (a), válvula de admissão (Ti-6Al-4V) e escape (liga quase $\alpha$ reforçada com partículas TiB) (b), válvulas com e sem recobrimento feitas de liga TiAl de fase $\gamma$ (c), pinos de freio feitos de titânio puro grau 2 da Mercedes-Benz (d), anéis de vedação para tubos de pressão de freios produzidos em titânio puro grau 1 (Volkswagen) (e) e roscas de rodas feitas de Ti-6Al-4V da BBS (f). Adaptada de Schauerte [2003]	20
Figura 2.12	Nomenclatura da biela. Adaptada de Londhe, Yadav e Sen [2009]	22

Figura 2.13	Biela angulada e posição do centro de gravidade (CG) da biela. Adaptada de Mendes [2005]	23
Figura 2.14	Forças atuantes no mecanismo biela-manivela. [Mendes, 2005]	25
Figura 2.15	Forças atuantes no mecanismo biela-manivela devido à combustão (a) e inércia dos componentes (b)	25
Figura 2.16	Modelo genérico de elementos finitos [Pavanello, 1997]	27
Figura 2.17	Elementos de casca triangulares e quadrangulares [Ansys, 2010]	28
Figura 2.18	Elementos sólidos (3D) tetraédrico (a) e hexaédrico (b) [Ansys, 2010]	28
Figura 2.19	Aplicação da carga de tração (a) e compressão (b) [Webster, 1983]	30
Figura 2.20	Modelo de elementos finitos de uma biela e sua condição de contorno para análise do olhal menor	30
Figura 2.21	Esquema do processo DMLS. Adaptada de Gatto et al. [2012]	35
Figura 2.22	Diferentes orientações de corpos de prova sobre a plataforma de construção da máquina de DMLS. Adaptada de Delgado, Ciurana e Rodríguez [2012]	37
Figura 3.1	Morfologia do pó da liga Ti-6Al-4V. Aumentos de 200x (a) e 500x (b)	39
Figura 3.2	Fluxograma das etapas envolvidas na parte experimental	40
Figura 3.3	Equipamento de prototipagem rápida EOSINT M270 (a) e camada de pó espalhada sobre a plataforma de construção (b)	41
Figura 3.4	Esquema mostrando os cortes longitudinal e transversal das amostras para análise metalográfica	43
Figura 3.5	Equipamento servo hidráulico (a) e célula de carga (b) utilizados	45
Figura 3.6	Desenho 2D do corpo de prova de tração seguindo a norma ASTM E8-E8M [2009]	45
Figura 3.7	Geometria 3D da biela em escala 1:2,5 (prototipada posteriormente por DMLS) e em escala 1:1 (aproximação de uma biela real)	46
Figura 3.8	Malha de elementos finitos da biela e do pino do pistão	47
Figura 3.9	Condições de contorno de tração da biela no olhal menor	48
Figura 3.10	Montagem experimental dos testes de tração da biela obtida por DMLS	49
Figura 3.11	Curvas de carga que a biela sofre durante a operação no motor	49
Figura 3.12	Superfície de contato entre a biela e o pino do pistão	50
Figura 4.1	Espectro de energia dispersiva da amostra laminada (a) e prototipada por	

	DMLS (b)	51
Figura 4.2	Poros presentes na liga Ti-6Al-4V laminada. Seção longitudinal (a) e (b) e seção transversal (c) e (d) da amostra	52
Figura 4.3	Porosidade da amostra produzida por DMLS. Seção longitudinal (a) e (b) e seção transversal (c) e (d) da amostra	53
Figura 4.4	Microestrutura da seção longitudinal (a) e transversal (b) da liga laminada e da seção longitudinal (c) e transversal (d) da liga produzida via DMLS	54
Figura 4.5	Microestrutura da liga Ti-6Al-4V laminada. Seção longitudinal (a), (c) e (e) e seção transversal (b), (d) e (f)	55
Figura 4.6	Microestrutura da liga Ti-6Al-4V produzida via DMLS. Seção longitudinal (a), (c) e (e) e seção transversal (b), (d) e (f)	56
Figura 4.7	Difratograma de raios-X da liga Ti-6Al-4V laminada e recozida	57
Figura 4.8	Difratograma de raios-X da liga Ti-6Al-4V prototipada por DMLS	58
Figura 4.9	Curva tensão x deformação dos corpos de prova da liga Ti-6Al-4V laminada produzida por DMLS	60
Figura 4.10	Gráfico dos valores de microdureza Vickers para as amostras laminada e prototipada	61
Figura 4.11	Gráfico dos valores de dureza Rockwell C para as amostras laminada e prototipada	62
Figura 4.12	Curva tensão x deformação bi-linear do aço C70 utilizada na análise de elementos finitos	63
Figura 4.13	Curva tensão x deformação bi-linear da liga Ti-6Al-4V laminada e recozida utilizada na análise de elementos finitos	63
Figura 4.14	Curva tensão x deformação bi-linear da liga Ti-6Al-4V produzida por DMLS utilizada na análise de elementos finitos	64
Figura 4.15	Biela obtida por DMLS (a) e virtual gerada por software CAD (b)	64
Figura 4.16	Tensão equivalente de von Mises da biela de Ti-6Al-4V produzida por DMLS sob a máxima carga experimental	66
Figura 4.17	Tensão máxima principal da biela de Ti-6Al-4V produzida por DMLS sob a máxima carga experimental (a) e biela prototipada fraturada (b)	66
Figura 4.18	Comparação entre o local de ruptura da biela de Ti-6Al-4V produzida por	

	DMLS. Ensaio virtual (a) e real (b)	67
Figura 4.19	Tensão máxima principal (a) e equivalente de von Mises (b) da biela de aço C70 e sob um carregamento de 6912 N	68
Figura 4.20	Tensão máxima principal (a) e equivalente de von Mises (b) da biela de Ti-6Al-4V laminada e sob um carregamento de 6912 N	68
Figura 4.21	Tensão máxima principal (a) e equivalente de von Mises (b) da biela de Ti-6Al-4V prototipada por DMLS e sob um carregamento de 6912 N	69
Figura 4.22	Deslocamento (em mm e com um aumento de 50 vezes) das bielas de aço C70 (a), Ti-6Al-4V laminado (b) e Ti-6Al-4V sinterizado por laser (c) sob um carregamento de 6912 N	70

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Propriedades físicas do titânio e de outros metais [Moiseyev, 2006]	07
Tabela 2.2	Componentes de produção seriada fabricados em titânio. Adaptada de Schauerte [2003]	19
Tabela 2.3	Uso do titânio e suas ligas na produção automotiva. Adaptada de Schauerte [2003]	20
Tabela 2.4	Classificação dos processos de prototipagem rápida baseada no estado inicial da matéria prima [Volpato, 2007]	32
Tabela 3.1	Composição química e propriedades mecânicas da liga Ti-6Al-4V laminada	38
Tabela 3.2	Composição química e densidades do pó da liga Ti-6Al-4V segundo a especificação da EOS [2013]	39
Tabela 3.3	Especificações do equipamento EOSINT M270 de acordo com a EOS [2013]	41
Tabela 3.4	Parâmetros de processamento utilizados na realização dos experimentos	42
Tabela 3.5	Propriedades do aço C70 [Afzal, 2004 e Repgen, 1998]	50
Tabela 4.1	Composição química obtida por espectroscopia de energia dispersiva	51
Tabela 4.2	Resultados da análise de difração de raios-X da liga Ti-6Al-4V laminada e recozida	58
Tabela 4.3	Resultados da análise de difração de raios-X da liga Ti-6Al-4V prototipada por DMLS	59
Tabela 4.4	Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração para as ligas Ti-6Al-4V laminada e prototipada	61
Tabela 4.5	Valores de microdureza Vickers e dureza Rockwell C obtidos	62
Tabela 4.6	Resultados de máxima carga de ruptura no ensaio de tração das bielas prototipadas por DMLS	65
Tabela 4.7	Resultados de tensões (máxima principal e von Mises) e deslocamentos provenientes das análises de elementos finitos	70



## Lista de Abreviaturas e Siglas

### *Letras Latinas*

**Al** - Alumínio

**C** - Carbono

**CO<sub>2</sub>** - Gás carbônico

**Cr** - Cromo

**Cu** - Cobre

**D** - Diâmetro do pistão [mm]

**E** - Módulo de elasticidade de Young [GPa]

**E<sub>t</sub>** - Módulo tangente [GPa]

**F<sub>b</sub>** - Força da biela [N]

**Fe** - Ferro

**F<sub>g</sub>** - Força de combustão que age no pistão [N]

**F<sub>mc</sub>** - Máxima força de compressão vista pela biela [N]

**F<sub>mt</sub>** - Máxima força de tração vista pela biela [N]

**F<sub>n</sub>** - Força lateral do pistão [N]

**F<sub>o</sub>** - Força de inércia das massas oscilantes total [N]

**F<sub>R</sub>** - Força de inércia das massas rotativas total [N]

**F<sub>r</sub>** - Força radial da biela [N]

**F<sub>t</sub>** - Força tangencial da biela [N]

**H** - Hidrogênio

**L** - Comprimento total da biela [mm]

**L1** - Distância do centro do olhal menor da biela até o CG [mm]

**L2** - Distância do centro do olhal maior da biela até o CG [mm]

**Li** - Lítio

**m<sub>ab</sub>** - Massa alternativa da biela [g]

**m<sub>b</sub>** - Massa total da biela [g]

**Mg** - Magnésio

<b>Mo</b> - Molibdênio	
<b>m<sub>ot</sub></b> - Massa oscilante total	[g]
<b>m<sub>rb</sub></b> - Massa rotativa da biela	[g]
<b>m<sub>rt</sub></b> - Massa rotativa total	[g]
<b>N</b> - Nitrogênio	
<b>Nb</b> - Nióbio	
<b>Nd</b> - Neodímio	
<b>Ni</b> - Níquel	
<b>O</b> - Oxigênio	
<b>P</b> - Pressão de combustão na câmara do cilindro	[MPa]
<b>R</b> - Raio do virabrequim ou meio curso do pistão	[mm]
<b>Sn</b> - Estanho	
<b>Ta</b> - Tântalo	
<b>Ti</b> - Titânio	
<b>V</b> - Vanádio	
<b>Yb</b> - Itérbio	
<b>Zr</b> - Zircônia	

### *Letras Gregas*

$\Delta l$ - Alongamento	[%]
$\mu$ - Módulo de Poisson	
$\alpha$ - Fase $\alpha$ da liga Ti-6Al-4V	
$\alpha'$ - Fase $\alpha'$ da liga Ti-6Al-4V - microestrutura martensítica acicular	
$\beta$ - Fase $\beta$ da liga Ti-6Al-4V	
$\lambda$ - Relação R/L	
$\sigma_e$ - Tensão de escoamento	[MPa]
$\sigma_u$ - Limite de resistência à tração	[MPa]
$\omega$ - Velocidade angular do virabrequim	[rpm]

## *Abreviações*

**2D** - Duas dimensões

**3D** - Três dimensões

**CG** - Centro de gravidade

**FeTiO<sub>3</sub>** - Ilmenita

**TiCl<sub>4</sub>** - Tetracloreto de titânio

**Ticp** - Titânio comercialmente puro

**TiO<sub>2</sub>** - Rutila

## *Siglas*

**3DP** - Impressão Tridimensional

**ASTM** - *American Society for Testing and Materials*

**CAD** - *Computer Aided Design*

**CCC** - Estrutura Cristalina Cúbica de Corpo Centrado

**DEMA** - Departamento de Engenharia de Materiais

**DMLS** - Sinterização Direta de Metais por Laser

**DRX** - Análise de Difração de Raios-X

**EDS** - Espectroscopia de Energia Dispersiva

**FDM** - Modelagem por Fusão e Deposição

**FEM** - Faculdade de Engenharia Mecânica

**HC** - Estrutura Cristalina Hexagonal Compacta

**IJP** - Impressão a Jato de Tinta

**INCT-BIOFABRIS** - Instituto de Biofabricação

**JCPDS** - *Joint Committee of Powder Diffraction Standards*

**LABIOMECC** - Laboratório de Biomateriais e Biomecânica

**LENS** - Fabricação de Forma Final a Laser

**LOM** - Manufatura Laminar de Objetos

**MEF** - Método dos Elementos Finitos

**MEV** - Microscopia Eletrônica de Varredura

**MO** - Microscopia Óptica

**MS** - Temperatura de Transformação Martensítica

**PLT** - Tecnologia com Lâminas de Papel

**PVD** - Deposição Física de Vapor

**SL** - Estereolitografia

**SLI** - *3D Systems Layer Interface* (Extensão de arquivo que representa a geometria fatiada)

**SLS** - Sinterização Seletiva a Laser

**STL** - *Estereolithography* (Extensão de arquivo que divide a geometria em uma malha de triângulos)

**UNICAMP** - Universidade Estadual de Campinas

**Ra** - Rugosidade média aritmética

**Rz** - Rugosidade média entre os cinco maiores e menores valores

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>4</b>
2.1	Titânio.....	4
2.1.1	Histórico e generalidades do titânio.....	4
2.1.2	Metalurgia física do titânio.....	7
2.1.3	Aplicações do titânio e suas ligas.....	15
2.1.4	Emprego do titânio na indústria automotiva.....	18
2.2	Biela – conceitos básicos.....	21
2.3	Métodos dos elementos finitos – conceitos básicos.....	26
2.3.1	Análise de elementos finitos de bielas.....	29
2.4	Manufatura aditiva ou prototipagem rápida.....	31
2.4.1	Sinterização Direta de Metais por Laser (DMLS).....	34
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>38</b>
3.1	Produção de corpos de prova, amostras e bielas via Sinterização Direta de Metais por Laser.....	40
3.2	Preparação metalográfica.....	42
3.3	Caracterização Microestrutural.....	43
3.4	Levantamento das propriedades mecânicas.....	44
3.5	Análise de elementos finitos.....	46
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>51</b>
4.1	Caracterização Microestrutural.....	51
4.2	Levantamento das propriedades mecânicas.....	59
4.3	Análises de elementos finitos.....	62
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS</b>	<b>72</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>76</b>



# 1 INTRODUÇÃO

A demanda pelo desenvolvimento de novos produtos no segmento automotivo está cada vez maior, aliada a prazos cada vez menores. Nesse segmento, as ideias de *downsizing* e de economia de combustível estão cada vez mais dominantes, tornando-se claro que a tendência mundial será a de uma maior eficiência energética e conseqüentemente, uma menor agressividade ao meio ambiente. Assim, os componentes mecânicos deverão ser cada vez menores, mais leves e capazes de aguentar maiores cargas quando em regime de funcionamento. Neste trabalho, a biela foi o componente escolhido como objetivo de estudo, sendo um componente responsável por transmitir e transformar o movimento alternativo linear dos pistões em movimento rotativo ao virabrequim. Este componente foi escolhido por ser de extrema importância para o funcionamento do mecanismo biela-manivela, pelas suas dimensões, por apresentar um potencial de otimização da geometria e a possibilidade de verificação e validação experimental.

Dessa maneira, neste trabalho, a escolha de um método alternativo de manufatura aliado ao uso de um material bastante leve e resistente foram as soluções escolhidas para os problemas de prazos de desenvolvimentos curtos aliados as conseqüências do *downsizing*.

A manufatura aditiva por camadas, também conhecida como prototipagem rápida, é um processo que vem ganhando bastante destaque recentemente e constitui um método de manufatura alternativo ao de uma produção seriada convencional. Dentre os diversos métodos de manufatura aditiva, a sinterização direta de metais por laser (*Direct Metal Laser Sintering - DMLS*) foi escolhida para ser avaliada e estudada como uma alternativa aos métodos convencionais de conformação mecânica. Muitas vezes, para se construir um componente mecânico automotivo, são necessárias diversas operações até atingir a geometria final da peça. Etapas como o desbaste, usinagem e acabamento final, dentre outras, consomem linhas inteiras, muitas vezes dedicadas exclusivamente a cada operação. Uma das principais vantagens do DMLS é a construção de peças com geometrias bastante complexas, necessitando somente de um modelo 3D.

Utilizar o DMLS para produzir um componente mecânico torna-se então uma das alternativas mais rápidas para a obtenção do produto desejado. No passado, a sinterização direta de metais por laser gerava produtos com características mecânicas inferiores a dos componentes

obtidos por métodos convencionais de conformação mecânica. No entanto, através do desenvolvimento da tecnologia e do refinamento técnico do equipamento responsável pelo processo, o DMLS já consegue entregar atualmente, peças que conseguem ser funcionais [Volpato, 2007; Cooper et al., 2012; Sanz e García Navas, 2013].

O material escolhido para estudo neste trabalho foi a liga Ti-6Al-4V, umas das ligas de titânio mais utilizadas em vários segmentos da engenharia e medicina. Fatores como a alta resistência mecânica, ótima resistência à corrosão e baixa densidade fazem do Ti-6Al-4V uma liga bastante atraente para ser usada na indústria aeronáutica, biomédica e automobilística dentre várias outras [Bansal, Eryilmaz e Blau, 2011; Joshi, 2006]. Tendo em vista tais características, foi decidido o uso da liga Ti-6Al-4V, tanto laminada quanto sinterizada por laser, em bielas, constituindo uma substituição ao aço C70, bastante utilizado em bielas. Mesmo que o Ti-6Al-4V seja um material mais caro do que o aço C70 suas melhores propriedades mecânicas podem compensar tais custos, visto que, devido à tendência mundial de *downsizing*, os componentes mecânicos estão sendo cada vez mais solicitados, sem que a sua geometria possa ser muito modificada para atender cargas cada vez maiores.

Para a realização deste trabalho, uma geometria básica e simplificada de uma biela automotiva foi utilizada. As bielas foram sinterizadas por laser numa escala de 1:2,5, ou seja, todas as suas medidas foram reduzidas em duas vezes e meia. Dessa maneira, os carregamentos aplicados sobre a biela também foram reduzidos na mesma proporção. Foram observadas diversas vantagens na construção do modelo em escala, como a economia de material, tempo e custos. Embora o modelo em escala não seja de fato funcional, foi observado um potencial de desenvolvimento de uma metodologia de projetos que fosse mais rápida. Ou seja, durante a etapa de desenvolvimento da geometria da peça, o uso do DMLS, de modelos em escala e do método dos elementos finitos trariam boas economias de tempo e custos, sem prejuízo ao resultado final.

Portanto, os principais objetivos deste trabalho são:

1. Avaliar se a liga Ti-6Al-4V constitui um material promissor para substituir outros materiais em componentes automotivos;
2. Analisar as características mecânicas das amostras sinterizadas por laser e compará-las com as características das amostras da liga laminada;

3. Analisar as características microestruturais da liga de Ti-6Al-4V prototipada por DMLS e compará-las com as características da liga de Ti-6Al-4V laminada;
4. Avaliar se a utilização da manufatura aditiva da liga Ti-6Al-4V em bielas de motores de 4 cilindros de ciclo OTTO é factível;
5. Correlacionar os resultados dos ensaios experimentais de tração das bielas com os ensaios virtuais realizados através de análises de elementos finitos;
6. Comparar três condições de bielas (Ti-6Al-4V laminada, Ti-6Al-4V sinterizada por laser e de aço C70) através de análises de elementos finitos utilizando a mesma condição de contorno do teste experimental;
7. Verificar se a biela de Ti-6Al-4V sinterizada por laser possui o mesmo comportamento estrutural de uma biela de Ti-6Al-4V laminada e;
8. Mensurar a possibilidade de se construir uma metodologia de projeto relacionada ao desenvolvimento de produtos que seja mais rápida e eficaz ao se utilizar o DMLS e análises de elementos finitos.

Neste trabalho, alguns temas estudados são abordados na revisão bibliográfica (Capítulo 2). Dentre eles estão o material titânio e suas ligas, sua aplicação no segmento automotivo, a morfologia e microestrutura da liga Ti-6Al-4V, um resumo dos métodos de manufatura aditiva existentes com ênfase na técnica DMLS e conceitos básicos do método dos elementos finitos e do componente biela. No Capítulo 3 são apresentados os materiais e a metodologia experimental utilizados no trabalho. Todos os resultados obtidos são apresentados e discutidos no Capítulo 4. As conclusões e algumas sugestões para próximos trabalhos são apresentadas no Capítulo 5.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Titânio

#### 2.1.1 Histórico e generalidades do titânio

Segundo Peters et al. [2003] e Joshi [2006], o titânio foi descoberto a partir do mineral ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ) em 1791, pelo mineralogista e químico inglês William Gregor. Quatro anos mais tarde, o químico alemão Martin Heinrich Klaproth isolou o óxido de titânio a partir de outro mineral, a rutila ( $\text{TiO}_2$ ). Porém, somente em 1910 o titânio foi obtido de maneira isolada por Matthew Albert Hunter, através do aquecimento de tetracloreto de titânio ( $\text{TiCl}_4$ ) com sódio em um reator de aço. Mas, em 1932, foi Wilhelm Justin Kroll, de Luxemburgo, que foi considerado o pai do titânio industrial. Wilhelm produziu grandes quantidades de titânio ao combinar o tetracloreto de titânio ( $\text{TiCl}_4$ ) com cálcio. No começo da Segunda Guerra Mundial, ele se mudou para os Estados Unidos e demonstrou que o titânio poderia ser extraído comercialmente a partir da redução do tetracloreto de titânio, que ocorre quando se troca o agente redutor de cálcio por um agente redutor de magnésio, numa atmosfera de gás inerte. Este método é conhecido como o “processo Kroll” e até hoje é um dos mais utilizados.

O titânio resultante do “processo Kroll” é chamado de “esponja de titânio” por causa de sua aparência porosa [Lutjering e Williams, 2007]. Após a Segunda Guerra Mundial, o titânio passou a ter uma importância cada vez maior. Em 1948, a Dupont Company se tornou a primeira empresa a produzir o titânio comercialmente. Logo, as ligas de titânio se tornaram materiais chave para serem empregados em componentes aeronáuticos. O titânio é o quarto metal estrutural mais abundante na crosta terrestre, após o alumínio, ferro e magnésio. Entretanto, o titânio é raramente encontrado no estado puro, sendo o seu processamento justamente o fator que o torna caro. As suas principais fontes minerais são a ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ) e a rutila ( $\text{TiO}_2$ ). Dentre os locais que possuem depósitos minerais funcionais estão a Rússia, Austrália, Índia, México, Estados Unidos, Canadá, África do Sul, Serra Leoa, Ucrânia, Noruega e Malásia [Peters et al., 2003]. A

partir da década de 1950, inúmeras ligas foram desenvolvidas, sendo que a maioria delas tem aplicações na área aeroespacial. Ligas como a Ti-8Al-1-Mo-1V, Ti-5Al-2,5Sn, Ti-4Al-4Mn, Ti-1,5Fe-2,7Cr, Ti-10V-2Fe-3Al e Ti-6Al-6V-2Sn foram desenvolvidas e usadas em turbinas de avião e componentes de alto desempenho por empresas como a Pratt & Whitney e General Electric em adição à liga Ti-6Al-4V, que é a mais usada até os dias de hoje [Donachie, 1988].

O titânio possui características que o tornam um metal bastante atrativo para diversas aplicações, como a baixa densidade, alta resistência mecânica e excelente resistência à corrosão. Como exemplo, somente em temperaturas abaixo de 300 °C que plásticos reforçados com fibra de carbono possuem uma maior resistência específica do que o titânio (Figura 2.1). O titânio se torna mais atraente em altas temperaturas, onde sua resistência mecânica é bastante aumentada, porém, a máxima temperatura de aplicação é limitada pelo comportamento em oxidação. Portanto, o titânio possui um conjunto de características e propriedades que o diferencia de outros metais leves, fazendo com que a sua metalurgia física se torne complexa e interessante [Peters et al., 2003].

As propriedades mecânicas do titânio, como o limite de escoamento, a resistência à fratura e características de deformação podem ser bastante aumentadas através da adição de elementos de liga. Dessa forma, as ligas de titânio podem ser formadas e adaptadas, através da combinação de diferentes elementos, de modo que as propriedades mecânicas desejadas possam ser atingidas. Sendo assim, mudanças na composição e no processamento da liga fazem com que haja uma mudança em sua microestrutura. Isso acontece devido a várias transformações de fase em equilíbrio presentes no sistema. O titânio possui uma transformação de fase alotrópica a partir de uma fase de alta temperatura (fase  $\beta$ ), com uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), para uma fase de temperatura menor (fase  $\alpha$ ), que possui uma estrutura hexagonal compacta (HC). Pode-se notar que existe uma grande influência da composição química da liga na temperatura de transformação e, dessa forma, uma boa variedade de transformação de fases é possível, resultando na formação de diferentes ligas, que podem ser otimizadas através do controle termomecânico [Joshi, 2006].

Ainda de acordo com Peters et al. [2003], como os aluminetos de titânio melhoram o comportamento em oxidação do titânio, eles se tornaram foco de estudos para o desenvolvimento de ligas, como por exemplo das ligas de Ti-Al. Enquanto ligas convencionais de titânio trabalham somente até temperaturas ligeiramente superiores a 500 °C, ligas de Ti-Al conseguem competir

diretamente com aços de alta temperatura e superligas de Ni-base (Figura 2.1). Devido a sua densidade, o titânio é considerado um metal leve, ocupando uma posição intermediária entre o alumínio e o ferro. A Figura 2.2 apresenta uma comparação da densidade do titânio com a de outros metais. A Tabela 2.1 mostra uma comparação das propriedades físicas do titânio puro com alguns outros metais. Nessa comparação, o titânio se mostra como o mais refratário dos metais devido ao seu comportamento estável a altas temperaturas e também possui valores mais baixos de condutividade térmica, resistência elétrica e expansão térmica [Moiseyev, 2006].

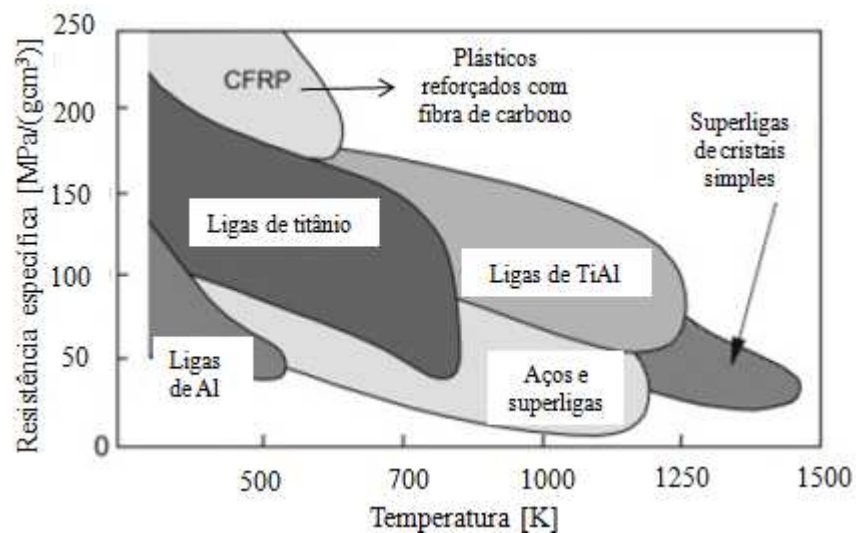


Figura 2.1. Resistência específica versus a temperatura de trabalho de alguns materiais estruturais comparados com ligas de titânio e aluminetos [Peters et al., 2003].

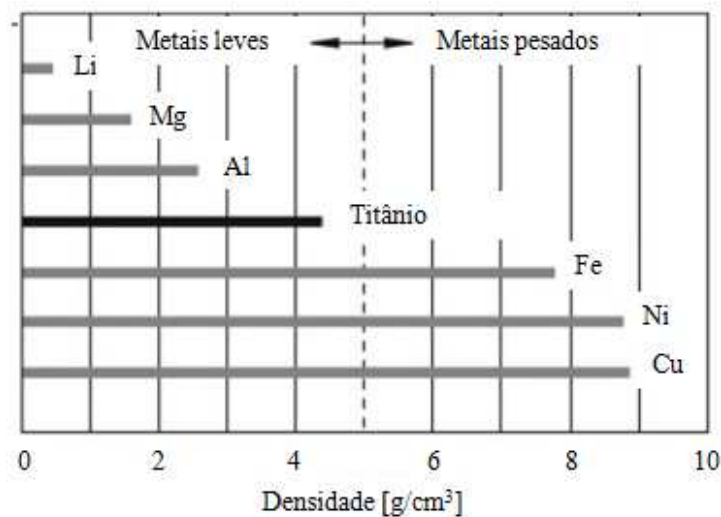


Figura 2.2. Comparação da densidade do titânio com outros metais [Peters et al., 2003].

Tabela 2.1. Propriedades físicas do titânio e de outros metais [Moiseyev, 2006].

Propriedades	Ti	Mg	Al	Fe	Cu
Temperatura de fusão (°C)	1665	650	660	1535	1083
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	4,51	1,74	2,70	7,86	8,94
Condutividade térmica (Cal/cm.s.deg)	0,04	0,35	0,57	0,17	0,92
Resistência elétrica (μΩcm)	55,40	4,40	2,68	10,00	1,72
Capacidade térmica (Cal/g.deg)	0,13	0,24	0,21	0,11	0,09
Coefficiente de expansão térmica (x10 <sup>6</sup> .deg <sup>-1</sup> )	8,90	25,70	24,00	11,90	16,40
Módulo de Elasticidade (kgf/mm <sup>2</sup> )	11200	4500	7250	20000	12250

Ainda segundo Moiseyev [2006] e Joshi [2006], uma característica marcante do titânio e suas ligas é a alta sensibilidade a impurezas, especialmente ao oxigênio atmosférico e ao nitrogênio. Elementos como o oxigênio, o nitrogênio, carbono e outras impurezas formam ligas com soluções sólidas intersticiais ou de fases metálicas com o titânio, o que afeta significativamente suas propriedades, mesmo quando presente em pequenas quantidades, uma vez que diferentes microestruturas são formadas através da adição dos agentes estabilizadores.

### 2.1.2 Metalurgia física do titânio

O titânio é um elemento de transição, tendo o número atômico 22 e um peso atômico de 47,90. Ele possui uma estrutura cristalina do tipo hexagonal compacta (HC) na faixa de temperatura de 25 °C a 882 °C, conhecida como fase  $\alpha$ . A partir da temperatura de 882 °C (conhecida como  $\beta$  *transus*), o titânio sofre uma transformação alotrópica e a estrutura cristalina passa a ser cúbica de corpo centrado (CCC), sendo conhecida como fase  $\beta$ . A presença de duas estruturas cristalinas diferentes é muito importante, uma vez que as estruturas cristalinas são a base para uma grande variedade de propriedades atingidas pelas ligas de titânio. A deformação plástica ocorre de maneira mais fácil na estrutura CCC do que na HC, o que ajuda a explicar porque a deformação plástica da fase  $\alpha$  é limitada quando comparada com a da fase  $\beta$ . A temperatura de fusão do titânio ocorre por volta de 1670 °C e vários elementos que formam uma solução sólida com o titânio são classificados com base nos efeitos de solubilidade que eles causam nas fases  $\alpha$  e  $\beta$ . Dessa maneira, os elementos que estabilizam a fase  $\alpha$  são chamados de

estabilizadores da fase  $\alpha$  (alumínio, nitrogênio, carbono e oxigênio), que estendem a temperatura dessa fase para níveis mais altos, e os elementos que estabilizam a fase  $\beta$  são chamados de estabilizadores da fase  $\beta$  (vanádio, ferro, cromo, níquel, molibdênio e nióbio) que, por sua vez, deslocam o campo da fase  $\beta$  para temperaturas menores. Existem ainda os elementos considerados neutros, como o zinco e a zircônia, que não têm influência significativa na temperatura  $\beta$  *transus*. Baseado no tipo de microestrutura apresentada, as ligas de titânio podem ser divididas em cinco classes: liga  $\alpha$ , liga quase  $\alpha$ , liga  $\alpha+\beta$ , liga quase  $\beta$  e liga  $\beta$  [Peters et al., 2003; Barbieri, 2001; Donachie, 1988]. A Figura 2.3 ilustra a influência dos agentes estabilizadores nos diagramas de fases das ligas de titânio. Pode-se notar que os estabilizadores  $\alpha$  também são responsáveis por criar um campo de fase  $\alpha + \beta$ , enquanto os estabilizadores  $\beta$  diminuem a temperatura  $\beta$  *transus* e podem ser divididos em  $\beta$  isomorfo (fase  $\beta \leftrightarrow$  fase  $\alpha +$  fase  $\beta$ ) e  $\beta$  eutetóide (fase  $\beta \leftrightarrow$  fase  $\alpha +$  fase  $A_xB_y$ ).

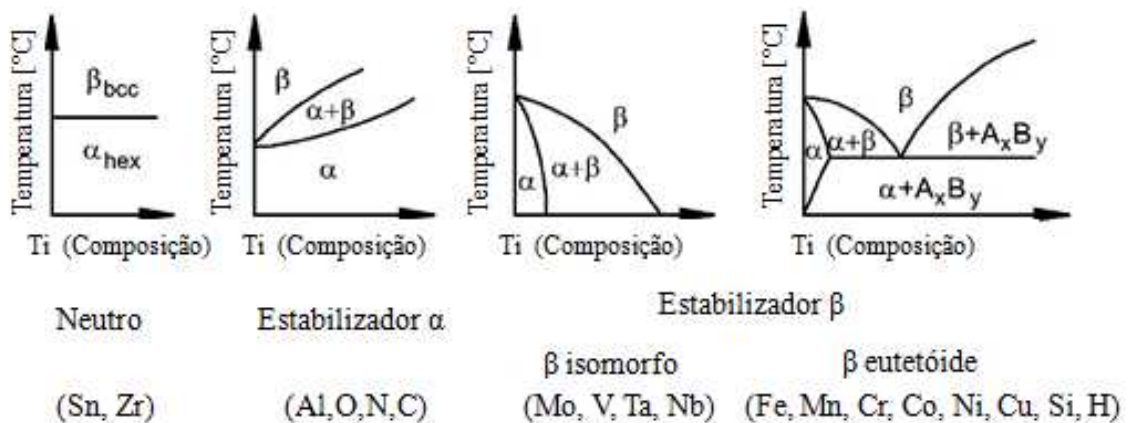


Figura 2.3. Influência dos agentes estabilizadores nos diagramas de fase das ligas de titânio [Lutjering e Williams, 2007].

### Ligas $\alpha$

As ligas  $\alpha$  possuem altos teores de estabilizadores da fase  $\alpha$ , que tendem a elevar a temperatura da transformação alotrópica e são mais solúveis na fase  $\alpha$ . Dentre eles, o alumínio é de longe o mais importante elemento ligante do titânio, uma vez que é o único estabilizador de



fase  $\alpha$  que possui importância comercial e está presente na maioria das ligas comerciais do titânio [Joshi, 2006]. As ligas  $\alpha$  são principalmente usadas na indústria química e na engenharia de processos, uma vez que propriedades como o excelente comportamento à corrosão e deformabilidade são mais importantes do que a resistência mecânica. Como exemplos, pode-se citar o titânio comercialmente puro (Ticp), do grau 1 até o grau 6, e a liga Ti-5Al-2,5Sn. Os diferentes graus do Ticp se diferem principalmente devido ao teor de oxigênio, que é um elemento ligante intersticial. A adição do oxigênio promove um aumento da resistência mecânica e uma diminuição da ductilidade, e quanto maior a numeração do grau, maior a concentração de oxigênio. Assim, o Ticp de grau 1 possui um limite de resistência à tração de 240 MPa, enquanto que no Ticp de grau 4 a resistência é de 740 MPa [Peters et al., 2003]. Além disso, essas ligas possuem boa estabilidade e boas propriedades quando em altas temperaturas, mas não são muito susceptíveis a tratamentos térmicos que modifiquem a sua microestrutura [Joshi, 2006]. As ligas  $\alpha$  também são muito favoráveis à soldagem, justamente por causa da falta de sensibilidade aos tratamentos térmicos. Porém, não são favoráveis ao forjamento, quando comparadas com as ligas  $\alpha+\beta$  e  $\beta$  [Donachie, 1988].

### **Ligas quase $\alpha$**

As ligas quase  $\alpha$  contêm pequenas quantidades de estabilizadores da fase  $\beta$  (1 a 2%) em adição aos estabilizadores da fase  $\alpha$  [Barbieri, 2001]. Sendo assim, essa liga apresenta a alta resistência mecânica das ligas  $\alpha+\beta$  e a boa resistência à fluência das ligas  $\alpha$  [Joshi, 2006 e Peters et al., 2003], sendo ideais para aplicações em altas temperaturas, podendo operar até 600 °C, o que faz com sua maior aplicação seja na área aeronáutica. Como exemplos, podemos citar as ligas Ti-8-1-1, Ti-6-2-4-2 e a IMI679 [Peters et al., 2003].

## **Ligas $\alpha+\beta$**

As ligas  $\alpha+\beta$  possuem uma maior quantidade de estabilizadores  $\beta$  (10 a 15%), fazendo com que o campo de estabilidade da estrutura  $\alpha+\beta$  seja significativamente ampliado na temperatura ambiente. As ligas  $\alpha+\beta$  podem ser tratadas termicamente para oferecer uma grande variedade de microestruturas e uma vasta combinação de propriedades mecânicas. Suas propriedades mecânicas são bastante balanceadas e são constituídas por alta resistência mecânica e boa ductilidade, boa resistência à fluência, boa resistência à corrosão, à fadiga, à soldabilidade e bom comportamento em corrosão. Como exemplos, tem-se as ligas Ti-6-6-2, Ti-17 e a liga Ti-6Al-4V, que é a liga mais popularmente usada [Peters et al., 2003, Barbieri, 2001 e Brunette et al., 2001].

## **Ligas quase $\beta$ ou $\beta$ metaestável**

São as ligas que contêm de 10 a 15% de estabilizadores da fase  $\beta$ , o que faz com que a fase  $\beta$  seja mantida a temperatura ambiente. Essas ligas possuem alta resistência mecânica, elevada dureza, são facilmente endurecidas e propiciam boas condições de forjamento em uma grande faixa de temperatura. Essas ligas ainda contêm pequenas quantidades de estabilizadores  $\alpha$ , que atuam para melhorar as propriedades mecânicas. As ligas  $\beta$  metaestáveis estão cada vez mais sendo utilizadas em componentes estruturais aeronáuticos. Como exemplo, pode-se citar as ligas Ti-10V-2Fe-3Al e a Ti-4,5Al-3V-2Mo-2Fe [Joshi, 2006; Barbieri, 2001].

## **Ligas $\beta$**

São ligas que possuem grandes quantidades de estabilizadores da fase  $\beta$  (a partir de 30%), resultando em uma fase estável à temperatura ambiente uma vez que, segundo Donachie [1988], não há ocorrência de transformação parcial para a fase  $\alpha$  quando as ligas  $\beta$  sofrem trabalho a frio

ou um pequeno aquecimento quando à temperatura ambiente. As ligas  $\beta$  se assemelham aos metais refratários em relação à sua alta densidade, baixa ductilidade e são utilizadas em aplicações que exigem alta resistência à corrosão e à queima [Joshi, 2006]. Como exemplos, podem ser citadas algumas ligas como a Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn e a Ti-10V-2Fe-3Al, usadas em produtos forjados [Antoniali, 2009]. As ligas  $\beta$  possuem excelente forjabilidade, boa capacidade de conformação a frio e podem ser endurecidas para se atingir altos valores de resistência mecânica [Donachie, 1988].

### **Liga Ti-6Al-4V**

Essa liga responde por mais de 50% de todas as ligas de titânio usadas atualmente [Donachie, 1988; Peters et al., 2003]. Estima-se que de 20 a 30% seja a representação do titânio comercialmente puro, enquanto as outras ligas dividem o resto da fatia [Peters et al., 2003]. A liga Ti-6Al-4V foi uma das primeiras ligas de titânio a ser desenvolvida, no começo dos anos 1950, no *Illinois Institute of Technology*, nos Estados Unidos, e é a liga mais estudada e testada, sendo bastante empregada na indústria aeroespacial. Dentre as razões para a liga Ti-6Al-4V ser amplamente utilizada está a combinação de suas propriedades, como boa densidade, resistência mecânica, ductilidade e resistência à corrosão. Além disso, a liga Ti-6Al-4V possui uma excelente trabalhabilidade, podendo ser usada em diversos métodos de fabricação e também possuindo uma disponibilidade comercial muito grande [Donachie, 1988].

A liga Ti-6Al-4V possui uma densidade absoluta de  $4,43 \text{ g/cm}^3$  e uma excelente resistência à propagação de trincas, além de poder ser submetida a diversos processos de deformação e conformação para a obtenção de peças [Morcelli, 2009; Vandenbroucke e Kruth 2007].

A microestrutura da liga Ti-6Al-4V está diretamente relacionada com o tamanho e o arranjo das fases  $\alpha$  e  $\beta$ . A microestrutura pode ser lamelar, caso haja um resfriamento direto da fase  $\beta$ , ou equiaxial, que é resultado de um processo de recristalização. Ambos os tipos de microestrutura podem ter variações de arranjos mais refinados ou grosseiros. Além disso, existe também uma terceira variante de microestrutura, chamada bi-modal ou duplex, composta por uma fase  $\alpha$  equiaxial inserida em uma matriz  $\alpha + \beta$  lamelar [Peters et al. 2003; Lutjering, 2007].

A Figura 2.4 mostra a microestrutura lamelar da liga Ti-6Al-4V obtida através do resfriamento direto da fase  $\beta$ . A Figura 2.5 mostra a microestrutura equiaxial obtida através do processo de recristalização. A microestrutura bi-modal é formada devido a um tratamento térmico em temperaturas logo abaixo da transformação da fase  $\beta$ , como pode ser visto na Figura 2.6. A microestrutura bi-modal pode ser considerada como uma combinação de microestrutura lamelar e equiaxial, possuindo as vantagens de ambas as microestruturas [Peters et al., 2003].

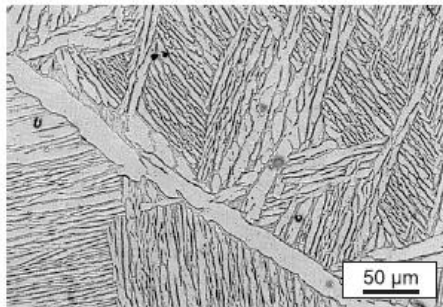


Figura 2.4. Microestrutura lamelar da liga Ti-6Al-4V [Peters et al., 2003].

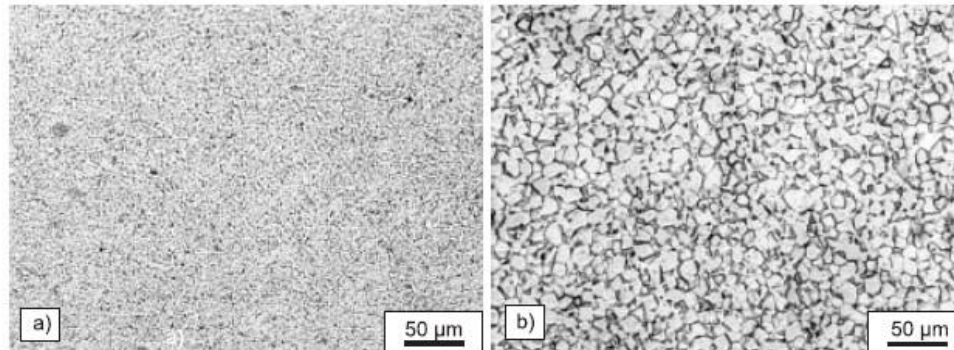


Figura 2.5. Microestrutura equiaxial fina (a) e grosseira (b) da liga Ti-6Al-4V devido à recristalização [Peters et al., 2003].

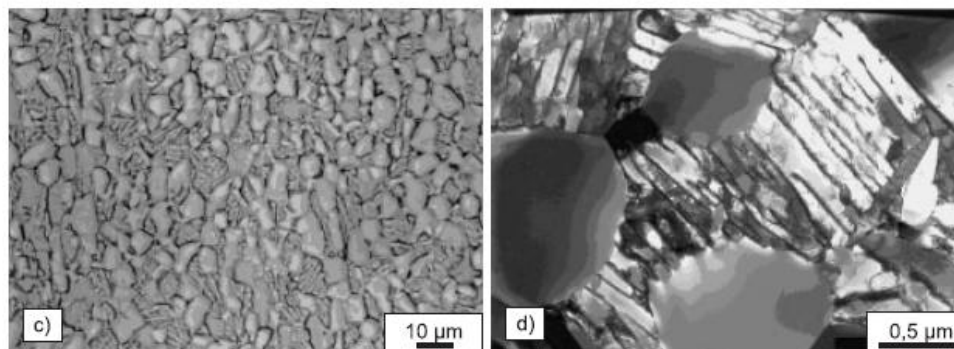


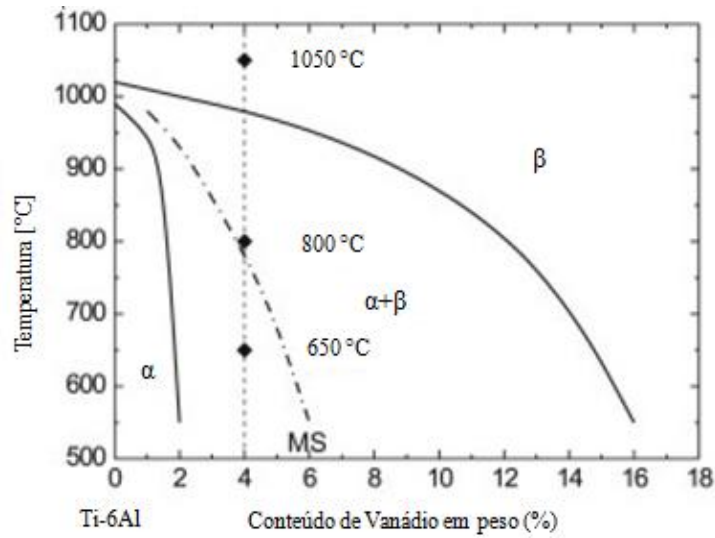
Figura 2.6. Microestrutura bimodal [Peters et al., 2003].

A Figura 2.7 (a) mostra o diagrama de fases das ligas Ti-6Al-V e a influência do vanádio, que atua como um enriquecedor e estabilizador da fase  $\beta$  em baixas temperaturas. Segundo Joshi [2006], a estabilização da fase  $\alpha$  ou  $\beta$  depende do número de elétrons por átomo dos elementos estabilizadores de liga. Elementos de liga com uma relação elétron/átomo menor que quatro estabilizam a fase  $\alpha$ , enquanto os que possuem uma relação elétron/átomo maior que quatro estabilizam a fase  $\beta$ .

A taxa de resfriamento através da fase  $\beta$  influencia diretamente na formação de lamelas finas ou grosseiras. Caso a taxa de resfriamento seja lenta, a lamela torna-se mais grosseira. Na Figura 2.7, pode-se observar essa diferença na microestrutura lamelar da liga Ti-6Al-4V de acordo com resfriamentos lento e rápido, a partir das temperaturas de 1050 °C, 800 °C e 650 °C. As Figuras 2.7 (b) e (d) mostram as lamelas grosseiras e claras da fase  $\alpha$  e a Figura 2.7 (c) mostra a fase  $\alpha'$  acicular que foi formada devido à transformação martensítica. Pode-se notar que na Figura 2.7 (e), a fase  $\beta$  transforma-se em martensita, enquanto que nas Figuras 2.7 (f) e (g), em baixas temperaturas (650 °C), a fração da fase  $\beta$  diminui e essa fase não se transforma mais em martensita em temperaturas abaixo da temperatura de transformação martensítica (MS). Segundo Barbieri [2001] e Donachie [1988], os resfriamentos lentos a partir da fase  $\beta$  induzem a formação de uma estrutura chamada Widmanstätten (Figura 2.8), que possui placas claras e paralelas de fase  $\alpha$  separadas pela fase  $\beta$  (escura). Sugahara et al. [2008] estudaram o tratamento térmico da liga Ti-6Al-4V e obtiveram estruturas Widmanstätten ao aquecer corpos de prova dessa liga a 1050 °C por 30 minutos e depois resfriá-los a uma taxa de 6 °C por minuto até a temperatura ambiente. O mesmo estudo foi feito alterando-se o tempo de aquecimento para uma hora e resfriando os corpos de prova durante uma hora em forno, e depois em água. A microestrutura obtida foi a martensita. Ko et al. [2003] também estudaram o efeito de tratamentos térmicos sobre a microestrutura da liga Ti-6Al-4V, obtendo a microestrutura Widmanstätten ao resfriar barras de 9,5 mm de diâmetro em forno.

Uma têmpera promove a transformação martensítica da fase  $\beta$ , resultando em uma microestrutura bastante fina, em formato de agulha (fase  $\alpha'$ ). Em alguns casos, nem toda a fase  $\beta$  sofre uma transformação martensítica, como por exemplo, em casos onde a temperatura final de transformação martensítica é inferior à temperatura ambiente [Donachie, 1988]. Porém, ao contrário das martensitas encontradas em outros aços, que causa distorções cristalinas e por consequência induz a um aumento de dureza e resistência mecânica, o efeito de endurecimento

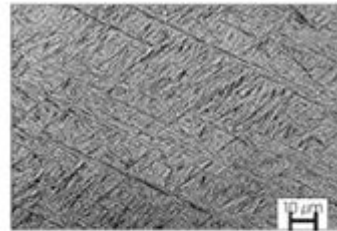
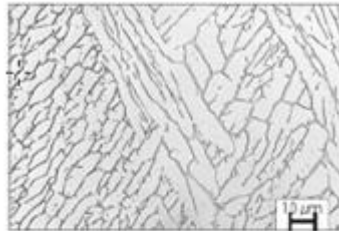
encontrado em ligas de titânio devido à transformação martensítica é somente moderado [Peters et al., 2003].



(a)

Resfriamento em forno

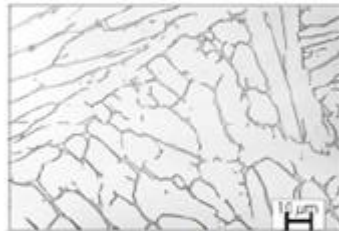
Resfriamento em água - têmpera



(b)

A partir de 1050 °C

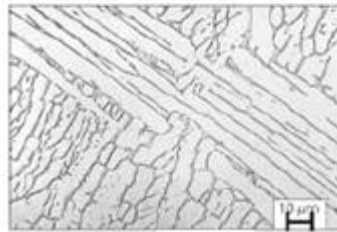
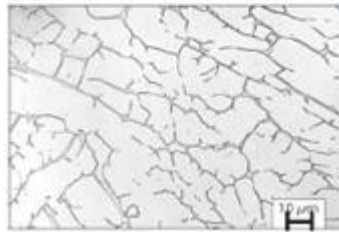
(c)



(d)

A partir de 800 °C

(e)



(f)

A partir de 650 °C

(g)

Figura 2.7. Diagrama de fases das ligas Ti-6Al-V (a) e microestrutura da liga Ti-6Al-4V após resfriamento lento (b), (d) e (f) e resfriamento rápido (c), (e) e (g) [Peters et al., 2003].

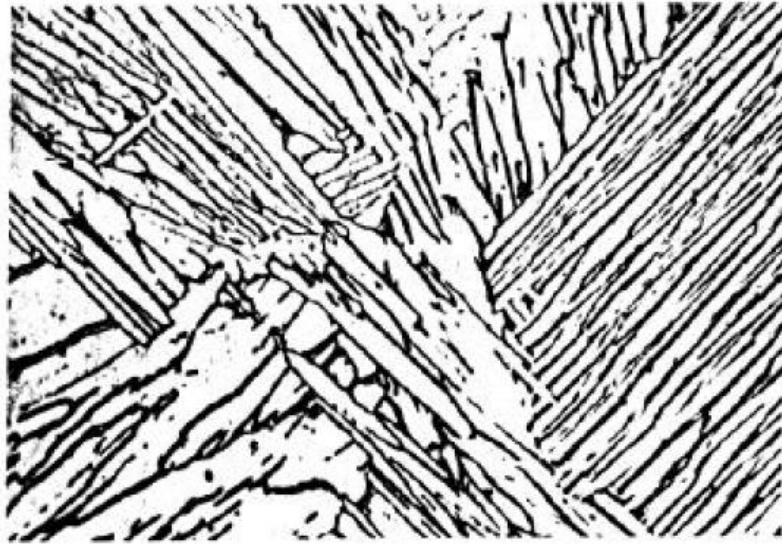


Figura 2.8. Estrutura Widmanstätten [Barbieri, 2001].

Segundo Peters et al. [2003], os diferentes tipos de microestrutura tem influência direta no comportamento mecânico das ligas de titânio. As microestruturas mais refinadas induzem ao aumento da ductilidade e da resistência mecânica, além de retardar a nucleação de trincas e ser um pré-requisito para grandes deformações plásticas. Em contrapartida, as microestruturas mais grosseiras possuem uma maior resistência à fluência e inibem o crescimento de trincas sob fadiga. Dessa maneira, as microestruturas lamelares possuem uma maior tenacidade à fratura e mostram uma maior resistência à fluência e ao crescimento de trincas de fadiga. Já as microestruturas equiaxiais oferecem uma maior ductilidade e resistência à fadiga [Brunette et al., 2001]. Como a microestrutura bimodal combina as vantagens de ambas as microestruturas, lamelares e equiaxiais, ela oferece propriedades mecânicas bastante balanceadas.

### **2.1.3 Aplicações do titânio e suas ligas**

De acordo com Lutjering e Williams [2007], propriedades como alta resistência mecânica, baixa densidade e excelente resistência à corrosão fazem do titânio um material muito atrativo para ser utilizado em uma grande variedade de aplicações. A excelente resistência à corrosão se deve ao fato de que o titânio possui uma grande afinidade com o oxigênio e com isso, mesmo à

temperatura ambiente, uma fina e densa camada de óxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ) se forma sobre toda a superfície do metal. Joshi [2006] cita que as aplicações mais difundidas do titânio são na indústria aeroespacial, aeronáutica, química, na engenharia como um todo e na área biomédica. Na área aeroespacial, o titânio pode ser usado em partes de motores de foguetes, tanques de combustível e reservatórios de gás, por exemplo, graças às propriedades como a alta resistência mecânica aliada ao baixo peso e densidade e boa resistência à fadiga. Também pode ser aplicado em estruturas da fuselagem, barras do trem de pouso, componentes hidráulicos e parafusos, entre outros. Características como alta resistência específica, estabilidade metalúrgica a altas temperaturas e baixas taxas de fluência fazem com que componentes de turbinas aeronáuticas também sejam feitas preferencialmente em titânio e suas ligas. Já em outras áreas de aplicação, como a química e a engenharia, o titânio e suas ligas são bastante utilizados, principalmente devido à sua resistência à corrosão. Para aplicações de baixa solicitação mecânica normalmente utiliza-se o titânio comercialmente puro (Ticp), como por exemplo em pisos de cozinhas e de banheiros aeronáuticos; enquanto que para aplicações que apresentam um maior nível de tensão sob trabalho, devido às cargas mais altas, como no caso de bielas, ligas como a Ti-6Al-4V ou a Ti-13Nb-13Zr são utilizadas. Na indústria marítima, petroquímica e de exploração de petróleo, novamente o titânio é largamente utilizado devido à sua fantástica resistência à corrosão em água salgada e em atmosferas com hidrocarbonetos ácidos. Outra área em que o titânio é empregado em larga escala é a área biomédica. Próteses dentárias, implantes ortopédicos e válvulas do coração são apenas algumas aplicações nas quais o titânio comercialmente puro (Ticp), a liga Ti-6Al-4V e a liga Ti-6Al-7Nb são empregados. Segundo Pinto [2005], o titânio é largamente utilizado na área dos biomateriais devido à sua biocompatibilidade com o corpo humano. Essa biocompatibilidade ocorre por causa da formação da camada de óxido bastante estável na superfície, que faz com que o titânio tenha uma elevada resistência à corrosão quando exposto aos fluidos corpóreos e aos tecidos. A Figura 2.9 mostra um panorama geral das características do titânio e suas aplicações.



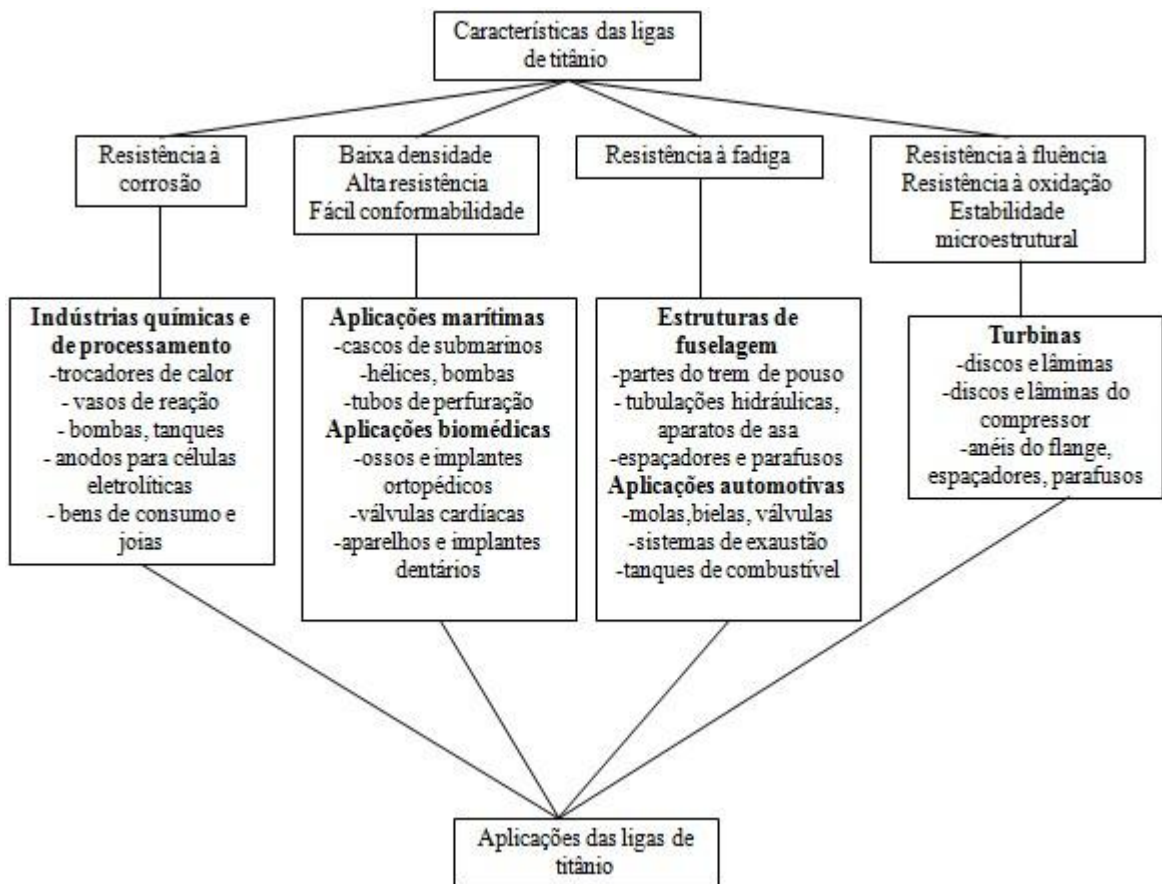


Figura 2.9. Características gerais e aplicações das ligas de titânio [Adaptada de Joshi, 2006].

Em outros setores, como o de esportes e lazer, o titânio e suas ligas são também bastante utilizados. Segundo Peters et al. [2003], o titânio é empregado não somente em equipamentos ou aparatos esportivos de alta performance, mas também em artefatos de caráter recreacional. Como exemplos, pode-se citar as cabeças dos tacos de golfe, feitas de ligas como a Ti-6Al-4V e a Ti-3Al-2,5V. Devido à alta resistência mecânica, associada ao baixo peso, boa resistência à corrosão e um baixo módulo de elasticidade, que faz com que as características de amortecimento sejam enaltecidas, ligas como a Ti-3Al-2,5V também são usadas em produtos como raquetes de tênis, tacos de beisebol e tacos de sinuca. O titânio pode ainda ser visto em diversas outras aplicações interessantes como estruturas de bicicletas, equipamentos de mergulho, em facas, em lâminas de esqui e até em ferraduras. Por fim, o titânio também pode ser empregado na indústria automobilística. Por ser o objetivo de estudo desse trabalho, essa aplicação será discutida com mais detalhes na próxima seção.

#### 2.1.4 Emprego do titânio na indústria automotiva

De acordo com Peters et al. [2003], o uso do titânio na indústria automotiva se tornou mais frequente a partir da década de 1950. A demanda por materiais alternativos, que apresentassem diminuição de massa e melhores propriedades mecânicas, fez com que materiais metálicos como o alumínio e o magnésio se tornassem os primeiros metais a serem usados na indústria automotiva, principalmente por causa da combinação de custos não tão elevados e boa resistência mecânica. É justamente por causa do quesito preço, muito maior que outros aços, que o titânio não é utilizado em larga escala na indústria automotiva, no segmento dos veículos de rua. Sua utilização é mais difundida na área de automobilismo.

Comparando-se o titânio, especificamente a liga Ti-6Al-4V, com outros materiais comumente utilizados na indústria automotiva, como o aço 34CrMo4 tratado termicamente, a liga de alta resistência Al7075 (composta por alumínio, zinco e magnésio) e o magnésio forjado AZ80, as ligas de titânio são muito superiores às outras quando um componente estrutural é projetado para uma máxima resistência mecânica ou resistência à fadiga. Porém, se o projeto for direcionado para uma rigidez otimizada, o titânio já não é mais tão indicado, visto que o seu módulo de elasticidade (aproximadamente 108 GPa) é menor do que o módulo das ligas de alumínio (aproximadamente 150 GPa) e de magnésio (aproximadamente 200 GPa). Dessa maneira, as principais aplicações do titânio no automóvel ocorrem nos chassis e nos componentes de motores, ou o *powertrain* (sistemas de motores e transmissão). Possíveis aplicações do titânio e suas ligas em automóveis podem ser vistas na Figura 2.10. A Tabela 2.2 apresenta um histórico das aplicações do titânio em automóveis desde o ano de 1998 até o ano de 2002 [Schauerte, 2003]. A Tabela 2.3 ilustra alguns tipos de ligas de titânio e suas potenciais aplicações, enquanto na Figura 2.11 são apresentados diversos componentes automotivos feitos em titânio e suas ligas.

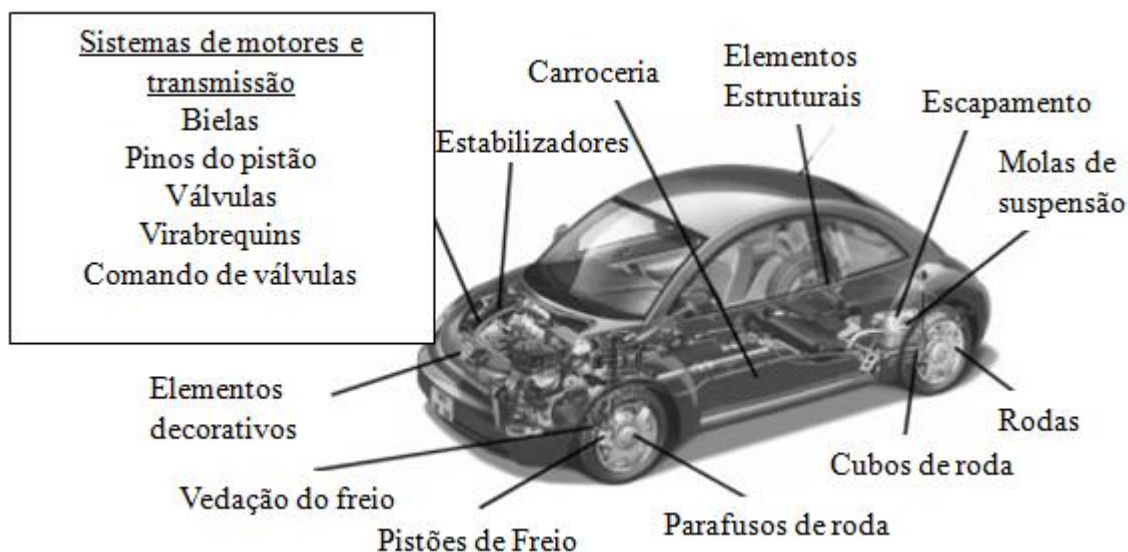


Figura 2.10. Exemplos de possíveis aplicações do titânio em automóveis. Adaptada de Schauerte [2003].

Tabela 2.2. Componentes de produção seriada fabricados em titânio. Adaptada de Schauerte [2003].

Ano	Componente	Material	Fabricante	Modelo	Consumo anual
1998	Pino guia da pinça de freio	Grau 2	Mercedes Benz	Classe S	~ 8 ton/ano
1998	Arruela de vedação do freio	Grau 1s	Volkswagen	todos	~40 ton/ano
1998	Manopla de câmbio	Grau 1	Honda	S2000 Roadster	n/d
1999	Bielas	Ti-6Al-4V	Porsche	GT3	~ 1 ton/ano
1999	Válvulas	Ti-6Al-4V & PM-Ti	Toyota	Altezza	n/d
1999	Rotores do turbocompressor	Ti-6Al-4V	Mercedes Benz	camionete a diesel	n/d
2000	Molas de suspensão	LCB	Volkswagen	Lupo FSI	~ 3-4 ton/ano
2000	Válvulas	liga de titânio $\beta$	Mitsubishi	todos 1.8 L - 4 cilindros	n/d
2000	Rotores do turbocompressor	liga TiAl fase $\gamma$	Mitsubishi	Lancer	n/d
2001	Sistema de exaustão	Grau2	General Motors	Corvette Z06	>150 ton/ano
2002	Válvulas	Ti-6Al-4V & PM-Ti	Nissan	Infiniti Q45	n/d

Tabela 2.3. Uso do titânio e suas ligas na produção automotiva. Adaptada de Schauerte [2003].

Liga	$\sigma_u$ (MPa)	$\sigma_e$ (MPa)	$\Delta l$ (%)	Aplicações em potencial
Ticp grau 1	~ 300	~ 250	30	abafador, arruela da vedação de freio
Ticp grau 2	~ 450	~ 380	22	sistema de vedação, elementos de design
Ti-6Al-4V	~ 1050	~ 950	10	bielas, válvulas de admissão, cubos de roda
Ti-6Al4Sn4Zr1Nb1Mo0.2Si	n/d	1150	4	válvulas de exaustão
Ti-4,5Fe6,8Mo1,5Al	1290	1380	10	molas de suspensão, molas de válvulas, parafusos
$\gamma$ Ti-46,8Al1Cr0,2Si	525	410	~ 2	válvulas, rotor de turbocompressor, pinos do pistão

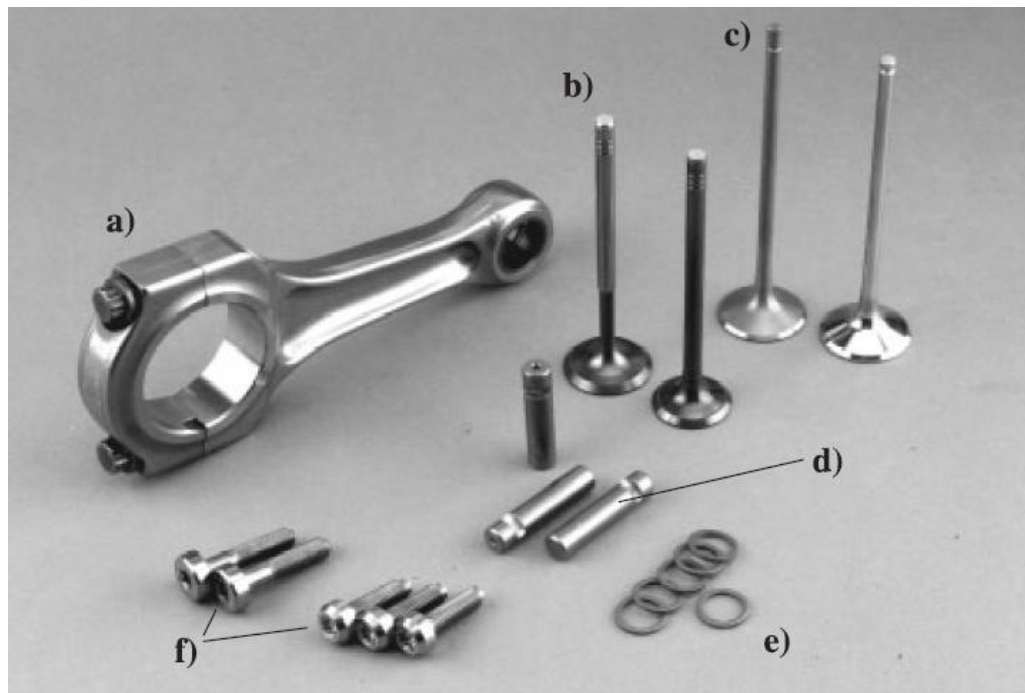


Figura 2.11. Exemplos de aplicações do titânio em componentes de automóveis e motocicletas: biela de Ti-6Al-4V da Ducati (a), válvula de admissão (Ti-6Al-4V) e escape (liga quase  $\alpha$  reforçada com partículas TiB) (b), válvulas com e sem recobrimento feitas de liga TiAl de fase  $\gamma$  (c), pinos de freio feitos de titânio puro grau 2 da Mercedes-Benz (d), anéis de vedação para tubos de pressão de freios produzidos em titânio puro grau 1 (Volkswagen) (e) e parafusos de rodas feitas de Ti-6Al-4V da BBS (f). Adaptada de Schauerte [2003].

O titânio é comumente utilizado na produção de bielas automotivas. A biela é o componente que tem a função de transformar o movimento alternativo do pistão em movimento rotativo. Esse componente do motor será discutido com maiores detalhes na seção 2.2. No mercado de carros de luxo e carros esportivos, bielas feitas de titânio são bastante comuns nos motores originais de fábrica ou em peças de reposição em marcas como a Ferrari e a Porsche. As montadoras estão dispostas a utilizar materiais mais caros caso eles contribuam para a redução das massas rotativas e principalmente oscilantes no motor. Porém, no caso da biela, somente um terço de sua massa é considerada como sendo oscilante e somente uma parte de sua geometria é projetada visando um alto limite de resistência à fadiga. Na região do olhal maior da biela, a rigidez é a principal causa de preocupação e interesse, visto que uma ovalização excessiva nessa região, quando sob carregamentos cíclicos, causa abrasão e eventualmente falha na bronzina. Além disso, as bielas de titânio são bastante sensíveis nessa região, devido à reduzida expansão térmica relativa ao virabrequim e aos pinos do pistão, provocando uma necessidade de maior folga do mancal. Devido a todos esses motivos mencionados, as reduções de peso em bielas feitas de ligas de titânio só chegam a 20%. Vale mencionar que devido às propriedades mecânicas das ligas de titânio serem muito superiores em relação a outros aços, é possível otimizar estruturalmente os componentes mecânicos para que eles mantenham a sua funcionalidade, mas apresentando uma menor massa devido ao “enxugamento” de material em regiões menos solicitadas. Além disso, também vale citar que o titânio possui uma resistência ao desgaste mais baixa, o que faz com que algumas áreas necessitem de recobrimento. Como exemplo pode-se citar o recobrimento de PVD-CrN das bielas da Ducati. Além das bielas, outros componentes interessantes feitos de titânio são as válvulas, molas de suspensão, cubos de rodas, mangas de eixo, componentes de carroceria e etc [Schauerte, 2003; Faller e Froes, 2001; Sachdev, 2012].

## **2.2 Biela – conceitos básicos**

De acordo com Reif [2011] e Chacon [2006], a biela em motores automotivos de combustão interna tem a função de ligar o pistão ao virabrequim e transformar o movimento alternativo linear dos pistões em movimento rotativo.

Assim, Reif [2011] diz que a biela transmite as forças de combustão provenientes do pistão e as forças de inércia introduzidas nos pinos do pistão para os moentes do virabrequim. Dessa maneira, a biela está sujeita às tensões trativas, compressivas e de flexão. Por isso, a biela deve ser projetada com o intuito de possuir a máxima rigidez, principalmente na região dos olhais maior e menor (Figura 2.12), pois essas regiões acomodam os mancais. Por essas razões, normalmente utilizam-se almas da biela em formato de “duplo T”. As bielas normalmente são feitas de aços forjados e tratadas termicamente nos casos de aplicações em que a pressão de combustão é alta, como por exemplo em motores de ciclo Otto de alta performance ou motores de ciclo Diesel. Materiais sinterizados também são bastante utilizados em bielas menores, enquanto para aplicações que necessitam de baixa carga (motores a gasolina), o ferro fundido também pode ser utilizado.

A biela pode ter o formato reto (Figura 2.12) ou pode ser angulada (Figura 2.13) na região do olhal maior. O seu comprimento é definido pelo curso do pistão e nos casos em que o motor é muito grande, as bielas anguladas têm como vantagem a possibilidade de serem removidas sem que o virabrequim seja retirado do motor [Reif, 2011].

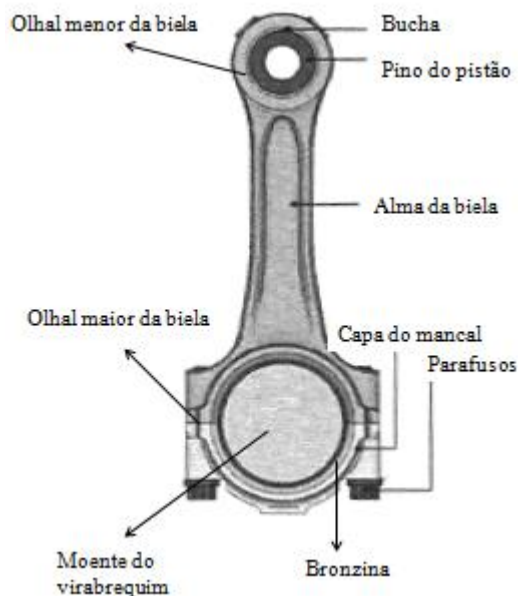


Figura 2.12. Nomenclatura da biela. Adaptada de Londhe, Yadav e Sen [2009].

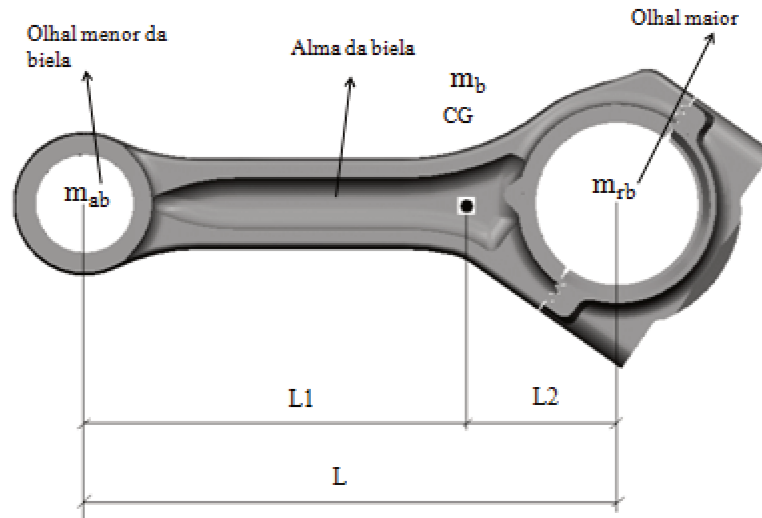


Figura 2.13. Biela angulada e posição do centro de gravidade (CG) da biela. Adaptada de Mendes [2005].

Segundo Mendes [2005], a divisão de massas da biela ocorre de acordo com as Equações 2.1 e 2.2. Normalmente, a posição do CG das bielas é aproximadamente um terço do comprimento total ( $L$ ) (Figura 2.13), considerando o centro do olhal maior como referência. Assim, a massa do olhal menor da biela, considerada como alternativa ( $m_{ab}$ ) depende da massa total da biela ( $m_b$ ), da distância do CG até o centro do olhal maior ( $L_2$ ) e do comprimento total. A massa do olhal maior da biela, representada como a que irá descrever o movimento rotativo ( $m_{rb}$ ) dependerá também da massa total da biela ( $m_b$ ), da distância do CG até o centro do olhal menor ( $L_1$ ) e do comprimento total.

$$m_{ab} = \frac{m_b \cdot L_2}{L} \quad (2.1)$$

$$m_{rb} = \frac{m_b \cdot L_1}{L} \quad (2.2)$$

A AVL [2011] e Reif [2011] dizem que a massa oscilante total ( $m_{ot}$ ) no olhal menor da biela é composta pela massa do pistão, a massa do pino do pistão e um terço da massa da biela. No olhal maior, além de se considerar a mesma massa oscilante total, considera-se também a massa rotativa total ( $m_{rt}$ ), composta de dois terços da massa total da biela e a massa do mancal do virabrequim que entra em contato com a biela (moente). Essas distribuições de massas são

bastante importantes, visto que a biela é projetada com base nas cargas de combustão e de inércia. A cinemática do mecanismo biela-manivela, segundo AVL [2011], Reif [2011] e Mendes [2005], pode ser vista na Figura 2.14 e 2.15 e nas Equações 2.3 a 2.6.

Durante a combustão, a biela sofre ação da força lateral do pistão ( $F_n$ ) e da força proveniente da pressão de combustão da câmara dos cilindros que atua sobre a superfície superior do pistão ( $F_g$ ). A equação 2.3 mostra que a  $F_g$  (força no pistão) é dependente do diâmetro do pistão ( $D$ ) e da pressão de combustão ( $P$ ). A força que atua na biela ( $F_b$ ) é resultado de uma análise vetorial (equação 2.4) e pode ser decomposta na força tangencial ( $F_t$ ) e na força radial ( $F_r$ ). Dessa maneira, de acordo com Lima e Silva [2013], após manipulações matemáticas e geométricas, a máxima força de compressão vista pela biela ( $F_{mc}$ ) será uma composição da máxima força devido a combustão ( $F_g$ ) e das forças de inércia devido ao movimento oscilante ( $F_o$ ), como pode ser visto pela equação 2.5, onde  $m_{ot}$  é a massa oscilante total,  $\lambda$  é a relação  $R$  (meio curso do pistão ou raio do virabrequim) sobre  $L$  (comprimento total da biela) e  $\omega$  é a velocidade angular do virabrequim. A máxima força de tração ( $F_{mt}$ ) é a soma da força de inércia rotativa total ( $F_R$ ) com a força de inércia oscilante total ( $F_o$ ).

$$F_g = \frac{P \cdot \pi \cdot D^2}{4} \quad (2.3)$$

$$F_b = \frac{F_g}{\cos(\beta)} \quad (2.4)$$

$$F_{mc} = -F_g + F_o = -\frac{P \cdot \pi \cdot D^2}{4} + m_{ot} \cdot R \cdot \omega^2 \cdot (1 + \lambda) \quad (2.5)$$

$$F_{mt} = F_R + F_o = m_{rt} R \cdot \omega^2 + m_{ot} \cdot R \cdot \omega^2 \cdot (1 + \lambda) \quad (2.6)$$

A biela, de acordo com Reif [2011], na sua fase de desenvolvimento de produto, também é analisada levando em conta as suas cargas de flambagem. As regiões mais críticas também são redimensionadas utilizando análises de elementos finitos.



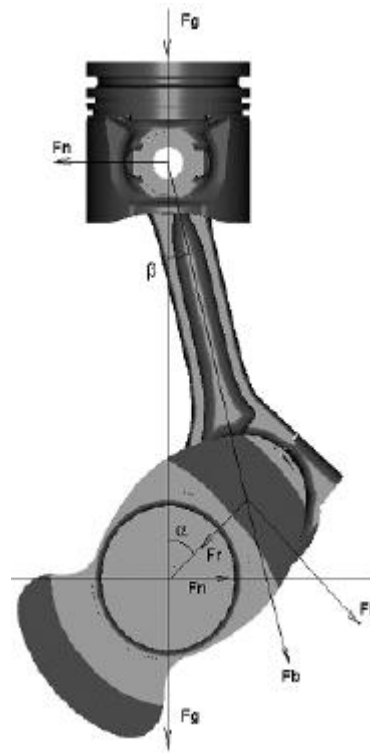


Figura 2.14. Forças atuantes no mecanismo biela-manivela. [Mendes, 2005].

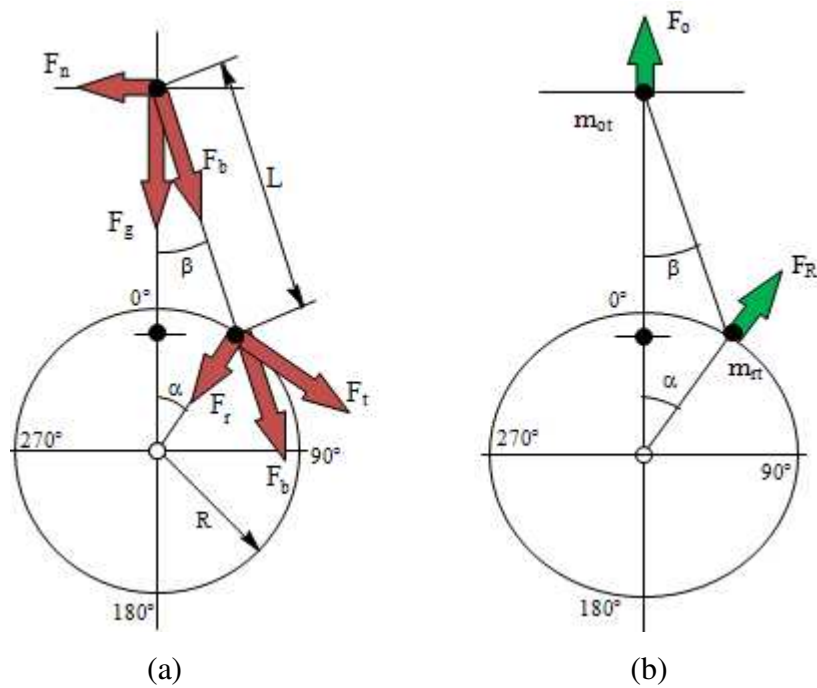


Figura 2.15. Forças atuantes no mecanismo biela-manivela devido à combustão (a) e inércia dos componentes (b).

### 2.3 Método dos elementos finitos – conceitos básicos

Segundo Pavanello [1997], é uma tarefa difícil se obter uma definição única, simples e completa que englobe todos os conceitos do Método dos Elementos Finitos (MEF). Existem diversas definições de vários autores diferentes. Uma definição mais genérica, de Touzot e Dhat Apud Pavanello [1997], que realça o aspecto computacional do método diz que o método dos elementos finitos é um procedimento numérico para análise de estruturas e meios contínuos. Uma outra definição, de Cook, Malkus e Plesha Apud Pavanello [1997], que enfatiza o lado matemático, afirma que esse método é uma técnica utilizada para a obtenção de soluções aproximadas de equações diferenciais.

O método dos elementos finitos pode ser empregado para resolver algum tipo de problema praticamente em todos os campos da engenharia [Bathe, 1996]. Análises de sólidos e estruturas, transferências de calor e fluxos de fluidos são as principais aplicações desse método [Logan, 2002]. Pavanello [1997] e Reif [2011] citam que atualmente, as indústrias aeroespacial, aeronáutica, nuclear, automobilística, bio-mecânica, entre muitas outras, têm utilizado bastante o MEF como ferramenta essencial para a resolução de problemas e desenvolvimento de produtos.

Portanto, generalizando, o método dos elementos finitos foi criado com o intuito de se resolver problemas de mecânica que não admitem soluções fechadas (de forma analítica). Ou seja, esse método tem como base aproximações do tipo polinomial nodal em subdomínios, implicando em processos de discretização dos domínios, que podem ter geometrias irregulares arbitrárias [Pavanello, 1997]. As soluções matemáticas analíticas geralmente requerem uma solução de equações ordinárias ou parciais que não são usualmente obtidas, devido às geometrias complexas, carregamentos e propriedades de material. Assim, é necessário recorrer a métodos numéricos, como o MEF, para se obter soluções aceitáveis que resolvem simultaneamente sistemas de equações algébricas ao invés da obtenção das equações diferenciais [Logan, 2002].

De acordo com Logan [2002] e Pavanello [1997], o método dos elementos finitos é baseado na discretização, ou seja, transformar um problema complexo na combinação de diversos problemas mais simples, dividindo, por exemplo, um corpo em um sistema equivalente de diversos corpos menores ou unidades (elementos finitos) interconectados por pontos comuns a dois ou mais elementos (nós).

Um modelo genérico de elementos finitos pode ser visto na Figura 2.16, onde o domínio foi discretizado em diferentes tipos de elementos formados por pontos chamados de nós.

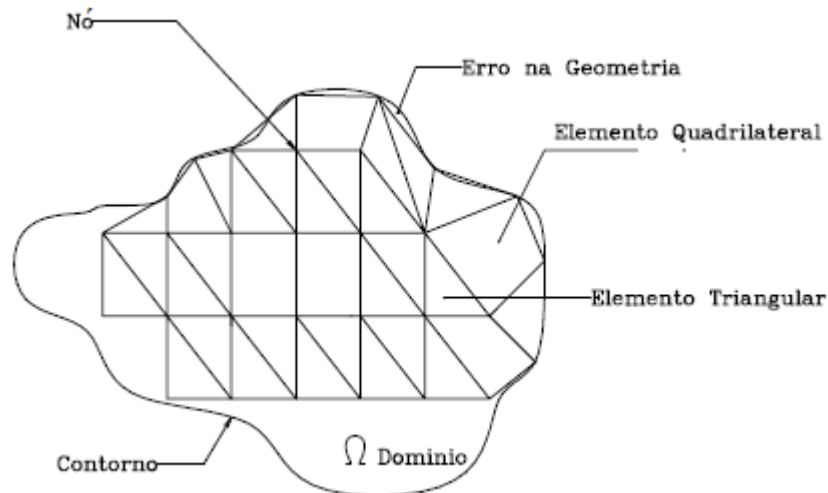


Figura 2.16. Modelo genérico de elementos finitos [Pavanello, 1997].

Ou seja, de acordo com [Bathe, 1996], o MEF é usado para resolver problemas físicos em análises de engenharia através da transformação dos problemas físicos em modelos matemáticos. Mas, como a solução desse método é numérica, é necessário se avaliar a precisão da solução para que esta seja atendida.

Os tipos de análises de elementos finitos, segundo Reif [2011], podem ser classificados como problemas lineares e não lineares estáticos e dinâmicos, com incógnitas como tensões, deformações e comportamentos dinâmicos; problemas transientes e independentes do tempo, relacionados a diferenças de potencial, como problemas térmicos, acústicos e eletromagnéticos e; uma combinação desses dois campos diferentes, como por exemplo o cálculo do campo de temperatura e as deformações e tensões resultantes em componentes de um motor quando esse é acionado, através de análises estáticas.

Os tipos e propriedades de elementos definem os dados mais importantes de desempenho de um programa de elementos finitos. Reif [2011] diz que a qualidade dos elementos é determinada pelo grau de funções e formulações matemáticas selecionadas. Os elementos podem ser divididos basicamente em quatro grupos, sendo o de ponto, de linha, de casca e sólido ou de volume. Dependendo do tipo de análise desejada, determinados elementos são mais indicados. A Figura 2.17 mostra elementos de casca triangulares e quadrangulares. Para se obter mais precisão

nos resultados, elementos com nós localizados no centro das arestas podem ser utilizados. A Figura 2.18 mostra um elemento sólido tetraédrico, de 10 nós e um elemento hexaédrico de alta ordem (20 nós). Para geometrias muito complexas, pode não ser possível o uso de elementos hexaédricos, que promovem uma maior precisão nos resultados.

Assim, pode-se utilizar elementos tetraédricos em uma maior densidade como forma de compensação. Vale lembrar que os elementos gerados para a realização da análise devem atender a diversos critérios de qualidade (razão de aspecto, jacobiano, etc) presentes em pacotes computacionais para se obter resultados confiáveis [Ansys, 2010].

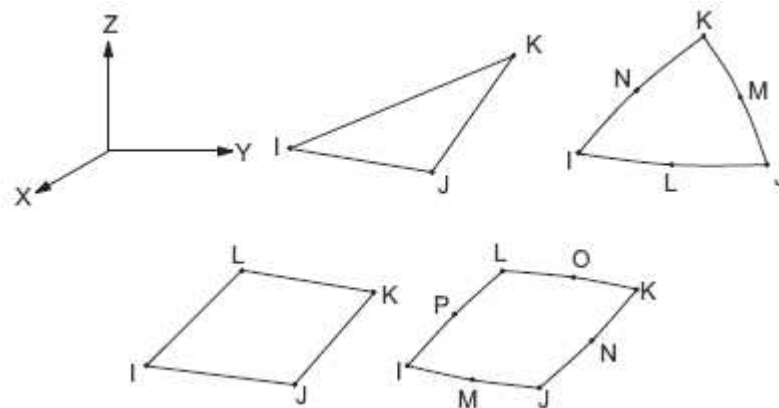


Figura 2.17. Elementos de casca triangulares e quadrangulares [Ansys, 2010].

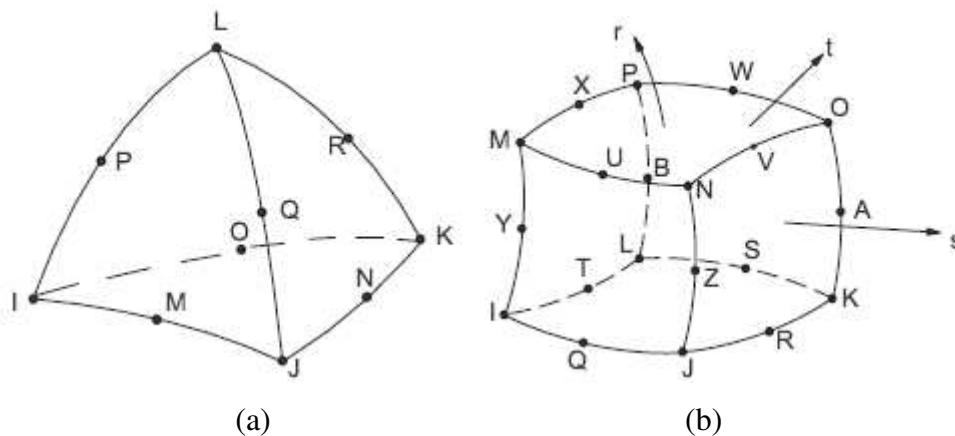


Figura 2.18. Elementos sólidos (3D) tetraédrico (a) e hexaédrico (b) [Ansys, 2010].

Esta seção teve como objetivo apresentar alguns conceitos básicos do Método dos Elementos Finitos. Dessa forma, não foram discutidas formulações e métodos matemáticos que constituem as ferramentas do MEF ou propostas de implementações de novas soluções de elementos finitos. A seção seguinte mostra noções básicas sobre a aplicação deste método em análises de bielas, considerando o MEF já implementado em pacotes computacionais.

### **2.3.1 Análise de elementos finitos de bielas**

A biela, como um componente automotivo essencial, tem sido objeto de intensos desenvolvimentos ao longo dos anos. O MEF constitui um grande auxílio na definição da geometria das bielas que atenda às especificações de projeto. Como exemplo, Webster [1983] já utilizava um modelo de elementos finitos em três dimensões para a realização de cálculos estruturais de bielas. Segundo Webster [1983], Londhe [2009] e Afzal [2004], o modelamento das bielas é feito considerando-se o modelo em três dimensões da biela, capa, buchas e das cargas advindas dos pré-tensionamentos dos parafusos e da interferência das buchas. Pode-se também utilizar a simetria (meio modelo) para reduzir o tempo computacional de análise.

As condições de contorno mais críticas a serem analisadas no desenvolvimento de bielas, para que estas tenham a maior rigidez possível, principalmente na região dos olhais, e também a menor massa, são a tração no olhal menor e maior devido às forças de inércia, e a compressão no olhal maior e menor devido às forças de combustão. Segundo Londhe [2009], a análise de elementos finitos da biela pode ser dividida em duas etapas que são a montagem das buchas e parafusos e a aplicação das cargas de tração e compressão. Para a realização da análise do olhal menor, por exemplo, se promove o engaste em todos os graus de liberdade na região do olhal maior e se aplica as cargas diretamente na superfície do olhal menor ou sobre o pino do pistão. Webster [1983] e Londhe [2009] dizem que o método mais realista é o segundo, devido aos deslocamentos mais precisos. Caso a aplicação de carga seja direta nos olhais, para as cargas de tração, ela deve ser feita numa região que compreende  $180^\circ$  e para a compressão,  $120^\circ$ , como ilustrado na Figura 2.19.

A Figura 2.20 mostra a malha de uma biela angulada (com simetria) com todos os seus componentes montados e um sumário das condições de contorno existentes para análise do olhal menor. A análise do olhal maior é análoga, mas com o moente do virabrequim localizado no olhal maior.

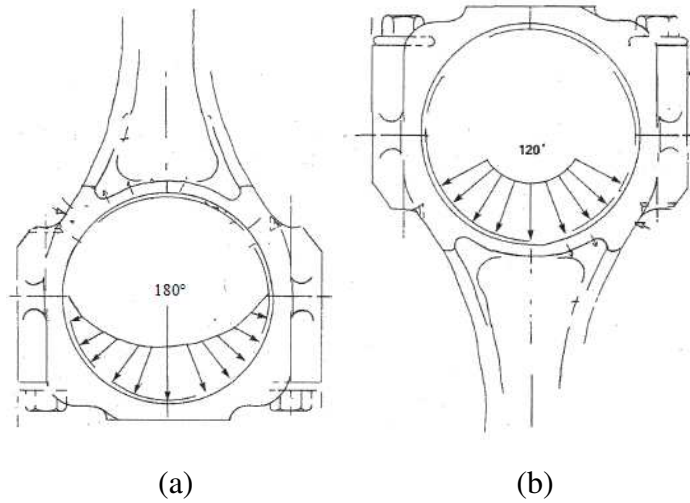


Figura 2.19. Aplicação da carga de tração (a) e compressão (b) [Webster, 1983].

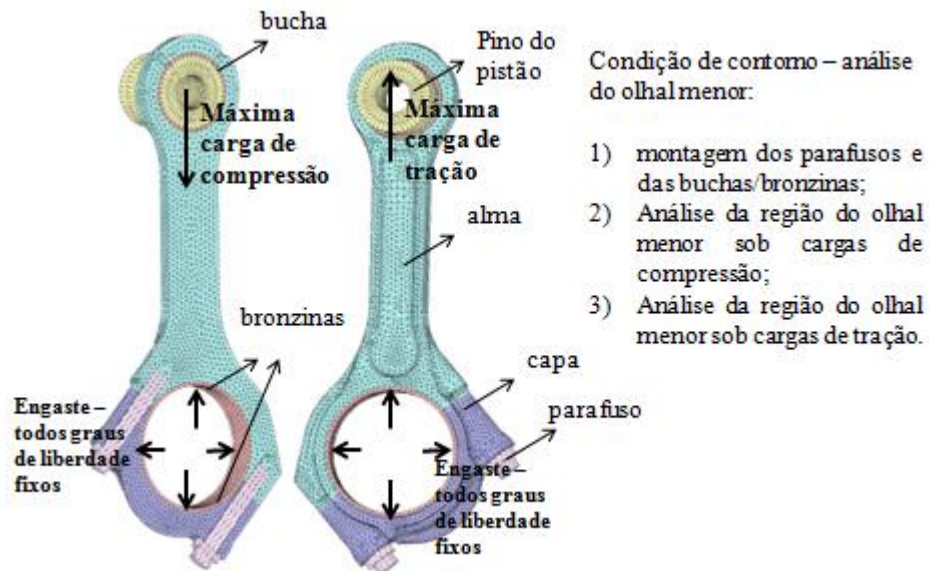


Figura 2.20. Modelo de elementos finitos de uma biela e sua condição de contorno para análise do olhal menor.

## 2.4 Manufatura aditiva ou prototipagem rápida

Segundo Volpato [2007], a manufatura aditiva, também conhecida como prototipagem rápida, pode ser definida como um processo de fabricação que ocorre pela adição de material em forma de camadas planas e de modo sucessivo. A tecnologia da prototipagem rápida permite fabricar componentes físicos (modelos, protótipos, etc), em três dimensões (3D), diretamente a partir de um modelo geométrico CAD. Os componentes ou produtos físicos obtidos podem ser protótipos apenas visuais, protótipos funcionais ou peças finais prontas para serem usadas.

Basicamente, o processo de manufatura aditiva começa com um modelo geométrico 3D da peça sendo cortado eletronicamente em fatias com o intuito de se obter camadas 2D que definirão onde existe ou não material a ser adicionado. Estas camadas serão processadas sequencialmente, gerando assim a peça física através do empilhamento e aderência das mesmas, da base até o topo da peça [Volpato, 2007].

Existem mais de 20 sistemas de prototipagem rápida no mercado, baseados no mesmo princípio de manufatura por camada. Algumas tecnologias visam à obtenção de protótipos direcionados para testes ou provas de conceito, sem o objetivo principal de se obter resistência mecânica e precisão. São as tecnologias conhecidas como modeladores conceituais e que se diferenciam de sistemas que objetivam protótipos mais funcionais [Volpato et al., 2007]. A Tabela 2.4 ilustra alguns dos processos de prototipagem rápida existentes no mercado baseado no estado da matéria prima.

Os principais processos de manufatura aditiva podem ser classificados de acordo com o estado inicial da matéria-prima, que pode ser líquido, sólido ou na forma de pó. Nos processos com matéria-prima líquida geralmente são utilizadas resinas fotocuráveis como a acrílica e o epóxi. Nos processos baseados em material sólido possuem podem ser usados o poliéster, o policarbonato, plástico, papel, cerâmica, tecido, as folhas metálicas e a cera. Nos processos baseados em pó, a gama de materiais utilizados é muito maior do que nos outros dois grupos. Basicamente, qualquer material que possa ser transformado em pó pode ser utilizado. Dentre os mais importantes pode-se citar o náilon, poliamida, cerâmicas, polímeros e metais [Volpato, 2007].

Várias aplicações utilizam a manufatura aditiva como uma ferramenta. Setores como a indústria aeroespacial, automobilística, bioengenharia (compreendendo a medicina e a odontologia), de produtos eletrônicos e elétricos em geral, artes, arquitetura e joalheria já se utilizam dessa tecnologia de construção por camadas [Volpato, 2007]. Silva [2004] estudou o emprego da manufatura aditiva na área de anatomia craniomaxilar, comparando os erros dimensionais de próteses produzidas pela técnica SLS a partir de imagens de tomografia computadorizada, enquanto Cooper et al. [2012] utilizaram a técnica DMLS para otimizar e produzir componentes hidráulicos do segmento automotivo de alto desempenho, fabricando esses componentes com uma redução de massa que promoveu um aumento de funcionalidade da peça em 250%. Ciocca et al. [2011] utilizaram o DMLS para produzir próteses maxilares e Ferreira [2004] estudou o uso do DMLS para a produção de ferramentas de fundição.

Tabela 2.4. Classificação dos processos de prototipagem rápida baseada no estado inicial da matéria prima. Adaptada de Volpato [2007].

Baseado em líquido	Baseado em sólido	Baseado em pó
Estereolitografia - SL ( <i>Stereolithography</i> )	Modelagem por fusão e deposição - FDM ( <i>Fused Deposition Modeling</i> )	Sinterização Seletiva a Laser - SLS ( <i>Selective Laser Sintering</i> )
Impressão a jato de tinta - IJP ( <i>Ink Jet Printing</i> ) - <i>Polyjet</i>	Manufatura Laminar de Objetos - LOM ( <i>Laminate Object Manufacturing</i> )	Sinterização a Laser ( <i>Laser Sintering</i> ) - EOSINT
IJP - <i>Invision</i>	Tecnologia com lâminas de papel - PLT ( <i>Paper Lamination Technology</i> )	Impressão Tridimensional - 3DP ( <i>3 Dimensional Printing</i> )
	IJP - <i>Ther Mojojet</i>	Fabricação de forma final a Laser - LENS ( <i>Laser Engineered Net Shaping</i> )
	IJP - <i>Benchtop</i>	3DP - <i>ProMetal</i>
		Sinterização Direta de Metais por Laser – DMLS ( <i>Direct Metal Laser Sintering</i> ) - EOSINT



De acordo com Volpato [2007], o processo de manufatura aditiva, de uma maneira geral, possui algumas vantagens e desvantagens em relação aos métodos convencionais de fabricação, como por exemplo a usinagem CNC. Algumas vantagens podem ser citadas como:

- Peças de geometrias complexas que não poderiam ser construídas utilizando outros processos podem ser construídas através da manufatura aditiva. Há, portanto, uma independência de complexidade geométrica da peça;
- Não é necessário o uso de dispositivos ou ferramental especial para a fixação das peças, pois as mesmas são fixadas na plataforma de construção através de suportes criados pela própria tecnologia;
- Não há a necessidade de troca de ferramental de trabalho durante o processo. Normalmente, um único meio de processamento é utilizado do início ao fim do processo (normalmente um laser);
- Uma única etapa de processo é necessária para a construção da peça. Às vezes, dependendo da finalidade da peça, do material e do tipo de processo, existe a necessidade de pós-processamento para a melhoria das propriedades mecânicas da peça;
- Não há a necessidade da realização de cálculos muito complexos de trajetórias de ferramentas, uma vez que as trajetórias calculadas nesse tipo de tecnologia ocorrem somente em duas dimensões e;
- Menor tempo para obtenção de protótipos, principalmente os que possuem geometrias mais complexas, quando comparados aos processos tradicionais.

Ainda segundo Volpato [2007], algumas desvantagens da manufatura aditiva em comparação com os métodos de manufatura tradicional são:

- Limitações nas aplicações das peças produzidas pelo método da manufatura aditiva, uma vez que somente alguns materiais estão disponíveis para uso nessa tecnologia. Além disso, em alguns casos, as propriedades mecânicas não são as mesmas dos materiais que são normalmente utilizados;
- Certa anisotropia do material devido ao método de manufatura por camadas;
- Precisão e acabamento superficial inferiores aos das peças obtidas por usinagem. Muitas vezes, dependendo da aplicação, é necessário uma etapa adicional de acabamento superficial em peças geradas pela manufatura aditiva;

- Caso seja necessário a produção de um número maior de peças pelo processo de prototipagem rápida, o custo de produção de tais peças torna-se mais elevado e;
- Por causa da natureza térmica e química de alguns processos, podem ocorrer problemas como empenamento e distorções. Esses problemas vem sendo minimizados de acordo com o desenvolvimento das tecnologias de prototipagem rápida.

#### **2.4.1 Sinterização Direta de Metais por Laser (DMLS)**

Segundo Calignano et al. [2012], Ciocca et al. [2011], Esperto e Osório [2008] e Gu e Shen [2008], a sinterização direta de metais por laser (DMLS) nada mais é do que a produção de peças, camada a camada, através da sinterização de pós 100% metálicos, por ação de um laser. Assim como o processo de sinterização seletiva a laser (SLS), o DMLS não necessita de ligantes e a ação do laser é feita em uma atmosfera inerte, controlada por argônio.

A empresa EOS GmbH, da Alemanha, foi uma das pioneiras a desenvolver o método de sinterização direta de metais por laser. Materiais como as ligas de alumínio, cobre, cobalto, níquel, titânio e aço inoxidável estão disponíveis, sob a forma de pó, para a fabricação de peças sinterizadas.

Segundo Sanz e García Navas [2013] e Cooper et al. [2012], antigamente, técnicas de manufatura por camada existiam com a finalidade de se obter somente protótipos. Porém, com o desenvolvimento de novos materiais metálicos e com a melhoria dos equipamentos de prototipagem rápida, a sinterização direta de metais por laser já consegue fabricar produtos estruturais e funcionais que irão ser solicitados em ambientes e aplicações mais exigentes.

Basicamente, o processo tem início com a geração e construção do modelo 3D desejado em um software CAD. Esses modelos devem ser salvos em formato STL. Neste formato, a geometria é dividida em uma malha triangular. Essa malha deve ser de boa qualidade para que o arquivo STL possa ser convertido para o formato SLI, através de um software próprio da EOS. Através desse arquivo, a geometria é dividida em camadas iguais, no sentido desejado pelo usuário. A espessura pode ser escolhida num intervalo entre 20 e 60  $\mu\text{m}$ . Logo em seguida, esse arquivo é transferido para a máquina de DMLS. De uma maneira geral, a construção física do componente

ocorre com a distribuição do pó metálico sobre uma plataforma de construção. Na sequência, um laser efetua a varredura da área correspondente a uma camada da peça, promovendo a sinterização do material e sua ligação metalúrgica ao suporte (construído anteriormente) caso seja a primeira camada ou à camada anterior que já foi sinterizada. Vale lembrar que após a construção de cada camada, a base onde a peça está sendo construída é rebaixada, no valor da espessura da camada, criando assim condições necessárias para que a próxima camada de pó seja depositada e sinterizada. Esta sequência de operações é repetida até que o pó da última camada seja sinterizado e a geometria física da peça esteja concluída. A Figura 2.21 ilustra um esquema simplificado do funcionamento de uma máquina de DMLS. Após a conclusão do processo, o pó restante não sinterizado é recolhido e introduzido na máquina novamente para uma nova utilização. Os principais parâmetros que influenciam o processo DMLS são a potência do laser, a velocidade de varredura do laser, a distância entre as linhas de varredura e a espessura da camada [Esperto e Osório, 2008].

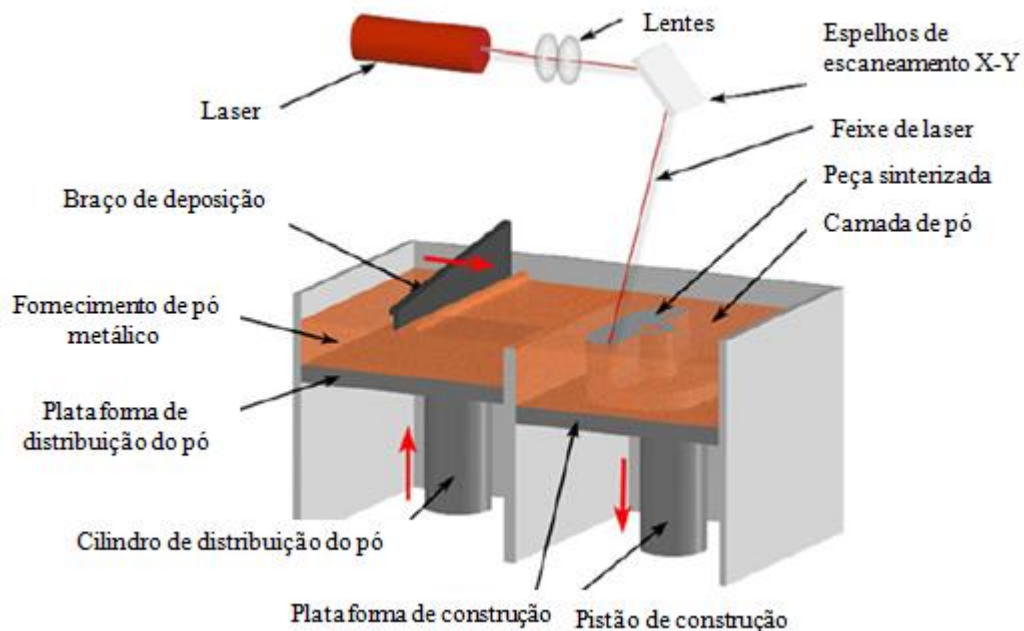


Figura 2.21. Esquema do processo DMLS. Adaptada de Gatto et al. [2012].

O processo DMLS promove transformações bastante complexas no material, uma vez que ocorrem vários fenômenos concomitantes durante a fabricação da peça, como múltiplos modos de transferência de calor, massa e momento, além de inúmeras reações químicas [Simchi, 2006].

Assim, alguns estudos, como os realizados por Simchi [2006] e Liu [2006] tem procurado criar modelos matemáticos que simulem os efeitos científicos e técnicos da sinterização por laser. Porém, os métodos mais usados para o melhor entendimento dos efeitos das variáveis desse processo na qualidade da peça final ainda são os estudos experimentais. Em estudos feitos com ferro (Fe) e cobre (Cu), Simchi [2006] observou que a densidade da peça sinterizada depende das características do pó metálico e dos parâmetros de fabricação. De uma maneira geral, quanto maior a energia fornecida (maior potência de laser, menor velocidade de varredura do laser, menor espaçamento entre as linhas de varredura e menor espessura de camada), maior a densidade obtida.

De acordo com Shellabear e Nyrrhilä [2004], por muitos anos, os sistemas de DMLS utilizaram lasers de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) ou neodímio (Nd). Porém, devido à necessidade de se atingir maiores precisões dimensionais nas peças e uma maior qualidade de maneira geral, graças ao desenvolvimento dos materiais e dos processos de fabricação, esses tipos de laser se tornaram obsoletos. Dessa forma, os últimos equipamentos de DMLS utilizam lasers de fibra ou de disco, que oferecem uma qualidade de feixe muito melhor. Além disso, esses lasers também possuem um comprimento de onda menor do que os lasers de CO<sub>2</sub>, o que resulta em um poder efetivo maior, além de velocidades de construção maiores.

A orientação das peças também constitui um aspecto fundamental na avaliação das propriedades mecânicas das peças obtidas por DMLS. Delgado, Ciurana e Rodríguez [2012] avaliaram as diferenças nas propriedades mecânicas de peças de um material baseado em ferro, similar ao aço inoxidável, construídas a partir de diferentes orientações. A Figura 2.22 mostra a orientação de acordo com o sistema de coordenadas da plataforma de construção. Neste processo, a direção de construção da peça é normal a plataforma (direção z). Os resultados do estudo realizado por Delgado, Ciurana e Rodríguez [2012] indicaram que a peça 1 apresentou melhores propriedades mecânicas quando comparadas à peça de número 3, como uma maior resistência à tração (841 e 773 MPa) e uma maior dureza (114 e 95 HRB).

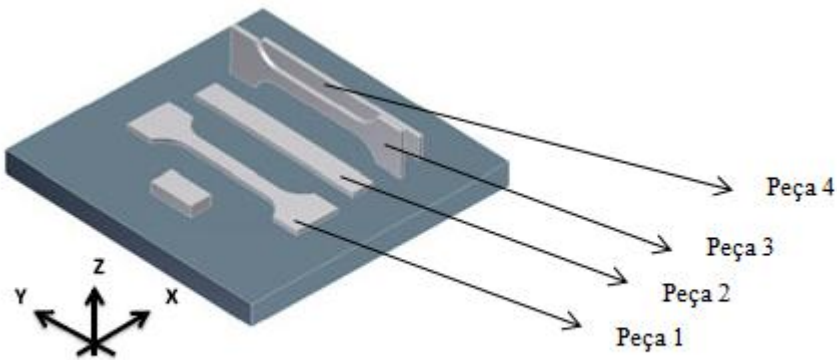


Figura 2.22. Diferentes orientações de corpos de prova sobre a plataforma de construção da máquina de DMLS . Adaptada de Delgado, Ciurana e Rodríguez [2012].

Segundo Yu [2005], propriedades como a precisão dimensional, a resistência mecânica, o tempo de processamento, a rugosidade superficial e o custo são as principais propriedades com as quais o usuário precisa se preocupar ao construir uma peça utilizando o método DMLS.

O DMLS também possui algumas desvantagens que requerem cuidados especiais no controle do processo. Segundo Calignano et al. [2012], devido aos altos gradientes de temperatura e taxas de densificação durante o processo, altas tensões internas são geradas, causando distorções na peça. Além disso, a formação e o acúmulo de impurezas na área de trabalho podem induzir a uma rugosidade superficial ruim. Os estudos de Calignano et al. [2012] indicam que a rugosidade superficial pode ser diminuída utilizando baixas velocidades de varredura, baixa potência e pequena distância entre as linhas de varredura. Dentre esses parâmetros, a velocidade de varredura foi o que mais influenciou no acabamento superficial. O jateamento de esferas também foi estudado como um processo complementar, sendo uma operação adicional ao DMLS para reduzir em mais de 50% a rugosidade superficial. Segundo Delgado, Ciurana e Rodríguez [2012], o acabamento superficial da peça é melhor na superfície de topo, paralela à plataforma de construção (plano X-Y), quando comparada com a superfície lateral da peça, perpendicular à plataforma de construção (plano Y-Z). Bertol et al. [2010] variaram a velocidade de varredura do laser e o espaçamento entre as linhas de varredura, obtendo melhores resultados de densidade relativa para valores menores desses dois parâmetros.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O material estudado neste trabalho foi a liga Ti-6Al-4V laminada e recozida (comercial) e prototipada por DMLS. A liga Ti-6Al-4V comercial foi adquirida da empresa Realum Indústria e Comércio de Metais Puros e Ligas Ltda., sob a forma de barra laminada com diâmetro de 12,7 mm e 100 mm de comprimento, no estado recozido. A composição química e as propriedades mecânicas da liga laminada fornecidas pelo fabricante são apresentadas na Tabela 3.1. A composição química da liga laminada está de acordo com as especificações da norma ASTM F136 [2012].

Tabela 3.1. Composição química e propriedades mecânicas da liga Ti-6Al-4V laminada.

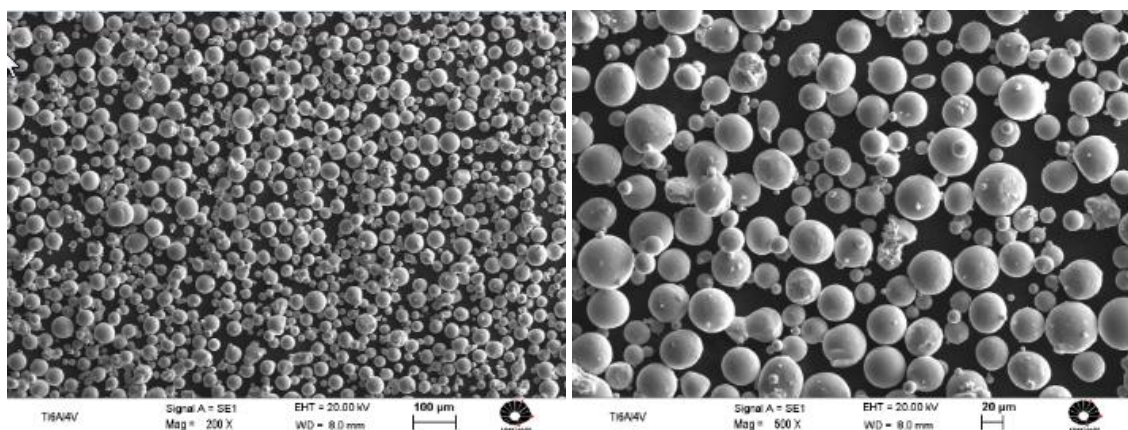
Composição química fornecida pelo fabricante		Composição química – Norma ASTM F136 [2012]		Propriedades mecânicas fornecidas pelo fabricante	
Elemento	% em peso	Elemento	% em peso	$\Delta l$ (%)	15
Al	6,00	Al	5,50 – 6,50	Red. em área (%)	46
C	0,008	C	0,08	$\sigma_u$ (MPa)	1013
Fe	0,20	Fe	0,25	$\sigma_e$ (MPa)	917
H	0,0029	H	0,012		
N	0,004	N	0,05		
O	0,10	O	0,13		
V	4,00	V	3,50 – 4,50		
Ti	Balanço	Ti	Balanço		

Para a produção das amostras através da prototipagem rápida, foi utilizado o pó comercial da liga Ti-6Al-4V produzido pela empresa EOS GmbH. Esse material foi cedido pelo Instituto de Biofabricação (INCT-BIOFABRIS) e, de acordo com o fabricante, o diâmetro médio de partícula é de 50  $\mu\text{m}$  e sua rugosidade Ra (rugosidade média aritmética) é de 9 – 12  $\mu\text{m}$  e a Rz (rugosidade média entre os cinco maiores e menores valores) é de 40 – 80  $\mu\text{m}$ , segundo as especificações

técnicas da EOS [2013]. A composição química e as densidades relativa e absoluta do pó são mostradas na Tabela 3.2. Na Figura 3.1, é possível observar que as partículas do pó da liga Ti-6Al-4V possuem uma morfologia esférica. A parte experimental deste trabalho encontra-se dividida nas etapas representadas no fluxograma da Figura 3.2.

Tabela 3.2. Composição química e densidades do pó da liga Ti-6Al-4V segundo a especificação da EOS [2013].

Composição do material
Al (5,5 – 6,75 peso-%)
V (3,5 – 4,5 peso-%)
O (< 2000 ppm)
N (< 500 ppm)
C (< 800 ppm)
H (< 150 ppm)
Fe (< 3000 ppm)
Ti (balanço)
Densidade relativa
Aproximadamente 100%
Densidade absoluta
4,41g/cm <sup>3</sup>



(a)

(b)

Figura 3.1. Morfologia do pó da liga Ti-6Al-4V. Aumentos de 200x (a) e 500x (b).

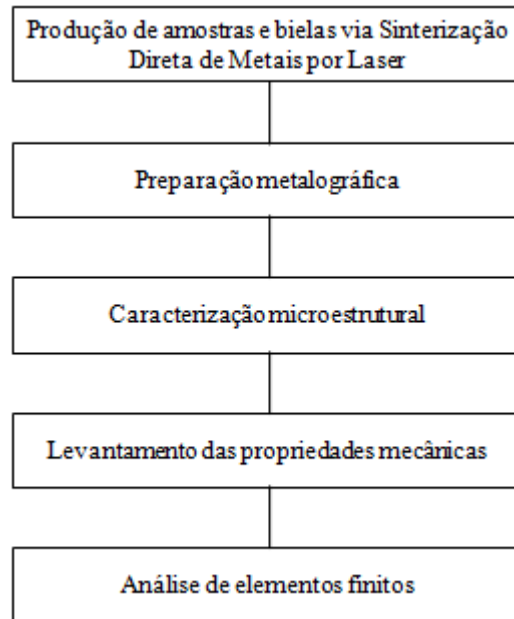


Figura 3.2. Fluxograma das etapas envolvidas na parte experimental.

### **3.1 Produção de corpos de prova, amostras e bielas via Sinterização Direta de Metais por Laser**

Várias amostras cilíndricas com 10 mm de diâmetro x 10 mm de altura, corpos de prova de tração e três bielas em escala foram produzidos pelo processo de Sinterização Direta de Metais por Laser (DMLS), utilizando a máquina EOSINT M270 da EOS GmbH pertencente ao Instituto de Biofabricação, localizado na Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP (Figura 3.3). Essa máquina é composta de uma câmara de processamento, um sistema de elevação, um sistema óptico com laser de fibra de Yb (itérbio), um sistema de gerenciamento do processamento de gás, um computador com um software que controlará todo o processo e um braço de deposição. As especificações técnicas encontram-se na Tabela 3.3.



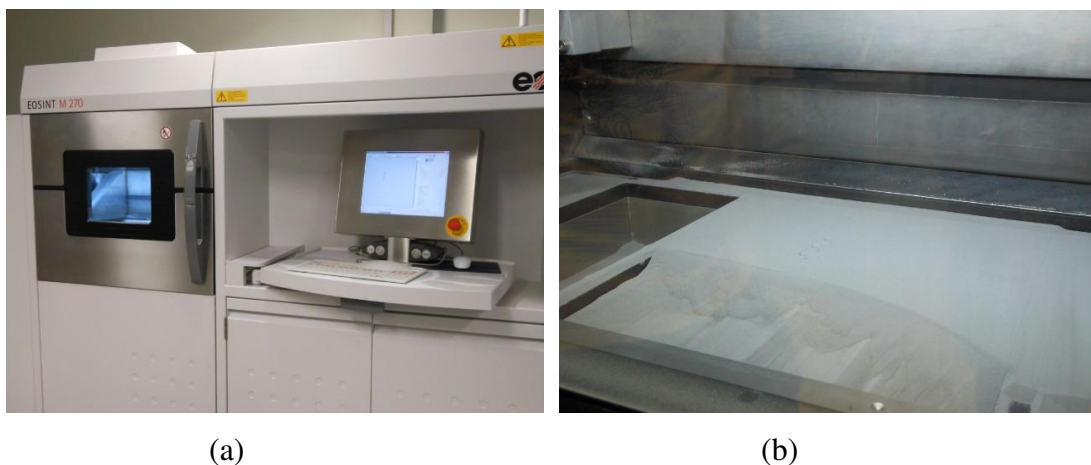


Figura 3.3. Equipamento de prototipagem rápida EOSINT M270 (a) e camada de pó espalhada sobre a plataforma de construção (b).

Tabela 3.3. Especificações do equipamento EOSINT M270 de acordo com a EOS [2013].

Especificações básicas	
Dimensões (comprimento x largura x altura)	2000 mm x 1050 mm x 1940 mm
Peso	1130 kg (sem considerar o pó)
Máximo consumo de potência	5.5 kW
Consumo de ar comprimido	20 m <sup>3</sup>
Tipo de laser	Laser de fibra de Yb (itérbio)
Comprimento de onda do laser	1060 – 1100 nm
Máxima potência nominal do laser	200 W

O software utilizado no processo foi o EOS RP-Tool, que é o software fornecido pelo fabricante. Este software é responsável por converter o modelo CAD de extensão .STL ou .CLI para o formato .SLI, específico do fabricante, e também realizar todas as etapas subsequentes ao processo. Para a prototipagem de metais reativos como a liga Ti-6Al-4V, é necessário utilizar uma atmosfera inerte de gás argônio para controlar e monitorar o nível de oxigênio dentro da câmara. O gás argônio é armazenado num recipiente externo e também tem a função de agir como gás de proteção.

Os parâmetros para realização da prototipagem das amostras cilíndricas, dos corpos de prova de tração e das bielas foram utilizados de acordo com a especificação do fabricante, sendo considerados os parâmetros ótimos para essa aplicação e estão representados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4. Parâmetros de processamento utilizados na realização dos experimentos.

Potência do laser	170 W
Velocidade de varredura do laser	1250 mm/s
Distância entre linhas	100 $\mu\text{m}$
Espessura da camada	30 $\mu\text{m}$

### 3.2 Preparação metalográfica

A barra da liga Ti-6Al-4V laminada e as amostras produzidas via DMLS foram cortadas na seção transversal e longitudinal (Figura 3.4). Para os cortes, foi utilizada a cortadora de precisão Isomet 4000 Precision Saw com disco de corte diamantado, ambos da marca Buehler. Após os cortes, as amostras foram embutidas a quente utilizando o equipamento Arotec Pre30Mi.

O lixamento das amostras foi feito com lixas d'água de granulometria de 100, 220, 300, 400, 600, 800 e 1200. O equipamento utilizado foi a máquina Arotec Aropol 2V com rotação de 600 rpm. A cada mudança de granulometria, as amostras foram rotacionadas em 90°. Antes de se realizar a etapa de polimento, as amostras foram limpas em um equipamento de ultrassom contendo álcool etílico. O polimento foi realizado com suspensão de diamante e pano de 1  $\mu\text{m}$ . Para o polimento final, foi utilizada uma solução de sílica coloidal de 0,04  $\mu\text{m}$  com pH alcalino de 9,8 da marca Struers.

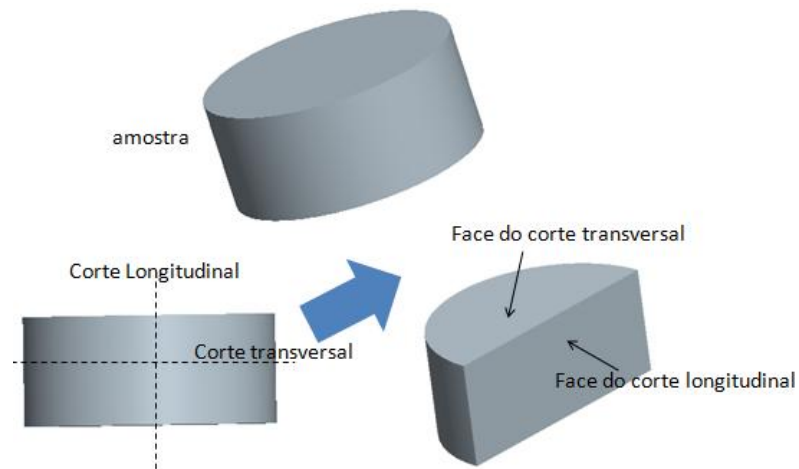


Figura 3.4. Esquema mostrando os cortes longitudinal e transversal das amostras para análise metalográfica.

### 3.3 Caracterização Microestrutural

A caracterização microestrutural das amostras foi realizada através de microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersiva (EDS), análise de densidade e difração de raios-X (DRX).

O microscópio óptico Olympus modelo BX 60M e o software Pro Plus 5.1 da Media Cybernetics pertencentes ao Laboratório de Metalurgia Física e Solidificação do DEMA/FEM/UNICAMP e o microscópio óptico Olympus modelo GX 51 e o software Image-Pro Express da Media Cybernetics pertencente ao Laboratório de Biomateriais e Biomecânica (LABIOMECC) também do DEMA, foram utilizados para a análise porosidade e da microestrutura. O microscópio eletrônico de varredura Zeiss, modelo EVO MA15 e o software Smart SEM, pertencentes ao DEMA, foram utilizados para a visualização da microestrutura das amostras. O ataque químico nas amostras, para a revelação da microestrutura, foi realizado com o reagente Kroll (5% de ácido nítrico e 10% de ácido fluorídrico) por 30s.

Uma análise qualitativa da composição química foi realizada através da técnica de EDS utilizando o espectômetro modelo X-Max da Oxford Instruments e o software Inca Energy.

A análise de densidade foi realizada seguindo o princípio de Arquimedes [Mazali, 2010]. Três amostras diferentes de cada liga, laminada e prototipada, tiveram sua massa seca (massa da amostra) e massa molhada (massa da amostra imersa em água) medidas. As densidades das ligas foram calculadas segundo a Equação 3.1, considerando a densidade da água como 0,9986 g/cm<sup>3</sup> para a temperatura de 18 °C. A média dos valores foi considerada como a densidade final.

$$Densidade = \frac{massa_{seca} \cdot 0,9986}{massa_{seca} - massa_{molhada}} \quad (3.1)$$

A difração de raios-X foi realizada utilizando o Difrátômetro Philips Analytical X-ray modelo X'Pert-MPD e o software X'pert Data Collector, pertencentes ao Laboratório de Recursos Analíticos e de Calibração da Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP. A amostra utilizada para esse ensaio foi lixada até a lixa com granulometria de 1200 e polida com suspensão de diamante de 1 µm. A fonte de radiação utilizada foi a de Cu ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ) e o ângulo de varredura variou de 20° a 100°. Os resultados dos picos de intensidade relativa em relação ao ângulo refratado, presentes nos difratogramas de raios-X, foram comparados com as fichas do Joint Committee of Powder Diffraction Standards (JCPDS) para o titânio, de número de referência 044-1294 para a fase  $\alpha$  e 044-1288 para a fase  $\beta$ .

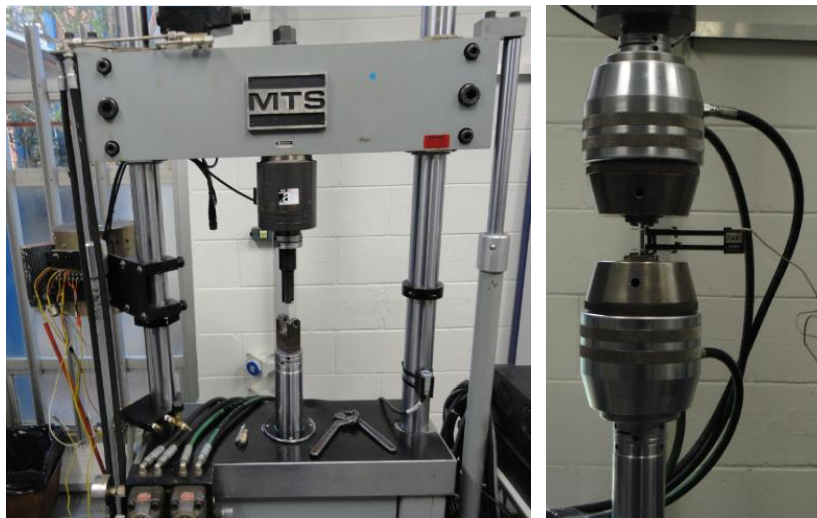
### 3.4 Levantamento das propriedades mecânicas

O levantamento das propriedades mecânicas foi realizado por meio de ensaios de microdureza Vickers e ensaios de tração. Os ensaios de microdureza Vickers foram realizados de acordo com a norma ASTM 384 [2011], utilizando o microdurômetro digital Shimadzu, modelo HMV-2T, pertencente ao LABIOMECC. Foram feitas 20 medições em cada amostra com uma carga de 300 gf, aplicada por 15 s, e o resultado apresentado é a média dos valores. Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos do DEMA, utilizando o equipamento servo hidráulico MTS, modelo 810-FlexTest 40, com célula de carga de 100 kN (Figura 3.5). A norma ASTM E8-E8M [2009] foi seguida para a realização dos ensaios. Foram

usinados três corpos de prova da liga comercial (laminada e recozida) e três corpos de prova foram prototipados por DMLS com as dimensões apresentadas na Figura 3.6.

Os ensaios foram feitos com os três corpos de prova da liga comercial (laminada e recozida) e os três corpos de prova e as três bielas obtidas por DMLS. Através desse ensaio, foram determinados os valores da tensão de escoamento ( $\sigma_e$ ), do limite de resistência à tração ( $\sigma_u$ ), do alongamento ( $\Delta l$ ) e do módulo de elasticidade de Young ( $E$ ).

Com relação ao ensaio de tração da biela, dois pinos foram inseridos nos olhais menor e maior, representando o pino do pistão e o moente do virabrequim. A biela foi localizada de maneira que o olhal menor se movimentasse juntamente com o atuador hidráulico, sendo que a outra extremidade permaneceu fixa. Essa condição foi fielmente simulada na análise de elementos finitos.



(a)

(b)

Figura 3.5. Equipamento servo hidráulico (a) e célula de carga (b) utilizados.

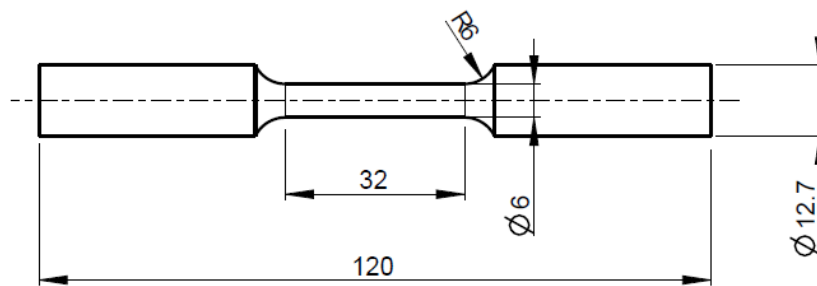


Figura 3.6. Desenho 2D do corpo de prova de tração seguindo a norma ASTM E8-E8M [2009].

### 3.5 Análise de elementos finitos

A geometria da biela foi gerada em uma escala de 40% de aproximação de uma biela automotiva de um motor quatro cilindros de ciclo OTTO. Por indisponibilidade de se considerar uma geometria real de uma biela, foi considerada neste trabalho uma geometria bastante simplificada, com superfícies planas, ausência de características e detalhes de processo, ausência de parafusos e buchas/bronzinas. Ou seja, somente as próprias geometrias da biela e do pino do pistão foram consideradas. A geometria 3D gerada em software CAD da biela e suas dimensões estão consideradas na Figura 3.7.

A análise de elementos finitos foi realizada no software ANSYS Workbench 13.0. Foram utilizados 22.716 elementos hexaédricos de alta ordem e 105.319 nós na biela (0,5 mm de tamanho de elemento) e 11.660 elementos e 50.315 nós no pino do pistão (Figura 3.8).

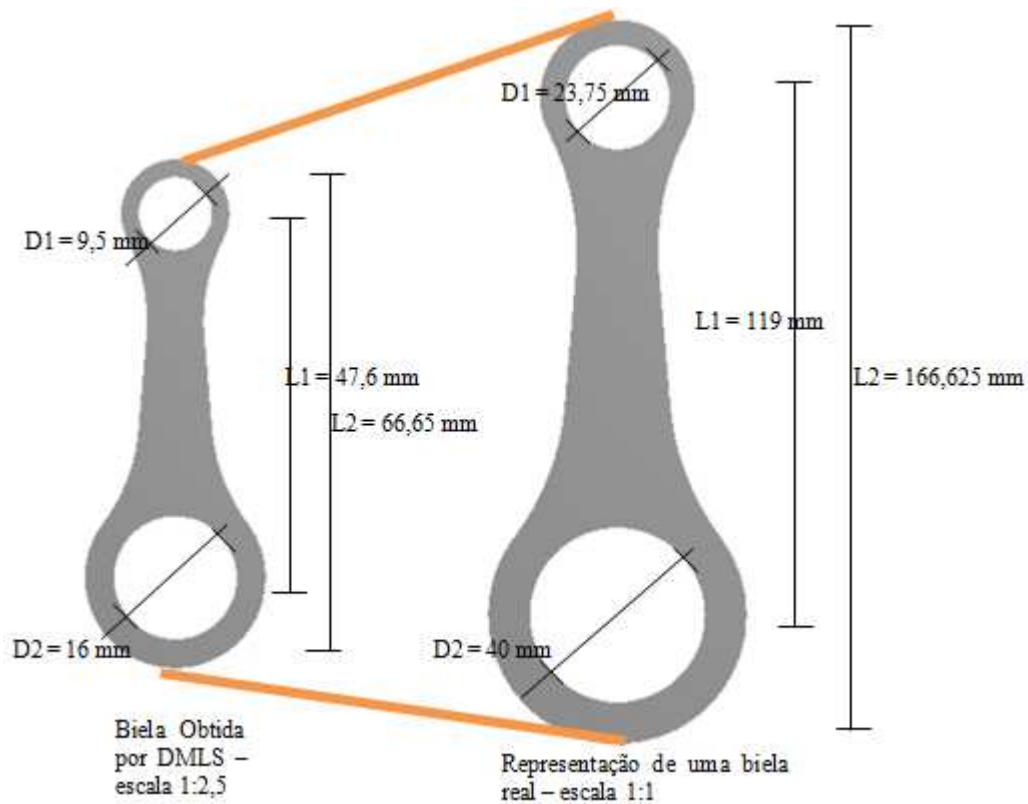


Figura 3.7. Geometria 3D da biela em escala 1:2,5 e em escala 1:1 (aproximação de uma biela real).

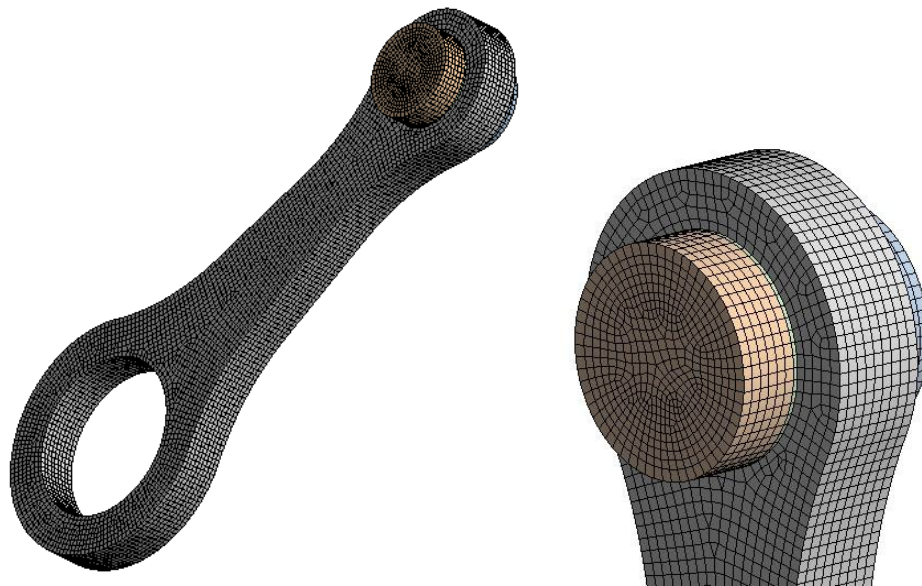


Figura 3.8. Malha de elementos finitos da biela e do pino do pistão.

A análise realizada foi estática, com não linearidades de contato e material (bilinear). A curva do material bilinear é uma aproximação utilizada pelo software de elementos finitos. Nesta curva, a região de deformação plástica da curva tensão x deformação do material é aproximada por uma reta, cuja inclinação é calculada pelo módulo tangente ( $E_t$ ), calculado de acordo com a Equação 3.2. Além disso, apenas a condição de contorno de tração da biela foi utilizada e a região analisada foi somente a do olhal menor (Figura 3.9). Procurou-se representar a mesma condição de contorno da análise virtual no teste experimental (Figura 3.10). Nesta condição de contorno, a região do olhal menor da biela sofre ação somente das forças de inércia da própria biela e do conjunto do pistão, ou seja, nesta condição, a biela não está sob ação da pressão de combustão da câmara dos cilindros, ou em outras palavras, o pedal do acelerador não está sendo pressionado. A carga aplicada na análise virtual foi uma carga estimada com base nas máximas cargas de inércia de uma biela automotiva de um motor quatro cilindros (Figura 3.11). De acordo com esse gráfico, a biela sofre uma máxima força de inércia de 11520 N. Porém, nos projetos de dimensionamento de bielas, para efeitos de segurança, é uma prática comum testar os componentes com uma carga 1,5 vezes maior do que a aplicada sobre a biela no motor. Sendo assim, a biela de tamanho real teria que sofrer uma carga de  $11520 \times 1,5 = 17280$  N. Como a análise de elementos finitos foi feita com base no modelo que seria obtido por DMLS, ou seja,



um modelo duas vezes e meia menor do que o real, a carga aplicada nesse componente também seguiu a mesma proporção, sendo de 6912 N. O tipo de contato utilizado entre o pino do pistão e o olhal menor da biela foi o friccional, assimétrico, com coeficiente de atrito de 0,2 (utilizado comumente nesse tipo de análise) e o algoritmo utilizado foi o Lagrange aumentado. A superfície de contato utilizada nas análises encontra-se representada na Figura 3.12. O contato entre o moente e a superfície interna do olhal menor da biela foi representado por um suporte fixo, ou seja, nessa superfície, todos os nós tiveram todos os graus de liberdade travados.

$$E_t = \frac{\sigma_u - \sigma_e}{\frac{\Delta l}{200} \frac{\sigma_e}{E}} \quad (3.2)$$

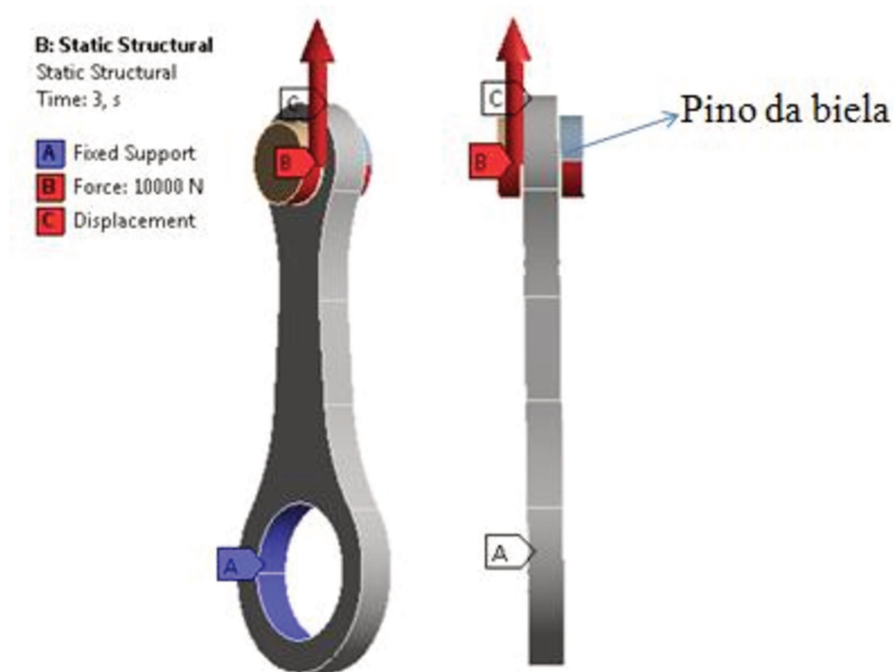


Figura 3.9. Condições de contorno de tração da biela no olhal menor.



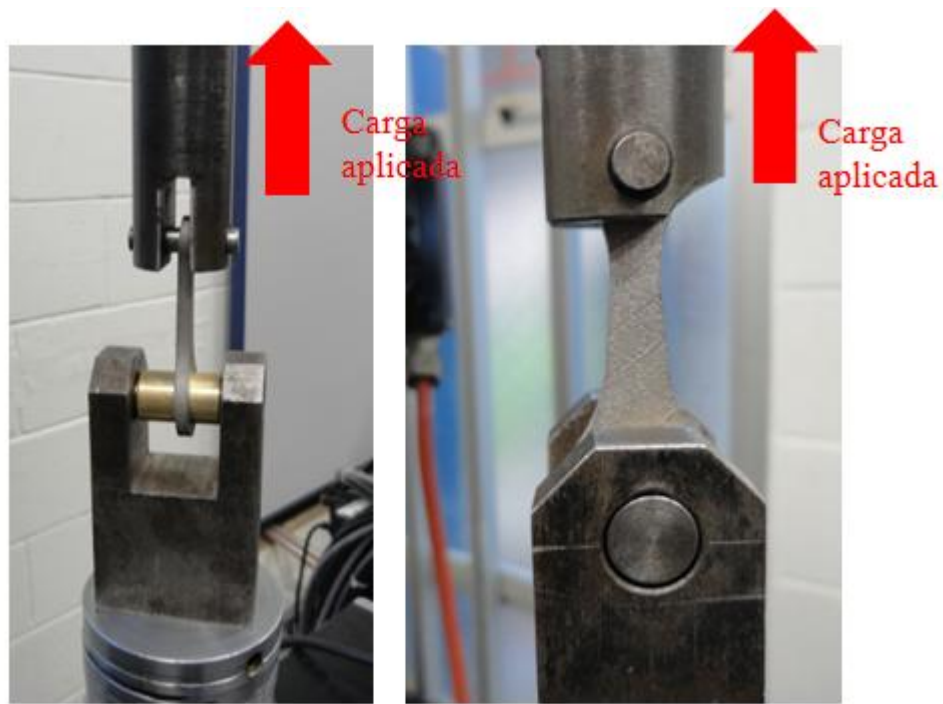


Figura 3.10. Montagem experimental dos testes de tração da biela obtida por DMLS.

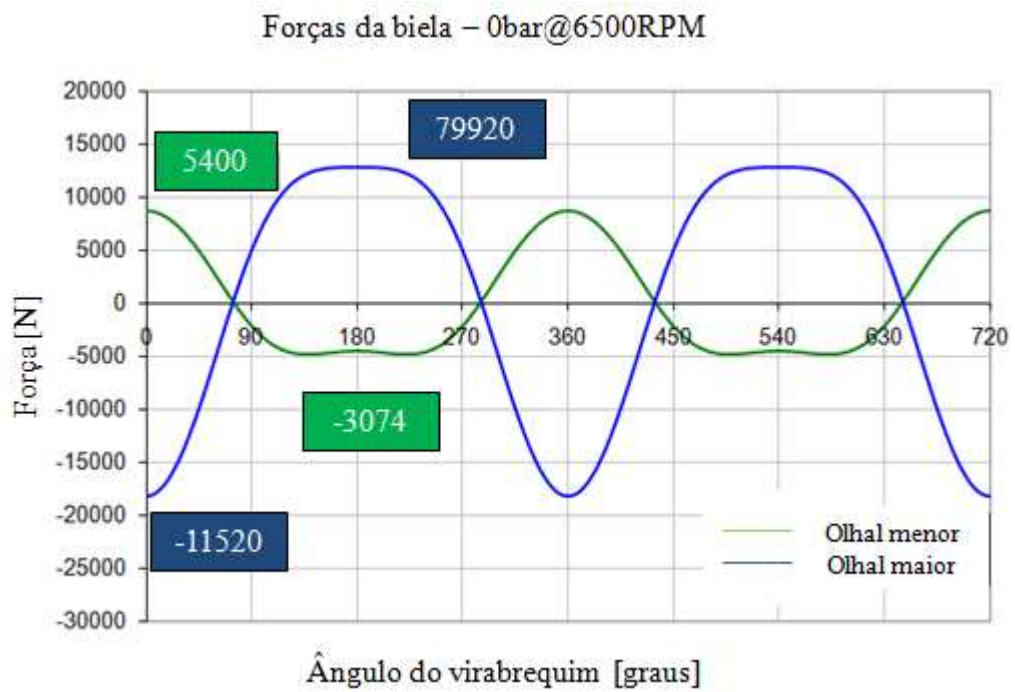


Figura 3.11. Curvas de carga que a biela sofre durante a operação no motor.

Frictional - Contato entre o pino do pistão e o olhal menor da biela

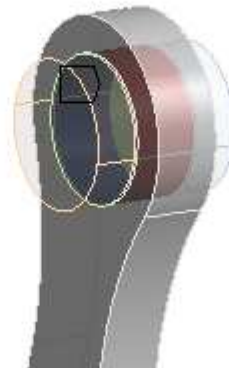


Figura 3.12. Superfície de contato entre a biela e o pino do pistão.

A mesma análise foi realizada para três condições diferentes de material. Propriedades como o limite de resistência à tração, limite de escoamento, módulo de Young, coeficiente de Poisson e o alongamento variaram entre as três análises. Primeiramente, foram utilizados os dados do material C70 que foram estimados com base nos resultados de Afzal [2004] e Reppen [1998], representados na Tabela 3.5. Este material é bastante comum para a aplicação em uma biela automotiva. Essa primeira condição de análise foi considerada como base, ou seja, aquela em que é aplicada no mercado no momento. Para a segunda análise, foram utilizadas as propriedades mecânicas provenientes do ensaio de tração dos corpos de prova da liga comercial laminada e recozida. Finalmente, na terceira análise foram consideradas as propriedades determinadas através do ensaio de tração dos corpos de prova obtidos por DMLS. Os resultados da última análise foram comparados com o teste de tração da biela, produzida através do método DMLS.

Tabela 3.5. Propriedades do aço C70 [Afzal, 2004 e Reppen, 1998].

Propriedades do material C70	
$\sigma_e$ (MPa)	550
$\sigma_u$ (MPa)	900
E (GPa)	200
$\mu$ (Módulo de Poisson)	0.3
$\Delta l$ (%)	10

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Caracterização Microestrutural

A análise de EDS confirmou a presença dos elementos Ti, Al e V e mostrou que a composição química, tanto da liga Ti-6Al-4V laminada e recozida quanto da liga produzida por DMLS, está de acordo com a especificação da norma ASTM F136 [2012]. A Figura 4.1 apresenta o espectro obtido pela análise de EDS para os dois materiais e a composição química pode ser vista na Tabela 4.1.

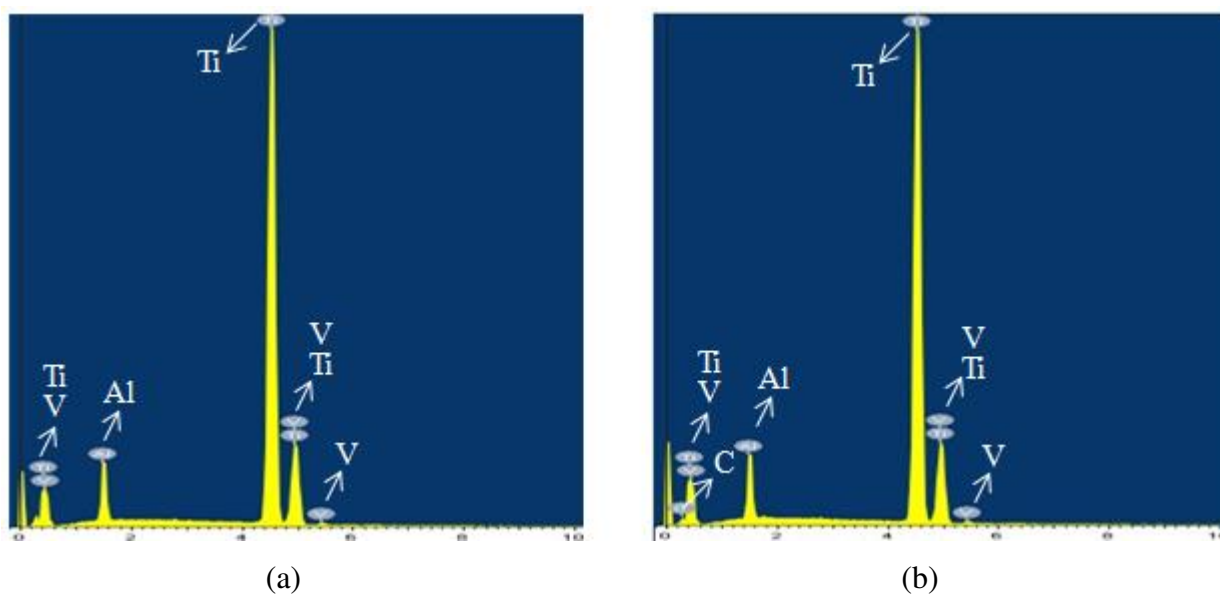


Figura 4.1. Espectro de energia dispersiva da amostra laminada (a) e prototipada por DMLS (b).

Tabela 4.1. Composição química obtida por espectroscopia de energia dispersiva.

Elementos	Composição Química (% em peso)		
	Amostra laminada	Amostra DMLS	ASTM F136
Al	5,55	6,05	5,50 - 6,50 ± 0,40
V	4,00	3,80	3,50 - 4,50 ± 0,15
Ti	90,47	90,15	balanço

As análises feitas no microscópio óptico indicam que tanto as amostras comerciais quanto as produzidas por DMLS apresentam poros (Figuras 4.2 e 4.3). Os resultados de densidade, seguindo o princípio de Arquimedes, mostram que a densidade absoluta das amostras prototipadas foi de  $4,385 \text{ g/cm}^3$ , enquanto a densidade das amostras laminadas foi de  $4,403 \text{ g/cm}^3$ . Dessa maneira, considerando que a densidade absoluta da liga Ti-6Al-4V é de  $4,43 \text{ g/cm}^3$  [Morcelli, 2009; Vandenbroucke e Kruth, 2007], pode-se observar que o valor da densidade relativa da liga prototipada foi de 98,9%, enquanto que a da liga laminada foi de 99,3%. Assim, os resultados de densidade indicam que a liga Ti-6Al-4V obtida por DMLS apresenta baixa porosidade, com uma densidade relativa bem próxima de 100%, o que está de acordo com os resultados obtidos por EOS [2013], Cooper et al.[2012], Bertol et al. [2010] e Vandenbroucke e Kruth [2007].

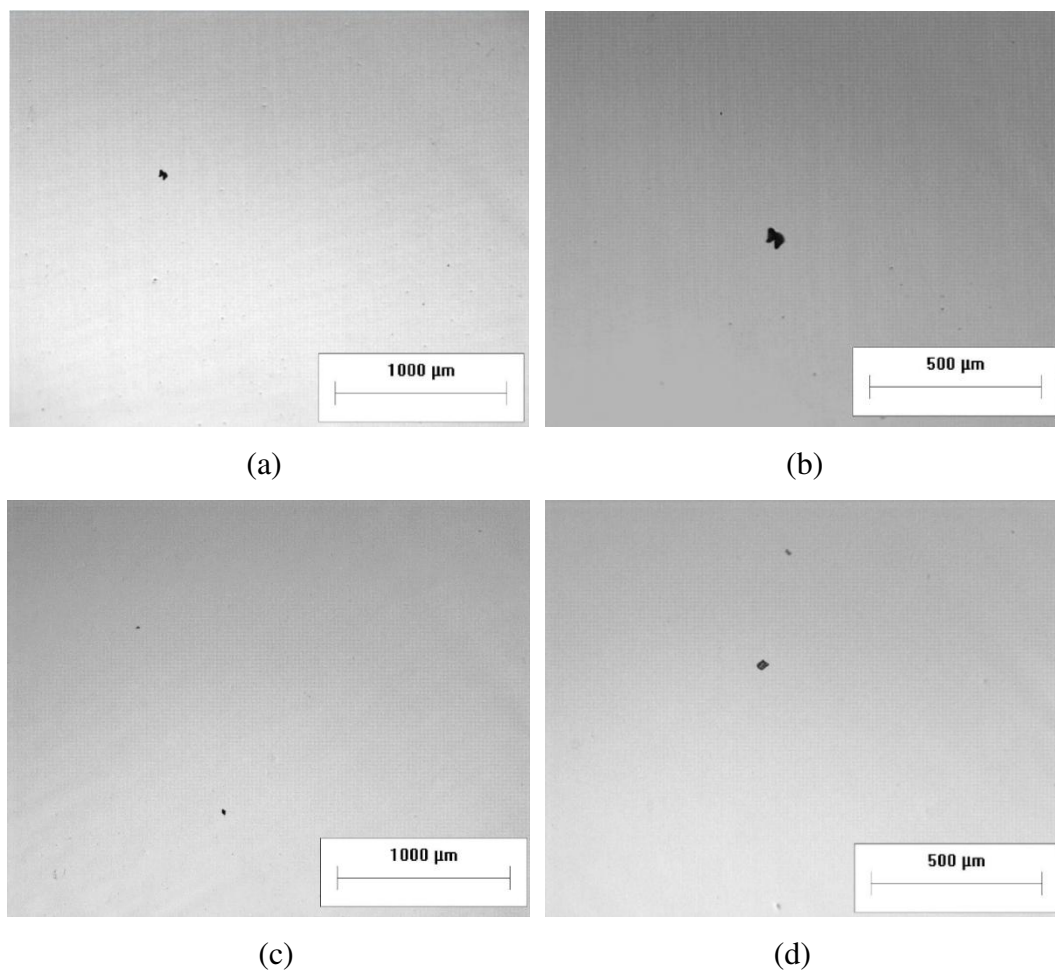


Figura 4.2. Poros presentes na liga Ti-6Al-4V laminada. Seção longitudinal (a) e (b) e seção transversal (c) e (d) da amostra.

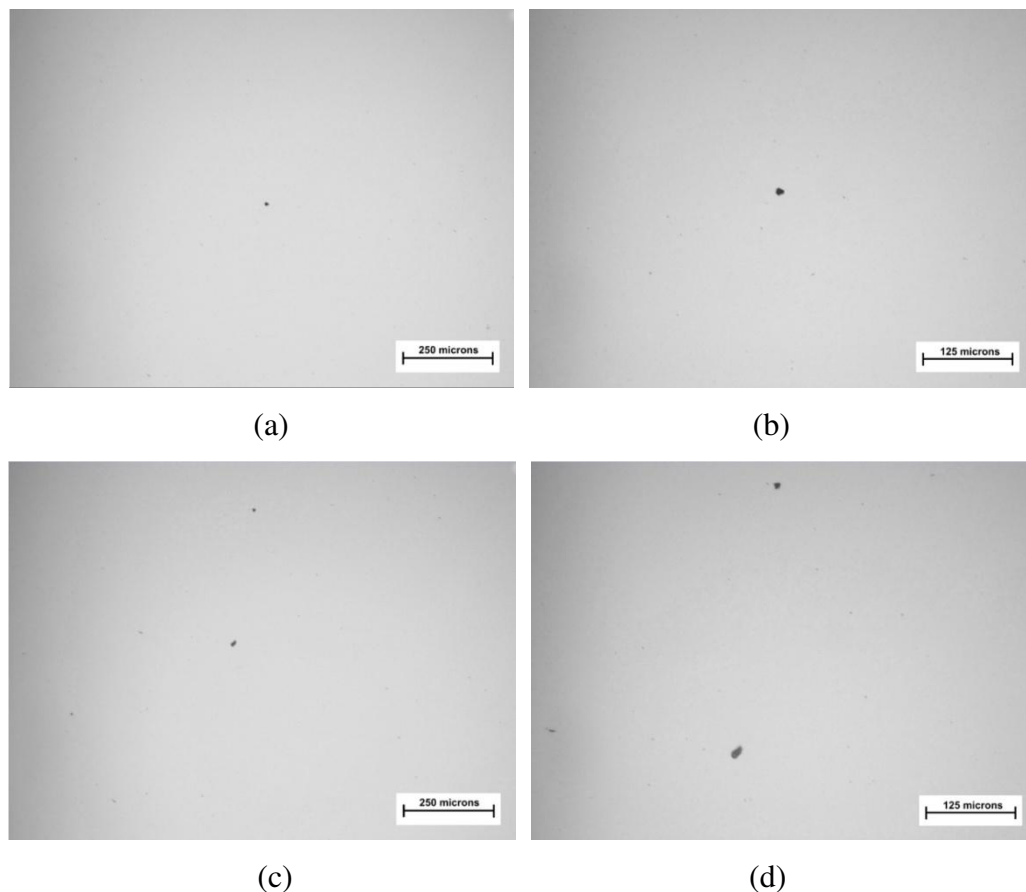


Figura 4.3. Porosidade da amostra produzida por DMLS. Seção longitudinal (a) e (b) e seção transversal (c) e (d) da amostra.

A Figura 4.4, obtida por microscopia óptica, mostra que a liga Ti-6Al-4V laminada apresenta uma microestrutura equiaxial, enquanto a liga prototipada por DMLS possui uma microestrutura martensítica. Na Figura 4.5, é possível observar com mais detalhes que a Ti-6Al-4V laminada possui uma microestrutura equiaxial formada por duas fases. A fase mais escura é a fase  $\alpha$ , enquanto a fase mais clara é a fase  $\beta$ , distribuída homogeneamente na matriz  $\alpha$ . É possível observar na Figura 4.5 (a), (c) e (e) a presença de linhas de laminação que seguem o sentido longitudinal da amostra e são bastante características desse processo de fabricação. Como a barra da liga Ti-6Al-4V adquirida é laminada e recozida, a presença de uma microestrutura equiaxial pode ser explicada pela grande deformação plástica que ocorreu durante o processo de conformação desse material, seguido pelo processo de recristalização.

A microestrutura das amostras produzidas via DMLS, por sua vez, apresenta características diferentes da amostra laminada. De acordo com Lutjering e Williams [2007], a transformação da

fase  $\beta$  em fase  $\alpha$  pode ocorrer martensiticamente ou por um processo de nucleação e crescimento de grão controlado por difusão. A estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC) pode se transformar em até 12 variações hexagonais compactas. A fase observada na amostra obtida por DMLS é a  $\alpha'$ , característica de uma estrutura martensítica hexagonal e apresenta uma morfologia acicular. Essa microestrutura é formada devido ao resfriamento rápido envolvido no processo DMLS. Nesse processo, o material é sinterizado pela ação de um feixe de laser, e a presença de outras partículas de pó metálico que não foram sinterizadas, localizadas na vizinhança da peça a ser sinterizada e também a presença de um suporte vazado, que constitui tanto a base da peça quanto o contato com a plataforma de construção contribuem para resfriar rapidamente a peça. Esse resfriamento rápido confere à fase  $\alpha'$  um formato mais refinado de agulhas de martensita. A Figura 4.6 mostra a microestrutura da liga Ti-6Al-4V obtida por DMLS.

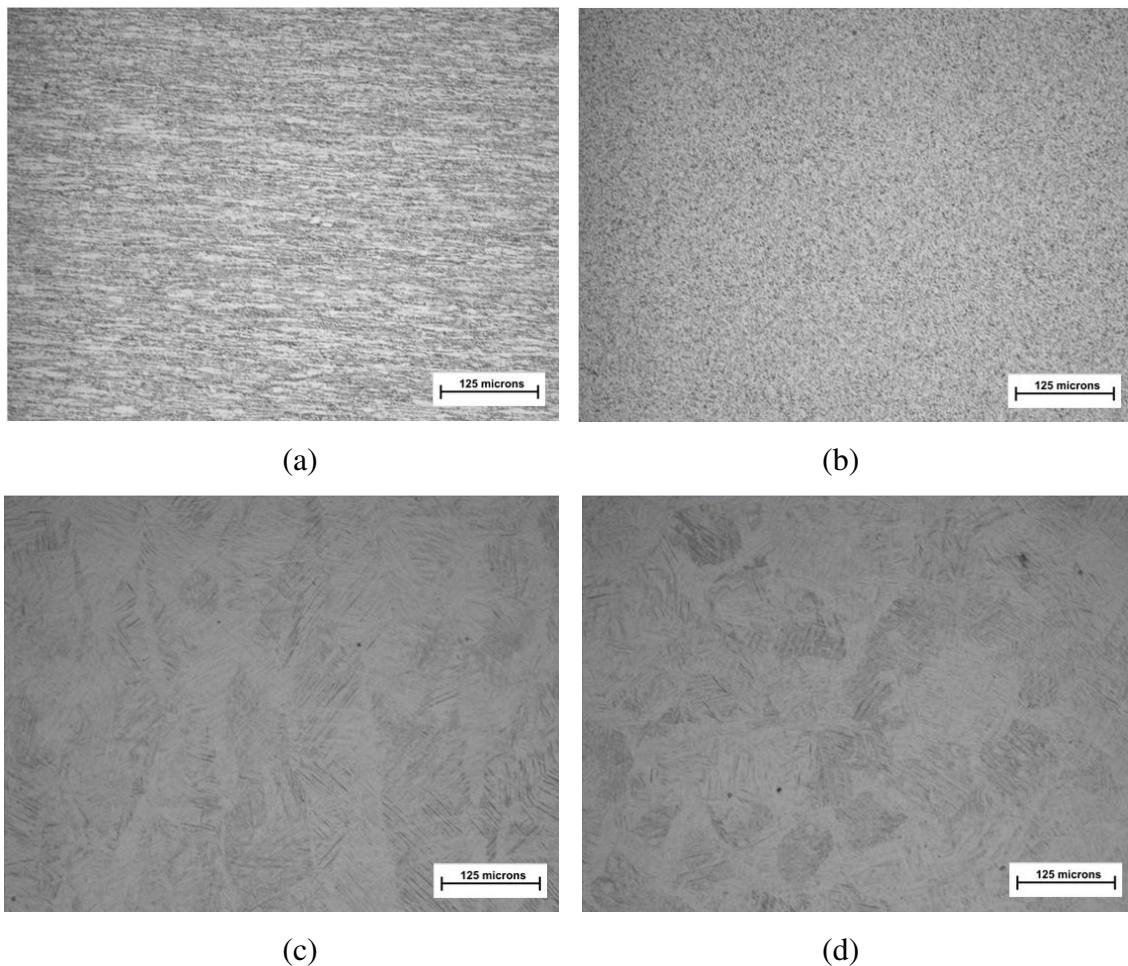


Figura 4.4. Microestrutura da seção longitudinal (a) e transversal (b) da liga laminada e da seção longitudinal (c) e transversal (d) da liga produzida via DMLS.



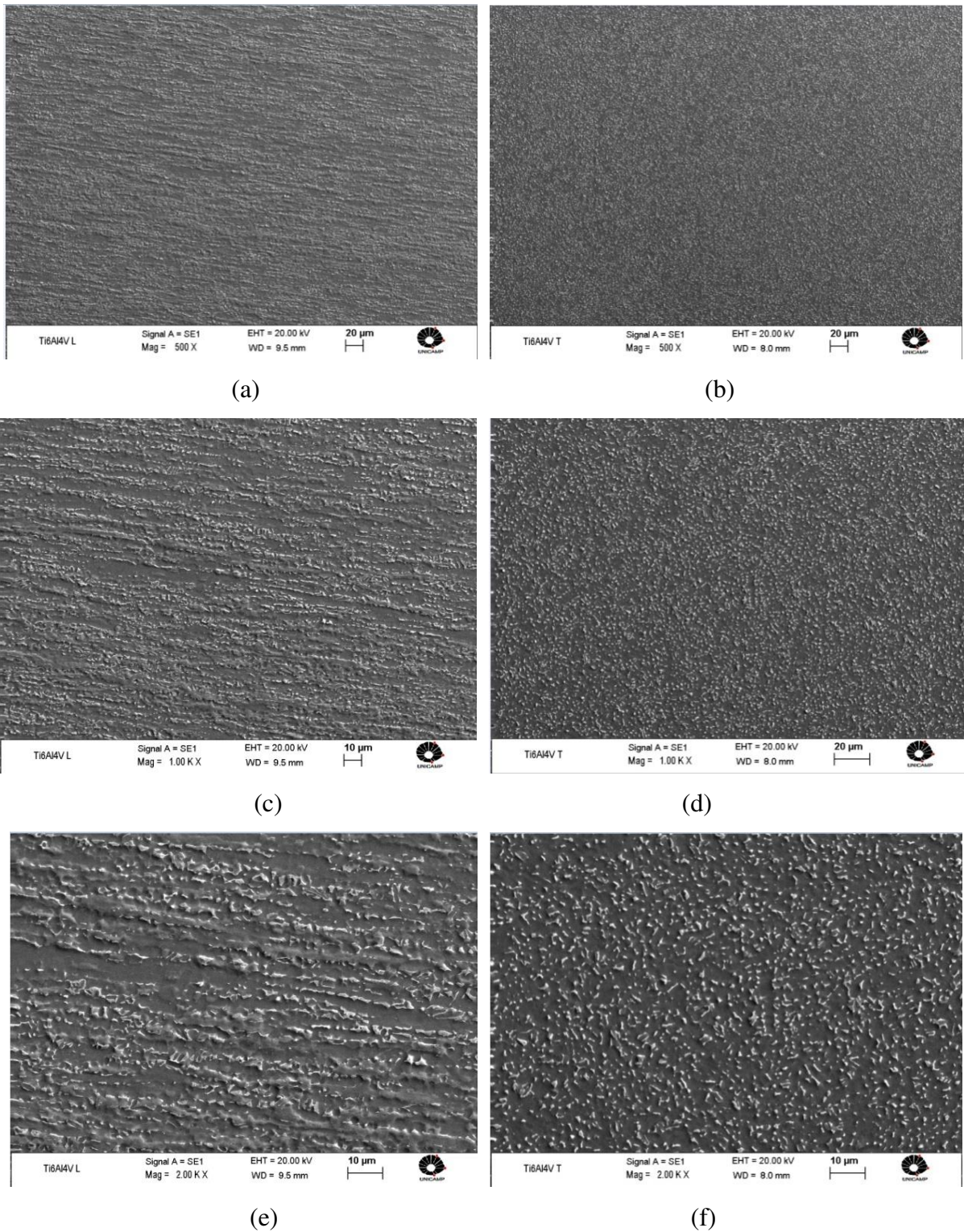
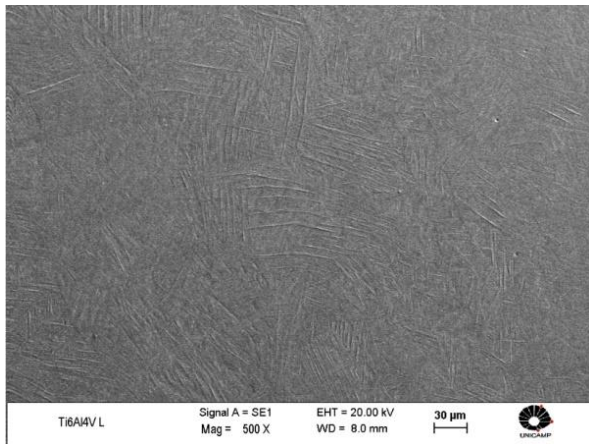
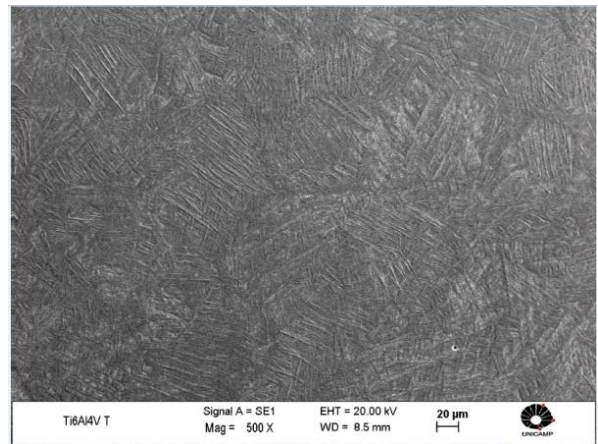


Figura 4.5. Microestrutura da liga Ti-6Al-4V laminada. Seção longitudinal (a), (c) e (e) e seção transversal (b), (d) e (f).

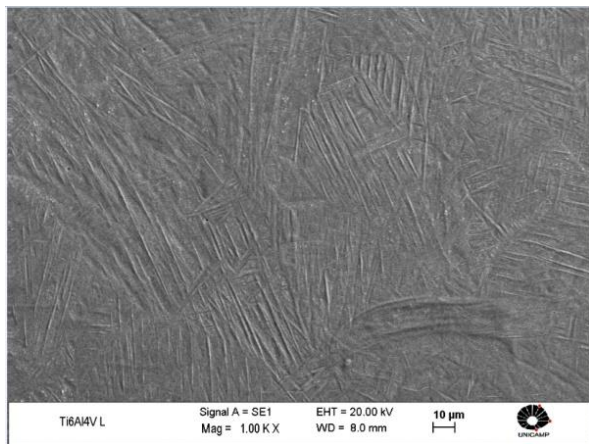




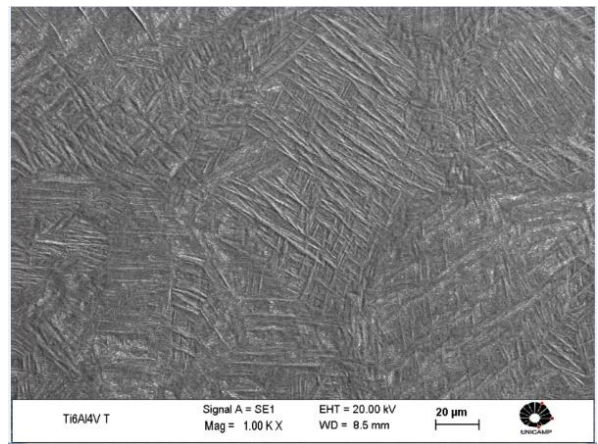
(a)



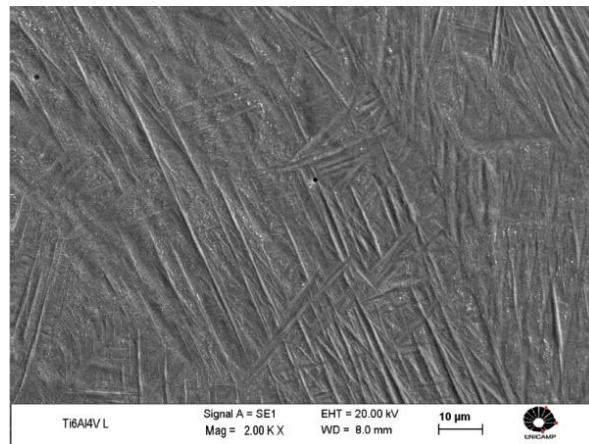
(b)



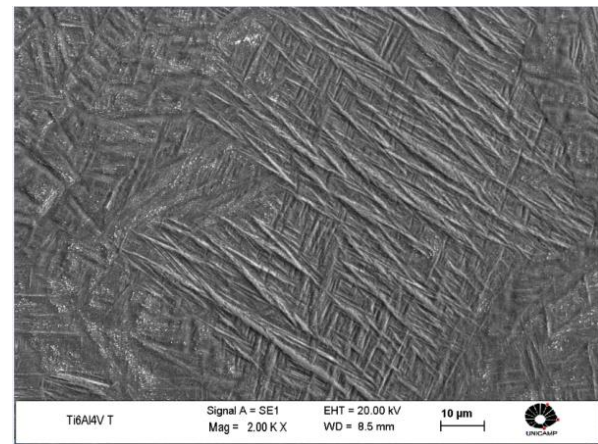
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.6. Microestrutura da liga Ti-6Al-4V produzida via DMLS. Seção longitudinal (a), (c) e (e) e seção transversal (b), (d) e (f).



Os resultados da análise de difração de raios-X (DRX) possibilitaram a identificação e a confirmação das fases presentes na microestrutura das ligas Ti-6Al-4V laminada e prototipada. A Figura 4.7 e a Tabela 4.2 mostram o difratograma de raios-X e os resultados da análise para a amostra laminada e recozida. É possível observar que as fases  $\alpha$  e  $\beta$  estão presentes, com predominância da fase  $\alpha$ , que possui uma orientação cristalográfica preferencial na direção  $\langle 101 \rangle$ .

No caso da amostra obtida por DMLS, os resultados da análise de difração de raios-X são mostrados na Figura 4.8 e na Tabela 4.3. Segundo Facchini et al. [2010] e Lutjering e Williams [2007], tanto a estrutura quanto a rede cristalina da fase  $\alpha'$  são as mesmas da fase  $\alpha$ , o que faz com que seja utilizada a mesma ficha JCPDS (44-1294) para a identificação de ambas as fases. A única fase encontrada nas amostras produzidas via DMLS foi a  $\alpha'$ , o que está de acordo com a microestrutura mostrada na Figura 4.6.

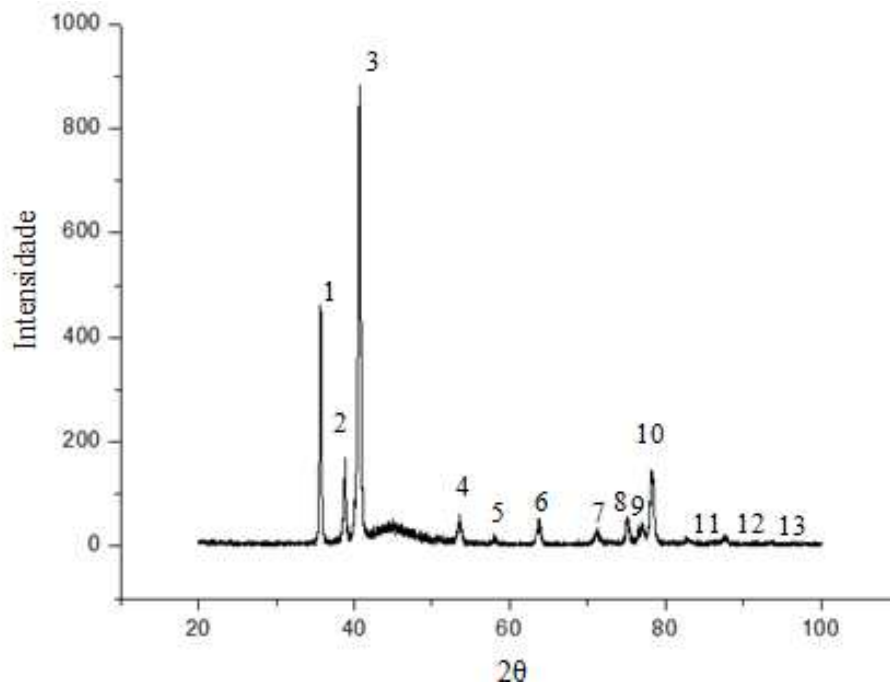


Figura 4.7. Difratograma de raios-X da liga Ti-6Al-4V laminada e recozida.

Tabela 4.2. Resultados da análise de difração de raios-X da liga Ti-6Al-4V laminada e recozida.

Número	Posição $2\theta$ ( $^{\circ}$ )	Intensidade	Estrutura Cristalina	Plano	Fase
1	35,7417	428	HC	[1 0 0]	$\alpha$
2	38,8438	164	HC	[0 0 2]	$\alpha$
3	40,7313	870	HC	[1 0 1]	$\alpha$
4	53,5254	55	HC	[1 0 2]	$\alpha$
5	58,0090	8	CCC	[2 0 0]	$\beta$
6	63,8078	38	HC	[1 1 0]	$\alpha$
7	71,1406	27	HC	[1 0 3]	$\alpha$
8	75,1280	50	HC	[2 0 0]	$\alpha$
9	76,9567	30	HC	[1 1 2]	$\alpha$
10	78,2348	125	HC	[2 0 1]	$\alpha$
11	82,8764	12	HC	[0 0 4]	$\alpha$
12	87,7064	16	HC	[2 0 2]	$\alpha$
13	93,4528	8	HC	[1 0 4]	$\alpha$

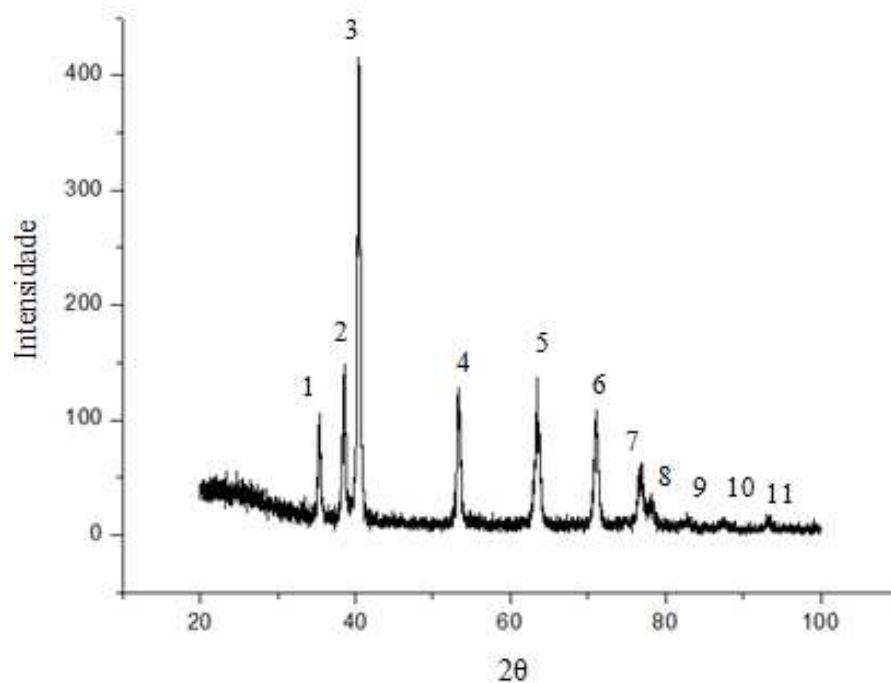


Figura 4.8. Difratograma de raios-X da liga Ti-6Al-4V prototipada por DMLS.

Tabela 4.3. Resultados da análise de difração de raios-X da liga Ti-6Al-4V prototipada por DMLS.

Número	Posição 2 $\theta$ (°)	Intensidade	Estrutura Cristalina	Plano	Fase
1	35,3481	106	HC	[1 0 0]	$\alpha'$
2	38,5215	148	HC	[0 0 2]	$\alpha'$
3	40,4631	415	HC	[1 0 1]	$\alpha'$
4	53,1762	128	HC	[1 0 2]	$\alpha'$
5	63,3869	136	HC	[1 1 0]	$\alpha'$
6	71,0145	107	HC	[1 0 3]	$\alpha'$
7	76,9143	61	HC	[1 1 2]	$\alpha'$
8	78,1175	125	HC	[2 0 1]	$\alpha'$
9	82,7437	18	HC	[0 0 4]	$\alpha'$
10	87,5660	16	HC	[2 0 2]	$\alpha'$
11	93,2543	15	HC	[1 0 4]	$\alpha'$

#### 4.2 Levantamento das propriedades mecânicas

Os ensaios de tração dos três corpos de prova da liga laminada e dos três corpos de prova prototipados por DMLS possibilitaram a criação do gráfico de tensão x deformação que pode ser visto na Figura 4.9. Os resultados de limite de escoamento ( $\sigma_e$ ), limite de resistência à tração ( $\sigma_u$ ), alongamento ( $\Delta l$ ) e módulo de elasticidade (E) são mostrados na Tabela 4.4.

As Figuras 4.10 e 4.11 e a Tabela 4.5 mostram os resultados de microdureza Vickers e Rockwell C obtidos para as amostras laminada e prototipada, nas seções transversal e longitudinal.

Observando os resultados dos ensaios mecânicos, pode-se notar que a amostra gerada por DMLS possui valores de limite de escoamento ligeiramente mais altos do que a liga Ti-6Al-4V laminada, enquanto o limite de resistência à tração apresenta uma média bem maior (15%). O mesmo acontece com a microdureza, sendo mais de 10% superior na liga Ti-6Al-4V obtida por DMLS. Para comparação, o aço C70 possui uma dureza de 23 HRC [Afzal, 2004 e Repgen, 1998]. É de se esperar, portanto, que a liga sinterizada por laser tenha propriedades mecânicas ligeiramente melhores, visto que sua microestrutura possui uma fase predominante  $\alpha'$

martensítica acicular. Porém, ao mesmo tempo que a microestrutura martensítica promove um aumento na resistência mecânica e dureza, também torna a liga Ti-6Al-4V mais frágil. Essa fragilização é comum em processos de fusão por laser [Vandenbroucke e Kruth, 2007]. Isso pode ser observado nos valores de alongamento dos corpos de prova produzidos por DMLS que apresentam valores 33% menores do que os corpos de prova laminados. A liga Ti-6Al-4V laminada e recozida, que possui uma microestrutura equiaxial, apresentou uma melhor ductilidade, o que está de acordo com Peters et al. [2003].

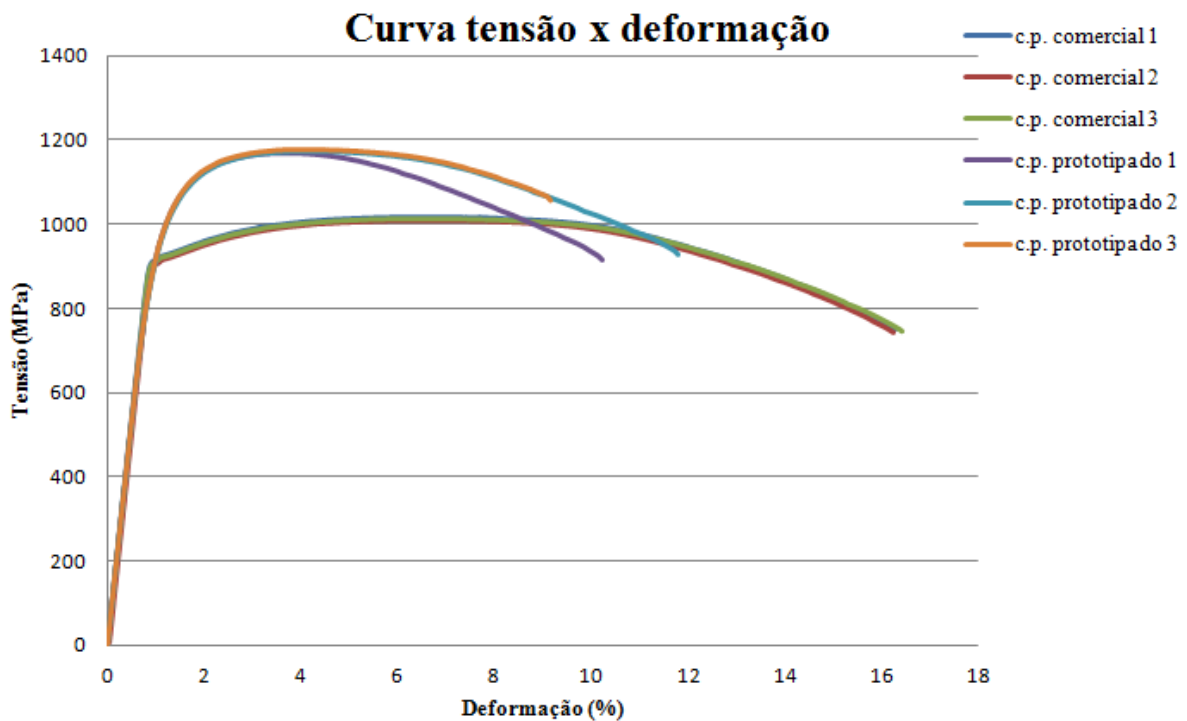


Figura 4.9. Curva tensão x deformação dos corpos de prova da liga Ti-6Al-4V laminada produzida por DMLS.

Tabela 4.4. Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração para as ligas Ti-6Al-4V laminada e prototipada.

Liga Ti-6Al-4V laminada e recozida				
Corpo de prova	E (GPa)	$\sigma_e$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	$\Delta l$ (%)
1	108,10	917,97	1017,48	16,00
2	107,51	912,32	1010,00	15,60
3	107,00	920,77	1014,53	16,40
média	107,54	917,02	1014,00	16,00
desvio padrão	0,45	3,52	3,76	0,40
Liga Ti-6Al-4V obtida por DMLS				
Corpo de prova	E (GPa)	$\sigma_e$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	$\Delta l$ (%)
1	108,80	958,78	1169,66	10,40
2	108,32	951,88	1174,78	12,00
3	107,69	959,12	1175,58	9,60
média	108,27	956,59	1173,34	10,67
desvio padrão	0,56	4,09	3,21	1,22
média - diferença (%)	0,68	4,32	15,71	-33,33

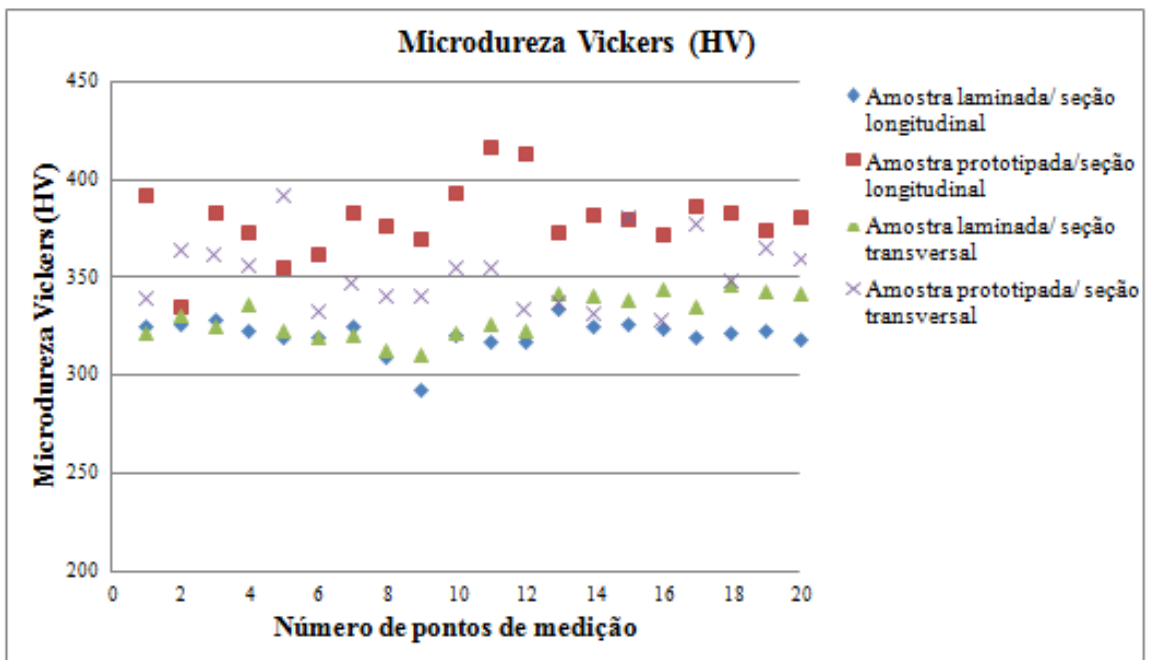


Figura 4.10. Gráfico dos valores de microdureza Vickers obtidos para as amostras laminada e prototipada.

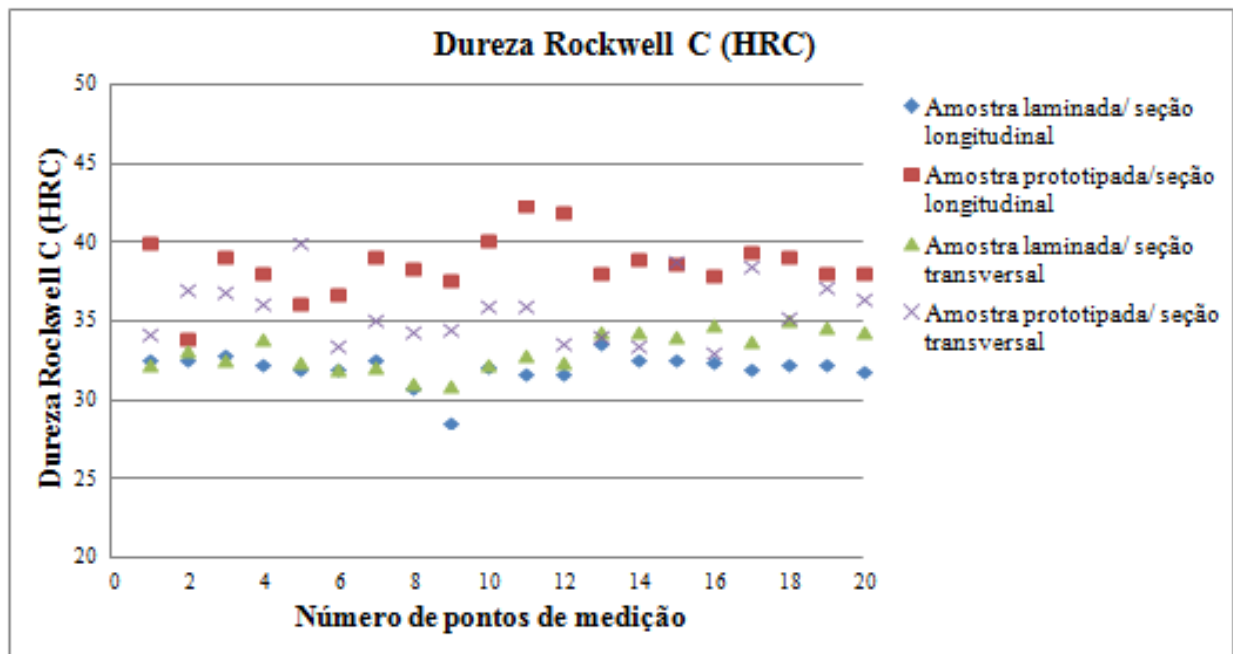


Figura 4.11. Gráfico dos valores de dureza Rockwell C obtidos para as amostras laminada e prototipada.

Tabela 4.5. Valores de microdureza Vickers e dureza Rockwell C obtidos.

		Seção longitudinal		Seção transversal	
		Microdureza Vickers (HV)	Dureza Rockwell C (HRC)	Microdureza Vickers (HV)	Dureza Rockwell C (HRC)
Liga Ti-6Al-4V laminada	média	330,75	33,37	320,75	32,23
	desvio	10,76	1,21	8,02	0,96
Liga Ti-6Al-4V DMLS	média	379,80	38,69	353,25	35,86
	desvio	17,46	1,81	17,21	1,89
Diferença (%)	média	+14,83	+15,94	+10,13	+11,25

### 4.3 Análises de elementos finitos

Como mencionado no Capítulo 3, três análises foram realizadas comparando a liga Ti-6Al-4V laminada e recozida, a liga Ti-6Al-4V prototipada e o aço C70, cuja as propriedades que serviram como dados de entrada para o software de elementos finitos podem ser encontradas nas

Tabelas 4.4 e 3.5, respectivamente. As curvas bi-lineares das duas ligas de titânio foram aproximadas através dos resultados dos ensaios de tração dos corpos de prova e podem ser vistas nas Figuras 4.12, 4.13 e 4.14.

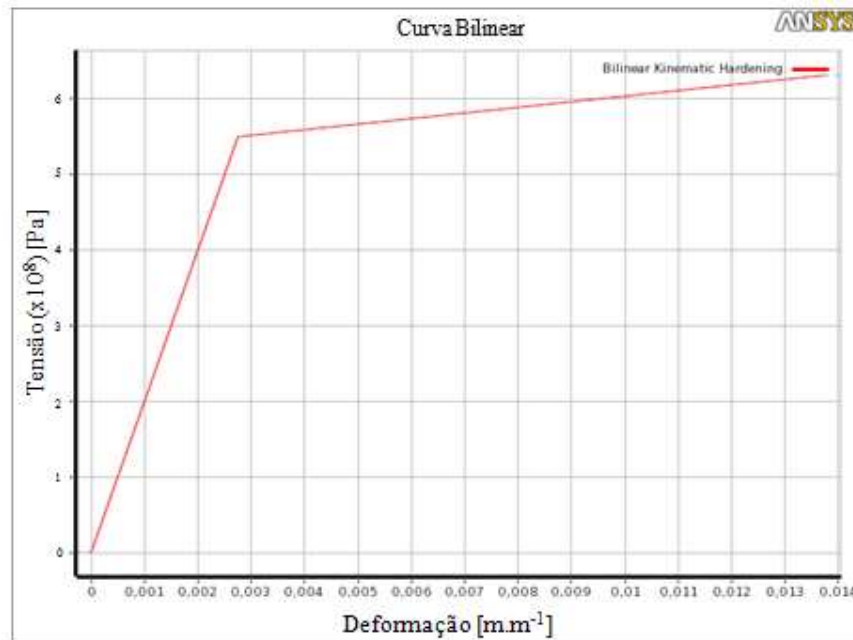


Figura 4.12. Curva tensão x deformação bi-linear do aço C70 utilizada na análise de elementos finitos.

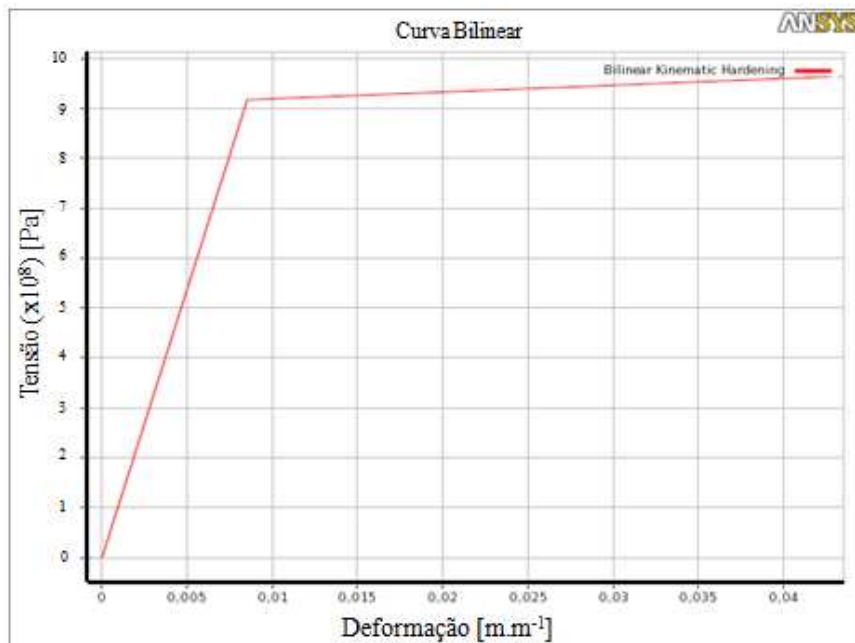


Figura 4.13. Curva tensão x deformação bi-linear da liga Ti-6Al-4V laminada e recozida utilizada na análise de elementos finitos.

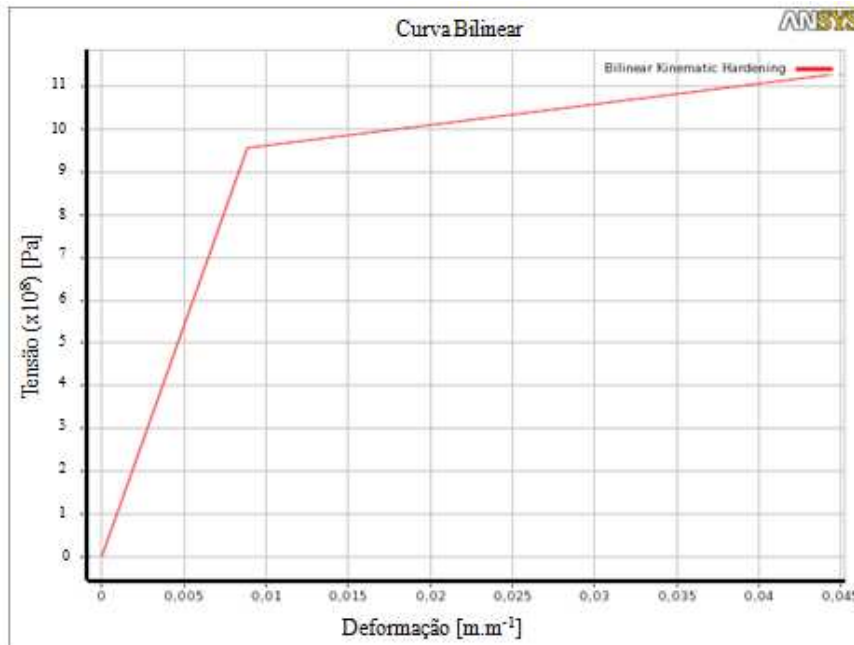


Figura 4.14. Curva tensão x deformação bi-linear da liga Ti-6Al-4V produzida por DMLS utilizada na análise de elementos finitos.

As bielas prototipadas foram testadas no laboratório utilizando as mesmas condições de contorno das análises virtuais, como explicado na seção 3.5. A Figura 4.15 mostra a biela produzida por DMLS em uma escala de 1:2,5.

Através dos ensaios de tração das bielas prototipadas foi possível obter os máximos valores de carga suportados pela biela e também correlacioná-los com os resultados obtidos através da análise de elementos finitos. A Tabela 4.6 mostra os valores da máxima carga suportada por cada um dos três protótipos da biela antes da ruptura.

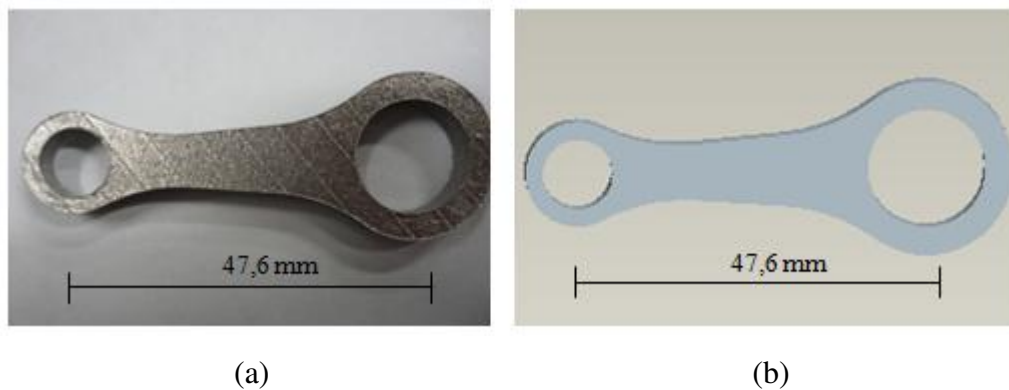


Figura 4.15. Biela obtida por DMLS (a) e virtual gerada por software CAD (b).



Tabela 4.6. Resultados de máxima carga de ruptura no ensaio de tração das bielas prototipadas por DMLS.

Biela	Máxima carga (N)
1	8660,37
2	10438,75
3	8010,12
Média	9036,41
Desvio	1257,23

Com o valor médio de máxima carga de ruptura da biela obtida por DMLS, pode-se realizar uma análise de elementos finitos utilizando-se essa carga como dado de entrada para correlacionar os resultados virtuais e experimentais.

Os resultados da análise de elementos finitos das bielas de Ti-6Al-4V prototipadas por DMLS (Figuras 4.16, 4.17 e 4.18) mostram que, sob a carga de ruptura de 9036 N, a biela possui uma tensão equivalente de von Mises de 963 MPa, ou seja, somente um pouco maior do que o limite de escoamento de 956 MPa. Além disso, ao se considerar a tensão máxima principal, o pico de 1023 MPa encontra-se abaixo do limite de resistência à tração (1173 MPa). Considerando o mesmo carregamento, a biela real ensaiada nos testes se rompeu no mesmo ponto em que os resultados da análise virtual indicavam. Portanto, o modo de falha, ou seja, o ponto no qual a peça tende a iniciar a sua trinca antes da falha ocorrer foi confirmado. A análise de elementos finitos para essa condição de contorno se mostra bastante eficaz e confiável, mesmo que o resultado tenha uma pequena diferença em relação aos resultados experimentais. Isso se deve a algumas aproximações feitas durante a análise, como o modelo bi-linear do material, o coeficiente de atrito utilizado e outros parâmetros que não puderam ser considerados, como por exemplo, a rugosidade da superfície e a própria porosidade.

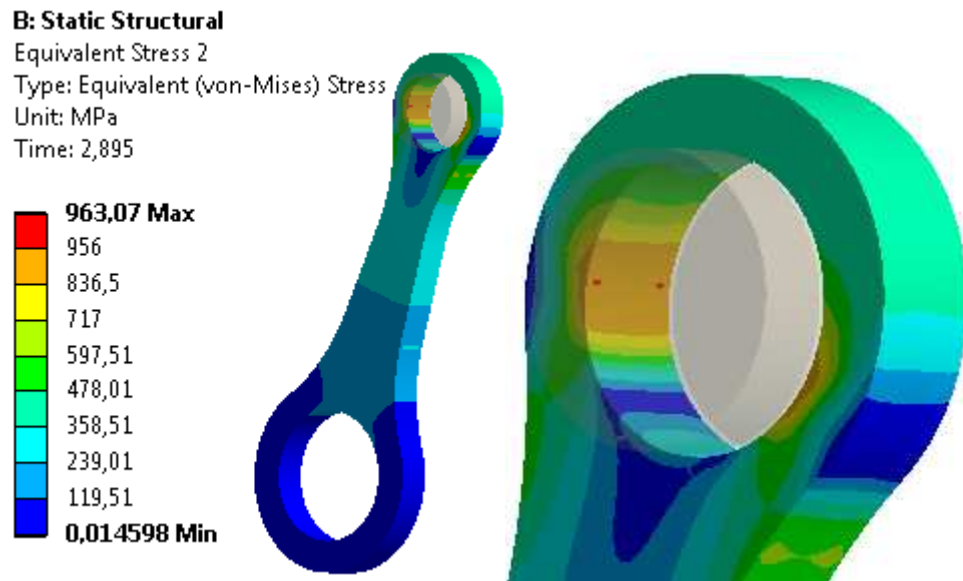


Figura 4.16. Tensão equivalente de von Mises da biela de Ti-6Al-4V produzida por DMLS sob a máxima carga experimental.

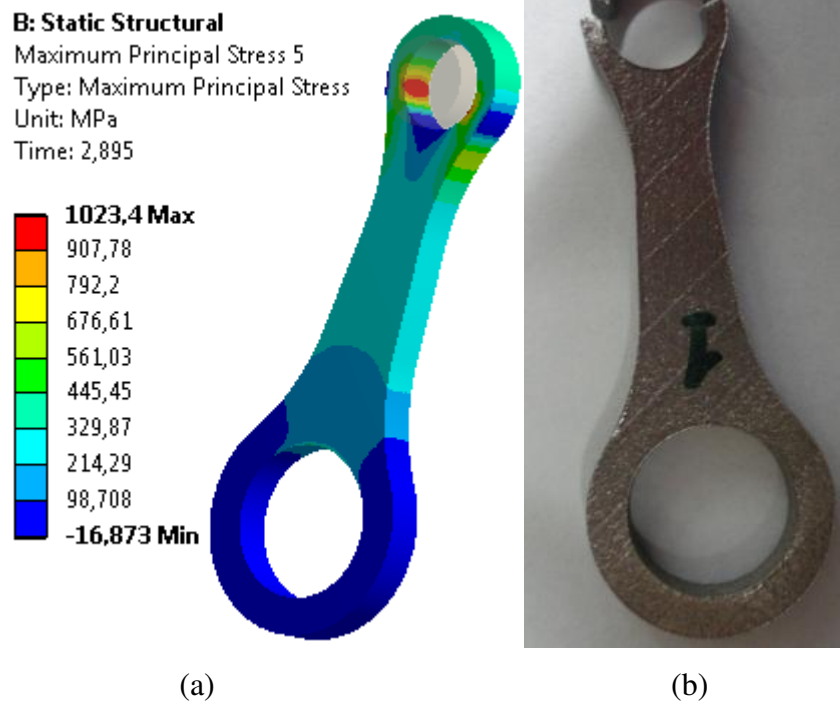


Figura 4.17. Tensão máxima principal da biela de Ti-6Al-4V produzida por DMLS sob a máxima carga experimental (a) e biela prototipada fraturada (b).

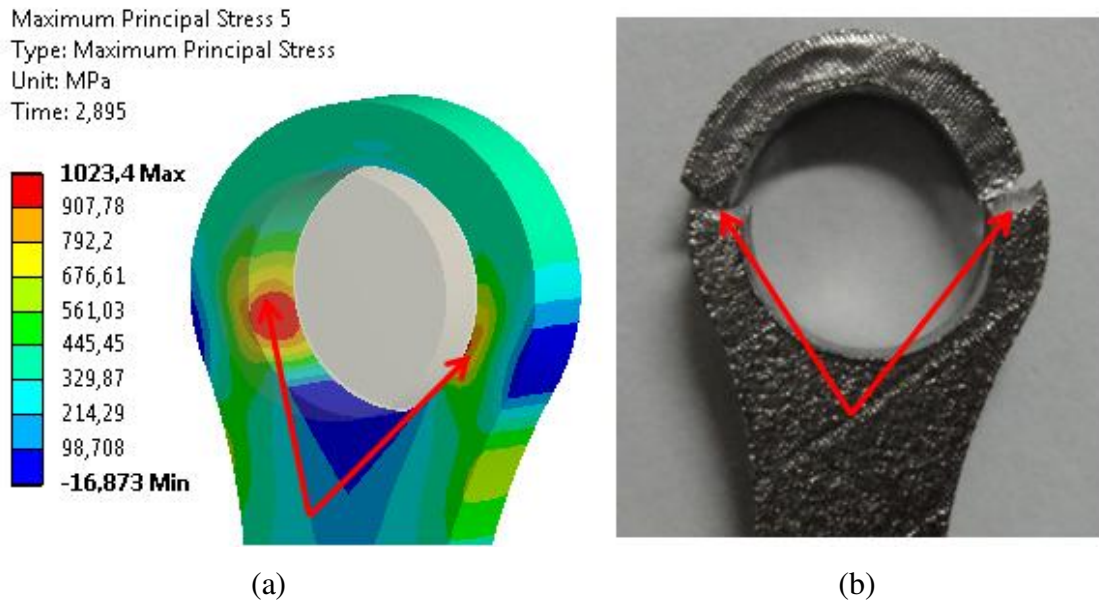


Figura 4.18. Comparação entre o local de ruptura da biela de Ti-6Al-4V produzida por DMLS. Ensaio virtual (a) e real (b).

Tendo em vista que o modelo virtual encontra-se correlacionado com a realidade, a comparação entre dois materiais da biela foi realizada (aço C70 e Ti-6Al-4V), sendo que a liga Ti-6Al-4V foi avaliada considerando dois métodos de fabricação diferentes (laminação seguida de recozimento e DMLS). Essa comparação foi feita com o intuito de se entender qual seria a influência e as diferenças do material sinterizado por laser em comparação com o conformado mecanicamente e também a possibilidade de substituição do aço C70, largamente utilizado em bielas atualmente, por uma liga de titânio. Considerando que a mínima carga que a biela deveria suportar para ser aprovada em testes de bancada seria de 6912 N, as três bielas consideradas neste trabalho (a de aço C70, de Ti-6Al-4V laminado e recozido e a biela de Ti-6Al-4V produzida por DMLS) foram analisadas com essa mesma carga. As Figuras 4.19, 4.20 e 4.21 ilustram os resultados da tensão máxima principal e equivalente de von Mises das três bielas sobre o carregamento de bancada.

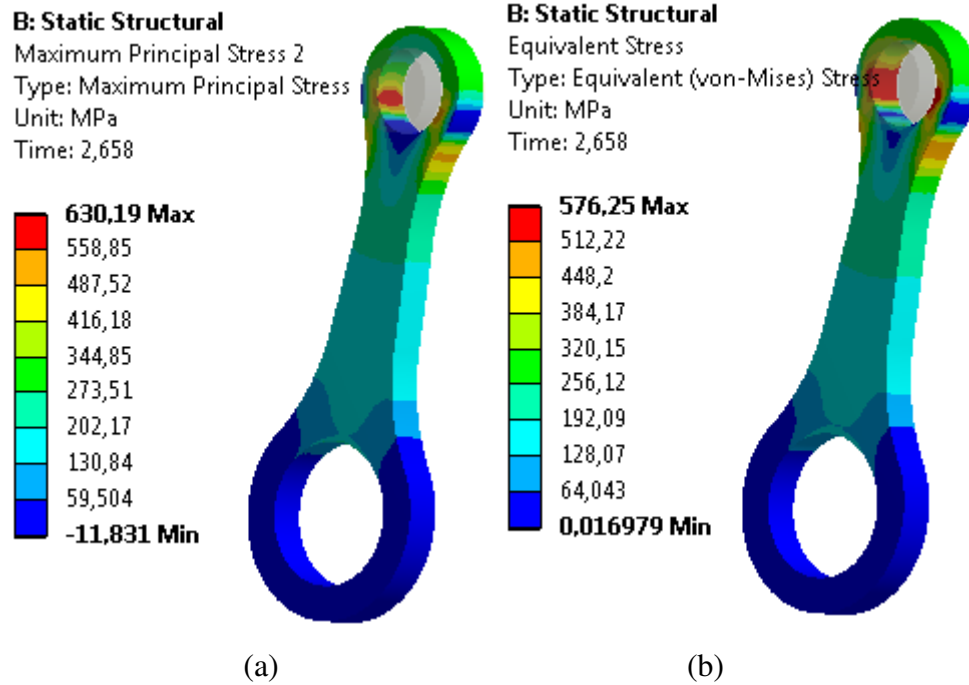


Figura 4.19. Tensão máxima principal (a) e equivalente de von Mises (b) da biela de aço C70 e sob um carregamento de 6912 N.

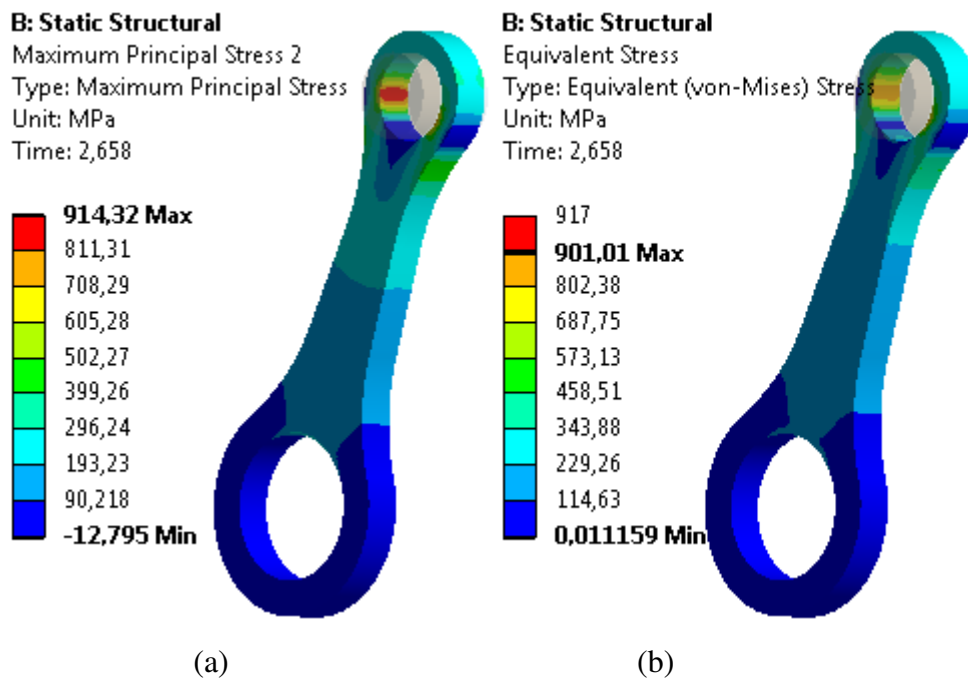


Figura 4.20. Tensão máxima principal (a) e equivalente de von Mises (b) da biela de Ti-6Al-4V laminada e sob um carregamento de 6912 N.

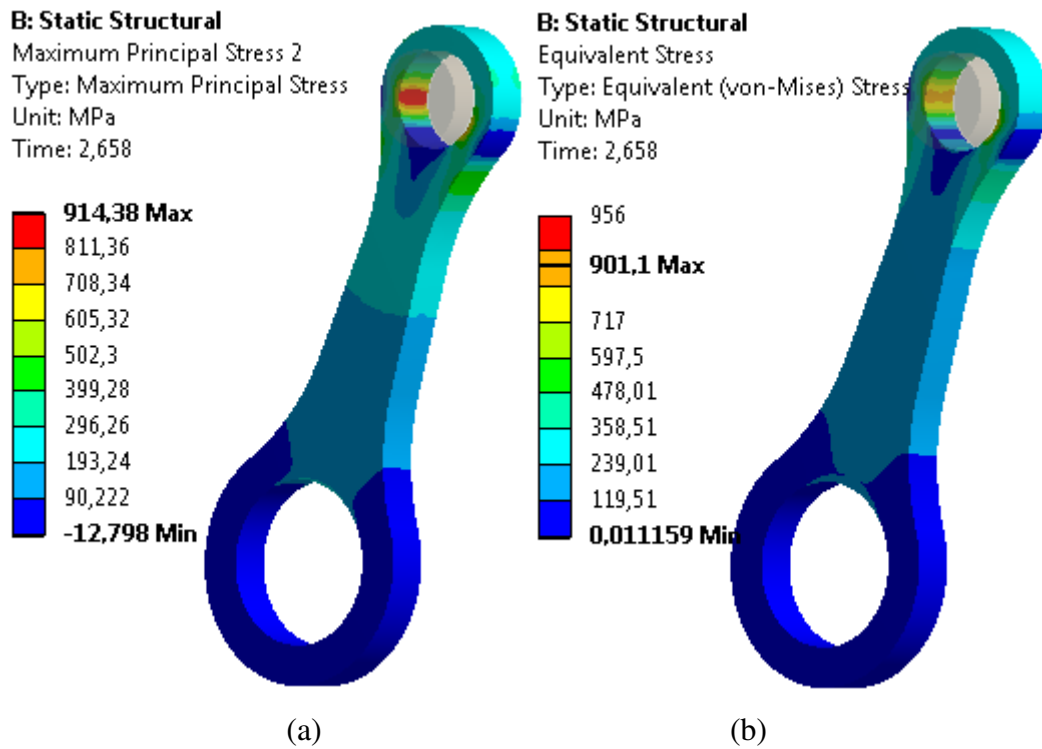


Figura 4.21. Tensão máxima principal (a) e equivalente de von Mises (b) da biela de Ti-6Al-4V prototipada por DMLS e sob um carregamento de 6912 N.

A Figura 4.22 mostra o deslocamento das três bielas estudadas, com um aumento de 50 vezes na escala de visualização. Pode-se observar que o material C70 possui um deslocamento de 66  $\mu\text{m}$  no sentido longitudinal da biela, na região do olhal menor. Esse valor é bem menor do que o encontrado para as ligas Ti-6Al-4V laminada e sinterizada por laser (117  $\mu\text{m}$  em ambos os casos).

Sob o carregamento de 6912 N que a biela deveria suportar para ser aprovada, a biela C70 encontra-se com diversas regiões de deformação plástica. Entretanto, o valor de sua tensão máxima não chega perto do seu limite de resistência à tração. As bielas da liga de titânio possuem comportamentos semelhantes entre si, porém diferentes da biela de C70. Nenhuma delas atinge o limite de escoamento, porém ambas encontram-se razoavelmente perto do limite de resistência à tração. Como sob esse carregamento de 6912 N, ambas trabalham no regime elástico, seu comportamento é muito semelhante, como pode ser visto anteriormente na Figura 4.9. As cargas em que as bielas atingem o limite de escoamento estão apresentadas na Tabela 4.7.

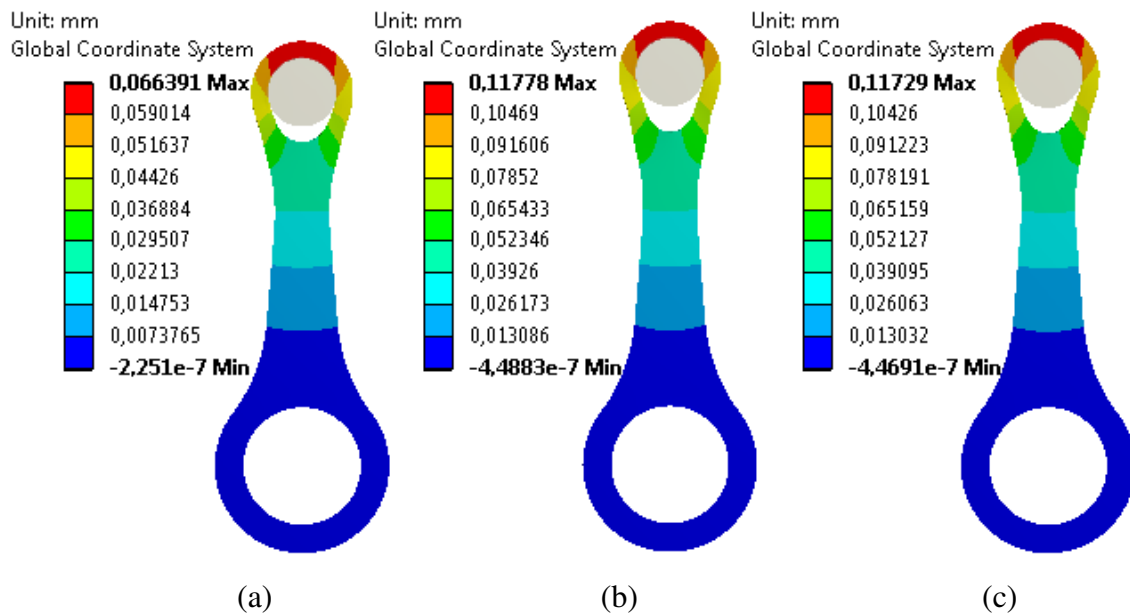


Figura 4.22. Deslocamento (em mm e com um aumento de 50 vezes) das bielas de aço C70 (a), Ti-6Al-4V laminado (b) e Ti-6Al-4V sinterizado por laser (c) sob um carregamento de 6912 N.

Tabela 4.7. Resultados de tensões (máxima principal e von Mises) e deslocamentos provenientes das análises de elementos finitos.

	1	2		3		
	C70	Ti-6Al4V laminado	dif. em rel. a 1 (%)	Ti-6Al4V DMLS	dif. em rel. a 1 (%)	dif. em rel. a 2 (%)
Carga de bancada - 6912 N						
Tensão máxima principal (MPa)	630,19	914,32	45,09	914,38	45,10	0,01
Tensão de von Mises (MPa)	576,25	901,01	56,36	901,10	56,37	0,01
Deslocamento ( $\mu\text{m}$ )	66,30	117,70	77,53	117,29	76,91	-0,35
Carga de escoamento (N)	4330,00	6940,00	60,28	7255,00	67,55	4,54
Carga máxima experimental - 9036 N						
Tensão máxima principal (MPa)	689,58	992,70	43,96	1023,40	48,41	3,09
Tensão de von Mises (MPa)	637,87	929,72	45,75	963,07	50,98	3,59

Considerando os resultados mostrados na Tabela 4.7, os valores de tensão máxima principal e von Mises das bielas laminadas e das bielas prototipadas são similares. Dessa maneira, desde que o componente produzido na liga Ti-6Al-4V não seja muito solicitado na

região de regime plástico, as peças advindas do processo DMLS possuem características e propriedades mecânicas equivalentes a de peças geradas por processos de conformação mecânica convencional. É o caso da biela estudada neste trabalho, que possui uma faixa de trabalho desejável abaixo do regime plástico. Nesse sentido, a liga de Ti-6Al-4V, tanto laminada quanto sinterizada, constitui uma boa alternativa ao aço C70 comumente utilizado em bielas.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através dos resultados experimentais obtidos neste trabalho e dos estudos da literatura, foi possível chegar às seguintes conclusões:

1. A liga Ti-6Al-4V surge como um material bastante promissor para substituir outros materiais em componentes automotivos, visto que possui propriedades como baixa densidade aliada a uma boa resistência mecânica e boa resistência à corrosão. No cenário atual, onde os componentes mecânicos estão sendo mais solicitados em termos de carregamentos, tais características positivas podem compensar o custo mais elevado do material. Porém, deve-se verificar se o baixo módulo de elasticidade não seria prejudicial ao funcionamento do componente;

2. O processo de sinterização direta de metais por laser (DMLS) mostra-se bastante eficaz, uma vez que as amostras sinterizadas por laser possuem propriedades mecânicas bastante similares às amostras da liga laminada:

- a. No caso dos valores de dureza e limite de resistência à tração, a amostra obtida por DMLS teve um aumento médio em torno de 10% em relação à amostra laminada, tanto no sentido longitudinal quanto no sentido transversal;
- b. O limite de escoamento da liga Ti-6Al-4V sinterizada foi ligeiramente maior do que a mesma liga laminada e recozida (4%) e;
- c. A liga de titânio obtida por DMLS apresenta uma menor ductilidade em comparação à liga conformada mecanicamente. O valor do alongamento é 34% menor, o que indica uma diferença considerável e maior do que o ganho em dureza. Entretanto, dependendo da aplicação, tais diferenças podem ser minimizadas caso o material não precise trabalhar no regime plástico;

3. Com relação à caracterização microestrutural, a liga de Ti-6Al-4V prototipada por DMLS apresenta uma microestrutura de morfologia martensítica acicular (possui somente fase  $\alpha'$ ) diferentemente da liga laminada e recozida, que possui uma microestrutura equiaxial (contém fase  $\beta$  inserida na matriz  $\alpha$ ), o que pode ser comprovado pelos resultados de MO, MEV e DRX. Isso acontece porque o processo de sinterização direta de metais por laser induz a formação da martensita  $\alpha'$  devido às altas taxas de resfriamento envolvidas no processo. Além disso, os



resultados mostram que a composição química das ligas produzidas pelos dos dois processos são bastante similares e condizentes com as especificações da norma ASTM F136 [2012]. Já os valores de densidade mostram que a liga Ti-6Al-4V prototipada possui uma densidade relativa de 98,9%, apresentando assim uma pequena porosidade;

4. Os resultados dos ensaios de tração das bielas obtidas pelo processo DMLS indicaram que as bielas sinterizadas por laser sofreram ruptura sob cargas maiores do que as cargas de testes de bancada estimadas para uma biela de tamanho real para uma aplicação de motores quatro cilindros de ciclo OTTO. Dessa maneira, o uso da manufatura aditiva em bielas dessa aplicação específica, e em particular da liga Ti-6Al-4V, torna-se factível, uma vez que os resultados dos ensaios mecânicos comprovaram a funcionalidade do componente;

5. Além disso, os resultados dos ensaios de tração das bielas obtidas pelo processo DMLS também mostraram uma boa correlação com os resultados das análises virtuais de elementos finitos, com pequenas diferenças de resultados. Pode-se inferir que essas diferenças ocorrem devido à aproximação bi-linear do material e às condições do teste (presença de folga no acoplamento entre o pino fixado no olhal menor e a superfície do olhal menor, por causa da dimensão do pino). Mas mesmo assim, a análise de elementos finitos, para essa condição de contorno, mostra-se confiável e coerente com os resultados obtidos experimentalmente, permitindo a comparação virtual da biela produzida em Ti-6Al-4V via DMLS com a biela da mesma liga laminada e também de uma biela feita com o material convencional utilizado na indústria (aço C70). O modo de falha obtido virtualmente é o mesmo do teste experimental;

6. Com relação a essa comparação virtual entre as três bielas, pode-se notar que as duas bielas de Ti-6Al-4V possuem resultados de tensões (máxima principal e von Mises) e deformação bastante similares quando sob ação da máxima força teórica dos testes de bancada (6912 N). Isso ocorre uma vez que nessa condição, ambas as bielas de Ti-6Al-4V atuam somente na região elástica, mesmo que muito próximo do limite de escoamento. Nessa condição, as tensões da biela feita de aço C70 são maiores do que o seu limite de escoamento, havendo assim, regiões de deformação plástica. Já com relação à carga de ruptura, neste mesmo ensaio de tração, a situação se inverte. A biela feita de aço C70, sob a carga de 9 KN, encontra-se longe do limite de resistência do material, enquanto as outras duas bielas feitas de Ti-6Al-4V possuem tensões máximas próximas ao limite de resistência à tração. Nesta condição, há uma ligeira vantagem

para a biela laminada em relação à prototipada. Porém, caso a biela seja projetada para não trabalhar no regime plástico, seus resultados serão aceitáveis;

7. Considerando todos os resultados discutidos acima, pode-se afirmar que, para a aplicação da biela analisada neste trabalho, o processo de DMLS da liga de Ti-6Al-4V consiste em uma alternativa real aos métodos convencionais de conformação mecânica. Ou seja, a técnica de DMLS é capaz de fornecer bielas de Ti-6Al-4V com a mesma qualidade encontrada em bielas laminadas da mesma liga. As bielas poderiam ser construídas tanto para validação de design, fazendo parte de um fluxo de desenvolvimento de produto mais rápido, quanto para aplicações funcionais (fazer parte de motores que irão funcionar nas ruas ou em competições). Porém, vale lembrar que, com o intuito de diminuir o efeito de ovalização e as altas deformações do olhal menor, pode-se aplicar um tratamento de superfície nessa região e;

8. Este trabalho mostra que é possível construir e considerar uma metodologia de desenvolvimento de produtos mais rápida e compacta. Ao se utilizar da análise de elementos finitos juntamente com o processo de DMLS, pode-se economizar bastante tempo no desenvolvimento de componentes, como por exemplo, a biela. O método dos elementos finitos torna-se essencial nesta etapa, visto que devido à boa correlação com os testes experimentais, pode-se diminuir consideravelmente a construção de protótipos para serem testados, havendo ganhos em custos de materiais e tempos de funcionamento da máquina de DMLS e de testes. Além disso, neste trabalho, as bielas foram prototipadas em tamanho de escala. As bielas foram construídas com um tamanho duas vezes e meia menor do que a biela real. Ao se testar as bielas com uma carga proporcional, ou seja, duas vezes e meia menor do que a real, não há prejuízo nenhum aos resultados, havendo inclusive, ganhos significativos em economia de material e tempo de projeto.

Tendo em vista os resultados deste trabalho, algumas sugestões para trabalhos futuros podem ser citadas:

- Embora os parâmetros usados na máquina de DMLS tenham sido os recomendados pelo fabricante e considerados ótimos, seria desejável estudar as influências que os parâmetros como a potência e a velocidade de varredura do laser, a distância entre linhas e a espessura de camada causariam nas propriedades mecânicas e microestruturais das amostras e da biela;

- Com os resultados das análises de elementos finitos e a possibilidade de validação experimental usando modelos em escala construídos pelo método de sinterização direta de metais por laser, pode-se considerar o acoplamento de ferramentas de otimização geométrica (paramétrica, topológica e de forma) em trabalhos futuros para se obter a melhor geometria e também outras geometrias que seriam muito difíceis de serem fabricadas por métodos convencionais de manufatura;

- Estudo de tratamentos térmicos adicionais nas regiões dos olhais nas bielas obtidas por DMLS;
- Estudo de tratamentos de superfície nas regiões dos olhais maior e menor da biela;
- Ensaio de compressão no olhal menor da biela;
- Ensaio de tração e compressão no olhal maior da biela;
- Análises virtuais de fadiga da biela e correlação com ensaios experimentais de fadiga e;
- Estudo de outras ligas alternativas à liga Ti-6Al-4V para a produção de bielas por DMLS.

## Referências

AFZAL, A. **Fatigue behavior and life predictions of forged steel and powder metal connecting rods**. 2004. 243p. Dissertação (Mestrado). College of Engineering, The University of Toledo, Toledo.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Specification for Wrought Titanium-6Aluminum-4Vanadium ELI (Extra Low Interstitial) Alloy for Surgical Implant Applications (UNS R56401) – F136 – 12 a**. EUA, 2012. 5p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials – E384 – 11e1**. EUA, 2011. 43p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials – E8/E8M – 09**. EUA, 2009. 27p.

ANSYS, Release 13.0 Documentation. Ansys Inc, 2010, Estados Unidos.

ANTONIALLI, A.I.S. **Uma contribuição ao fresamento frontal da liga de titânio Ti-6Al-4V**. 2009. 116p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

AVL, Excite Designer, v.11. Theory Manual, Austria, 2011.

BANSAL, D.G.; ERYILMAZ, O.L.; BLAU, P.J. Surface engineering to improve the durability and lubricity of Ti-6Al-4V alloy. **Wear**, v.271, n.9-10, p.2006-2015, 2011.

BARBIERI, F.C. **Modificação de propriedades superficiais de ligas de Ti6Al4V por processo de nitretação a plasma**. 2001. 153p. Dissertação (mestrado). Divisão de Ensino Fundamental. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

BATHE, K.J. **Finite Element procedures**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996. 1037p.

BERTOL, L.S. Medical design: direct metal laser sintering of Ti-6Al-4V. **Materials and Design**, v.31, n.8, p.3982-3988, 2010.

BRUNETTE, D.M. et al. **Titanium in Medicine: Material Science, Surface Science, Engineering, Biological Responses and Medical Applications**. New York: Springer, 2001. 1005p.

CALIGNANO, F. et al. Influence of process parameters on surface roughness of aluminum parts produced by DMLS. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.67, n.9-12, p.2743-2751, 2012.

CHACON, H. Structural and fatigue numerical analysis for connecting rods development. **SAE Technical Paper Series**, v.01, n.2515, 11p., 2006.

CIOCCA, L. et al. Direct Metal Laser Sintering (DMLS) of a customized titanium mesh for prosthetically guided bone regeneration of atrophic maxillary arches. **Medical & Biological Engineering & Computing**, v.49, n.11, p.1347-1352, 2011.

COOPER, D. et al. Additive Manufacturing for product improvement at Red Bull Technology. **Materials and Design**, v.41, p.226-230, 2012.

DELGADO, J.; CIURANA, J.; RODRÍGUEZ, C. Influence of process parameters on part quality and mechanical properties for DMLS and SLM with iron based materials. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.60, n.5-8, p.601-610, 2012.

DONACHIE, M. J. **Titanium: A Technical guide**. Russel Township: ASM International, 1988. 469p.

EOS E-MANUFACTURING SOLUTIONS. Disponível em: <http://www.eos.info/en>. Acesso em: 02 de abril de 2013.

ESPERTO, L.; OSÓRIO, A. Rapid Tooling: Sinterização Directa de Laser por Metais. **Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões, Mecânica Experimental**, v.15, p.117-124, 2008.

FACCHINI, L. et al. Ductility of a Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting of prealloyed powders. **Rapid Prototyping Journal**, v.16, n.6, p.450-459, 2010.

FALLER, K; FROES, F.H. The use of titanium in family automobiles: Current trends. **Journal of Minerals, Metals & Materials Society**, v.53, n.4, p.27-28, 2001.

FERREIRA, J.C. Rapid tooling of die DMLS inserts for shoot squeeze moulding (DISA) system. **Journal of Materials Processing Technology**, v.155, n.156, p.1111-1117, 2004.

GATTO, A. et al. Electrodischarge drilling performance on parts produced by DMLS. **International Journal, Advanced Material Technology**, v.58, n.9-12 p.1003-1018, 2012.

GU, D.; Shen, Y. Processing conditions and microstructural features of porous 316L stainless steel components by DMLS. **Applied Surface Science**, v.255, n.5, p.1880-1887, 2008.

JOSHI, V.A. **Titanium Alloys: An Atlas of Structures and Fracture Features**. Boca Raton: Taylor and Francis Group, 2006. 217p.

KO, Y.G. et al. Effects of temperature and initial microstructure on the equal channel angular pressing of Ti-6Al-4V alloy. **Scripta Materialia**, v.48, n.2, p.197-202, 2003.

LIMA e SILVA, R.A. Optimizations methods applied to automotive connecting rod mechanical design. **SAE Technical Paper Series**, v.36, n.0633, 18p., 2013.

LIU, J. et al. Rapid manufacturing metal parts by laser sintering admixture of epoxy resin/iron powders. **Advanced Engineering Materials**, v.8, n.10, p.988-994, 2006.

LOGAN, D. **A First Course in the Finite Element Method**. Pacific Grove: Brooks/Cole: Thomson Learning, 2002. 694p.

LONDHE, A.; YADAV, V.; SEN, A. Finite element analysis of connecting rod and correlation with test. **SAE Technical Paper Series**, v.01, n.0816, 12p., 2009.

LUTJERING, G.; WILLIAMS, J.C. **Engineering and Material Processes: Titanium**. Berlin: Springer, Second Edition, 2007. 497p.

MAZALI, I.O. **Determinação da densidade de sólidos pelo método de Arquimedes**. Laboratório de Química do Estado Sólido, Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, 2010. 11p.

MENDES, A.S. **Desenvolvimento e validação de metodologia para análise de vibrações torcionais em motores de combustão interna**. 2005. 132p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

MOISEYEV, V.N. **Titanium Alloys: Russian Aircraft and Aerospace Applications**. Boca Raton: Taylor and Francis Group, 2006. 206p.

MORCELLI, A.E. **Estudo dos micromecanismos de deformação e fratura da liga de titânio Ti-6Al-4V utilizando-se técnicas de microscopia eletrônica e difração de raios X**. 2009. 126p. Tese (Doutorado). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo.

PAVANELLO, R. **Notas de aula: Introdução ao método dos elementos finitos**. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. 1997. 186p.

PETERS, M. et al. Structure and Properties of Titanium and Titanium Alloys. In: LEYENS, C.; PETERS, M. **Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications**. Weinheim: Wiley-VCH, 2003, cap.1, p.1-36.

PINTO, G.R.R. **Caracterização de ligas à base de titânio com adição de Nb, Zr, Pd para finalidades biomédicas**. 2005. 75p. Dissertação (Mestrado). Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro.

REIF, K. **Bosch Automotive Handbook, 8<sup>th</sup> edition**. Cambridge: Bentley Publishers. 2011. 1266p.

REPGEN, B. Optimized connecting rods to enable higher engine performance and cost reduction. **SAE Technical Paper Series**, n.980882, 5p., 1998.

SACHDEV, A.K. Titanium for automotive applications: Challenges and opportunities in materials and processing. **Journal of Minerals, Metals & Materials Society**, v.64, n.5, p.553-565, 2012.

SANZ, C.; GARCIA NAVAS, V. Structural integrity of direct metal laser sintering parts subjected to thermal and finishing treatments. **Journal of Materials Processing Technology**, v.213, n.12. p.2126-2136, 2013.

SCHAUERTE, O. Titanium in Automotive Production. In: LEYENS, C.; PETERS, M. **Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications**. Weinheim: Wiley-VCH, 2003, cap.18, p.467-482.

SILVA, D. **Análise do erro dimensional dos biomodelos de sinterização seletiva a laser (SLS) e de impressão tridimensional (3DP<sup>TM</sup>) a partir de imagens de tomografia computadorizada, na reprodução da anatomia craniomaxilar: estudo *in vitro***. 2004. 109 p. Tese (Doutorado). Faculdade de Odontologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SHELLABEAR, M.; NYRHILÄ, O. DMLS – Development History and State of the Art. **Proceedings of the Fourth Laser Assisted Net Shape Engineering**, LANE, 2004, Germany. p.21-24.

SIMCHI, A. Direct laser sintering of metal powders: Mechanism, kinetics and microstructural features. **Materials Science and Engineering**, v.428, n.1-2, p.148-158, 2006.

SUGAHARA, T. et al. Caracterização mecânica e microestrutural da liga Ti-6Al-4V tratada termicamente. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, v.27, n.4, p.195-199, 2008.

VANDENBROUCKE, B.; KRUTH, J.P. Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts. **Rapid Prototyping Journal**, v.13, n.4, p.196-203, 2007.

VOLPATO, N. et al. **Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2007. 244p.

WEBSTER, W. A three dimensional finite element analysis of a high speed diesel engine connecting rod. **SAE Technical Paper Series**, n.831322, 15p., 1983.

YU, N. **Process Parameter Optimization for Direct Metal Laser Sintering (DMLS)**. 2005. 149p. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Nacional de Singapura.