

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RODRIGO LOZAN

**FABRICAÇÃO DE PRÓTESES PARA ARTICULAÇÃO:  
UM ESTUDO COMPARATIVO ENTRE PROCESSOS  
CONVENCIONAIS E MANUFATURA ADITIVA EM  
LIGA DE TITÂNIO**



São Carlos -SP  
2024

RODRIGO LOZAN

FABRICAÇÃO DE PRÓTESES PARA ARTICULAÇÃO: UM ESTUDO  
COMPARATIVO ENTRE PROCESSOS CONVENCIONAIS E MANUFATURA  
ADITIVA EM LIGA DE TITÂNIO

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,  
da Universidade Federal de São Carlos,  
para obtenção do título de mestre em  
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof.Dr.Gustavo F. Barbosa  
Coorientador: Prof Dr. Sidney Bruce Shiki

São Carlos - SP  
2024



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

---

**Folha de Aprovação**

---

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Rodrigo Lozan, realizada em 01/03/2024.

**Comissão Julgadora:**

Prof. Dr. Gustavo Franco Barbosa (UFSCar)

Prof. Dr. João Gustavo Pereira da Silva (UFSCar)

Prof. Dr. Jorge Henrique Bidinotto (USP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

“Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais evidente fica nossa ignorância”. (John F. Kennedy)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que em sua infinita bondade, colocou as pessoas e situações necessárias para o processo.

À minha esposa e filho, que com apoio e incentivo, proporcionaram cenário positivo para produção deste trabalho.

Ao meu orientador, Professor Doutor Gustavo Franco Barbosa, por ter aceitado trabalhar ao meu lado, dando suporte e diretrizes para que o trabalho caminhasse dentro do planejado.

Ao coordenador do PPGEMEC e meu coorientador, Professor Doutor Sidney Bruce Shiki, que foi de extrema importância na organização dos tópicos trabalhados.

À empresa Sandinox da cidade de Sorocaba-SP, através da pessoa do Sr Carlos Eduardo, por disponibilizar material para confecção de parte das amostras para ensaio.

À empresa Madisferrus Indústria e Comércio Ltda, na cidade de Araras-SP, por disponibilizar seus equipamentos para produção das amostras usinadas.

Ao CTI, Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer, que na pessoa do pesquisador MSc. Marcelo F. de Oliveira, representando toda a equipe envolvida, foi o responsável pela elaboração das amostras produzidas através de manufatura aditiva.

Ao Sr Bruno Vedovato, da empresa Biopid, responsável pelos ensaios de tração e flexão nas amostras impressas e usinadas.

Ao Senai Araras, através do Sr Eduardo Catai e do professor Shalon Tegis por disponibilizar seu laboratório para utilização do rugosímetro.

Ao Sr Isaias Ferreira dos Reis, da empresa Viscagi, na cidade de Rio Claro-SP, que muito me auxiliou com suas conversas e indicações proveitosas e realização do ensaio de dureza superficial nas amostras impressas e usinadas enviadas.

À CAPES, pelo fomento e financiamento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSCar.

## RESUMO

A engenharia busca alinhar-se com a medicina, buscando soluções para tornar a vida do ser humano cada vez mais confortável, sendo as próteses de articulação que são implantadas diretamente no corpo humano, um exemplo dessa parceria. Assim, o objetivo deste trabalho foi realizar um estudo comparativo entre dois processos primários de fabricação de matéria prima para próteses de articulação, analisando fatores como rugosidade dos acabamentos superficiais e propriedades mecânicas, através da confecção de amostras semelhantes obtidas pelos processos de usinagem convencional e por manufatura aditiva. O produto escolhido para análise foi uma prótese de cabeça do rádio, aplicada em cirurgias denominadas artroplastia parcial do cotovelo. Após ensaios em laboratório de amostras denominadas como corpo de prova, verificou-se as diferenças entre as características mecânicas das peças produzidas a partir dos dois processos de fabricação da matéria prima e o processo posterior de usinagem a que foram submetidos e com isso obter alguns parâmetros de vantagens e desvantagens para cada modelo. O material utilizado foi a liga Ti6Al4V *ELI*, um biomaterial, que já vem sendo utilizado no processo de manufatura aditiva pelo processo *EBM (Electron Beam Melting)*, através de fornecimento de pó metálico para deposição. Para avaliação das características mecânicas utilizou-se ensaio de tração, ensaio de flexão a três pontos, medição de dureza superficial, verificação de rugosidade de acabamento superficial. Os resultados obtidos após os testes demonstraram que os dois processos de fabricação entregam características mecânicas semelhantes, deixando como parâmetro de escolha, entre eles, necessidades mais específicas. Como vantagens do processo de manufatura aditiva em relação à usinagem convencional pode-se destacar: diminuição do material removido; locais em que não se faz necessário elevado nível de precisão, podem ser retirados prontos. As desvantagens são: tempo de processo de manufatura aditiva elevado; custo do processo elevado; qualidade ruim do acabamento.

**Palavras-chave:** Biomaterial. EBM. Propriedades mecânicas. Ensaio de tração.

## ABSTRACT

Engineering seeks to align itself with medicine, seeking solutions to make the life of the human being increasingly comfortable, and joint prostheses that are implanted directly into the human body are an example of this partnership. So, the aim of this research is to conduct a comparative analysis between two primary manufacturing processes employed in the fabrication of joint prostheses, where analysis focuses on evaluation of surface finish roughness and mechanical properties are performed. The product chosen for analysis was a radial head prosthesis, applied in surgeries called partial elbow arthroplasty. To achieve this objective, specimens made of Ti6Al4V alloy were manufactured using both conventional machining and additive manufacturing techniques, specifically Electron Beam Melting (EBM). Following laboratory tests, tensile tests, three-point flexural tests, surface hardness measurements, and surface finish roughness verification were performed to evaluate the mechanical characteristics. The test' results showed that both manufacturing processes yield comparable mechanical characteristics, suggesting that more specific requirements should serve as the primary parameter for selecting between them. Thus, the advantages of the additive manufacturing process over conventional machining include: reduction of removed material during the production, and places where a high level of precision is not required, additively manufactured parts can be removed near net shape. The disadvantages are: high fabrication time, high process cost and poor quality of finishing.

**Keywords:** Biomaterial. EBM. Mechanical properties. Tensile test.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fases de artroplastia de cotovelo.....	15
Figura 2– Rede de Bravais.....	18
Figura 3– Estrutura cristalina do Titânio (HC) (a) e CCC (b).....	19
Figura 4– Mapa de fase - TKD – (apenas fase $\alpha$ – martensítica) .....	20
Figura 5– Posições de deposição de material .....	21
Figura 6– Processo de fusão por feixe de elétron .....	24
Figura 7– Microestrutura de amostra impressa – Arcam – pó para impressão.....	26
Figura 8 – Gráfico ensaio de tração – comparativo de amostras .....	28
Figura 9 – Gráfico de ensaio de tração com amostras semelhantes, produzidas no mesmo processo com matéria prima de origem diferente .....	30
Figura 10 – Desenho adaptado de prótese da empresa GM REIS .....	31
Figura 11 – Prótese produzida pelo processo de manufatura aditiva.....	31
Figura 12 – Perfil de amostras para ensaios de tração.....	33
Figura 13 – Amostras prontas para ensaio de tração unidirecional.....	34
Figura 14 – Perfil para confecção de amostras para teste de flexão.....	34
Figura 15 – Amostras para ensaio de flexão prontas.....	35
Figura 16 – Perfil para confecção das amostras para ensaios de dureza e rugosidade superficial.....	35
Figura 17 – Amostras para ensaio de flexão prontas.....	36
Figura 18 – Início do empençamento do teste de tração.....	37
Figura 19 – Momento do rompimento da amostra durante teste de tração.....	38
Figura 20 – Amostras após realização do ensaio de tração.....	38
Figura 21 - Início de teste de flexão a três pontos.....	40
Figura 22 – Corpo de prova em curvatura durante teste de flexão.....	40
Figura 23 – Amostras após finalização do teste de flexão.....	41
Figura 24 – Rugosímetro Mahr – Senai Araras.....	42
Figura 25 – Modelo de gráficos Ra e Rz.....	42
Figura 26 – Durômetro Galileo.....	43

Figura 27 – Gráficos Tensão x deformação - ensaio de tração - Amostras MA.....	45
Figura 28 – Gráficos Tensão x deformação -ensaio de tração- Amostras Usinada..	45
Figura 29 – Comparativo entre MA e US – Tração .....	46
Figura 30 – Gráficos Tensão x deformação – Ensaio de flexão a três pontos - Amostras MA.....	48
Figura 31 – Gráficos Tensão x deformação – Ensaio de flexão a três pontos – Amostras US .....	48
Figura 32 – Comparativo total entre MA e US.....	49
Figura 33 – Medição de rugosidade de prótese bruta – MA.....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química da liga Ti6Al4V- ELI .....	17
Tabela 2 - Características mecânicas da liga Ti6Al4V.....	18
Tabela 3 - Resultados comparativo EBM V – EBM HOR e Amostra Convencional..	22
Tabela 4 -Tecnologias e materiais aplicáveis a MA.....	23
Tabela 5 - Trabalhos Relacionados Recentes.....	28
Tabela 6– Resultado obtido na microdureza na escala <i>Vickers</i> .....	29
Tabela 7– Quantidade de amostras, processos e normas utilizadas.....	32
Tabela 8 – Parâmetros de usinagem.....	33
Tabela 9 – Ensaio de tração uniaxial – Conforme Norma ASTM E8/E8M.....	44
Tabela 10 – Ensaio de flexão a três pontos – Conforme Norma ASTM 5410.....	47
Tabela 11 – Ensaio de rugosidade superficial conforme norma ABNT NBR 6405....	50
Tabela 12 – Ensaio de dureza superficial - ABNT NBR 4287.....	51

## LISTA DE SIGLAS

Ti 6Al 4V	Liga de titânio
EBM	<i>Electron Beam Melting</i>
ELI	<i>Extra Low Interstitials</i>
MA	Manufatura Aditiva
CAD	<i>Computer Aided Design</i> / Desenho assistido por computador
3D	Três Dimensões (Tridimensional)
ASTM	<i>American Society of Testing and Materials</i>
NBR	Norma Brasileira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
$\alpha$ - $\beta$	<i>Alpha – Beta</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
TKD	<i>Transmission Kikuchi Diffraction</i>
LPBF	<i>Laser Powder Bed Fusion</i>
DMLS	<i>Direct Metal Laser Sintering</i>
STL	<i>Standard Triangle Language</i>
VC	Velocidade de corte

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	12
<b>2. OBJETIVOS</b>	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
<b>3. REVISÃO DE LITERATURA</b>	15
3.1 PRÓTESES PARA ARTICULAÇÃO	15
3.2 TITÂNIO E SUAS LIGAS – ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS	17
3.3 SISTEMA DE FUSÃO POR FEIXE DE ELÉTRONS EBM	22
3.4 INFLUÊNCIA DOS PROCESSOS PRIMÁRIOS DE FABRICAÇÃO NAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DA LIGA DE TITÂNIO	25
3.5 TRABALHOS RELACIONADOS RECENTES	27
<b>4. METODOLOGIA</b>	30
4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE ENSAIO	33
4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL	36
4.3 ENSAIO DE FLEXÃO A TRÊS PONTOS	39
4.4 ENSAIO DE RUGOSIDADE SUPERFICIAL	41
4.5 ENSAIO DE DUREZA SUPERFICIAL	42
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	44
5.1 RESULTADOS ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL	44
5.2 RESULTADOS ENSAIO DE FLEXÃO A TRÊS PONTOS	47
5.3 RESULTADOS ENSAIO DE RUGOSIDADE	50
5.4 RESULTADOS ENSAIO DE MEDIÇÃO DE DUREZA SUPERFICIAL	51
<b>6. CONCLUSÃO</b>	52
<b>REFERÊNCIAS</b>	53
<b>ANEXOS</b>	56

## 1 INTRODUÇÃO

Há tempos a medicina desenvolve e aprimora técnicas para realização de cirurgias de implantes de próteses articulares em seres humanos, buscando como um dos principais objetivos o alívio da dor. Essas cirurgias que basicamente consistem na substituição total ou parcial da articulação natural do corpo por uma peça denominada prótese recebem o nome de artroplastia, e podem ser realizadas em joelho, quadril, tornozelo, ombros e cotovelo, proporcionando além do alívio da dor uma melhora muito grande na mobilidade e qualidade de vida dos pacientes (SELLA et al.,2021).

Nesse processo de desenvolvimento surgem vários desafios encontrados pelas equipes médicas, que se deparam com materiais que podem ser rejeitados pelo corpo humano, fixação dos componentes nas partes ósseas para estabilização, tempo de vida útil da prótese devido a desgastes, probabilidades de cisalhamento da prótese devido a impactos ou movimentos naturais, peso das próteses e qualidade superficial do acabamento, principalmente em itens de contato direto com ossos ou outros materiais, além da precisão dimensional necessária para o bom funcionamento dos itens, e no momento em que a equipe médica e paciente optam pela prótese, como tratamento indicado, devem estar cientes das possíveis complicações que possam surgir dessa técnica.(REZENDE et al., 2023).

É nesse ponto que a engenharia mecânica pode auxiliar no processo de desenvolvimento, realizando estudos e melhorias em conjunto com equipes médicas e laboratórios com o objetivo de obtenção de próteses mais seguras com qualidade e precisão, com materiais que demonstrem menos rejeição pelo corpo humano e com resistência mecânica superior, os diversos processos de fabricação para próteses de articulação vêm se inclinndo cada vez mais para os modelos produzidos com alta tecnologia e diminuição do uso de mão de obra humana, a manufatura aditiva ou impressão 3D é uma dessas alternativas para a fabricação dessas próteses. (FIGUEIREDO; CESAR, 2022).

No entanto, a manufatura aditiva funciona como uma tecnologia que busca otimizar o uso da matéria prima, funcionando como uma espécie de pré-forma para a obtenção do produto final que, até então era obtido através de matéria prima fornecida em barras de seção circular, chapas, ou blocos, produzidos por meio de processos conhecidos como laminação ou extrusão para posteriormente serem

usinados através de processos de usinagem que exigem remoção de material e geram algumas características de acabamentos que influenciam muito nas características de utilização das próteses de articulação e são muito estudados pelo meio acadêmico, principalmente no desenvolvimento de novos parâmetros de usinagem para obtenção de melhores acabamentos superficiais (SILVA et al., 2022).

Existem diversas tecnologias referentes ao processo de impressão 3D em materiais metálicos, porém, a maioria deles consiste na aplicação de uma camada de pó metálico, fundidas por um sistema de laser, onde o produto final é atingido a partir de um arquivo digital CAD 3D, quase sempre é necessário uma placa de construção utilizada como base para garantia de fixação do elemento a ser impresso, que depois deve ser separada do objeto final, vários são os setores industriais que estão investindo nesse tipo de tecnologia, destacando-se como principais as áreas médicas, automobilísticas e aeroespaciais (RENISHAW, 2023).

O problema analisado através deste trabalho foi um estudo comparativo para durabilidade e características mecânicas para uma prótese confeccionada através de processos convencionais por usinagem, utilizando-se matéria prima de seção circular produzida pelo processo de trefilação, e uma prótese confeccionada com tecnologias alternativas através da manufatura aditiva, utilizando-se do processo EBM (*Electron Beam Melting*), destacando que as características químicas dos materiais são as mesmas.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho foi realizar um comparativo referente às características de comportamento mecânico de uma prótese para articulação, utilizada em cirurgia do cotovelo, produzida em liga de Ti6Al4V *ELI*, fabricadas pelos processos de usinagem e manufatura aditiva.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Através da realização de ensaios de tração uniaxial, ensaio de flexão a três pontos, ensaio de rugosidade superficial e ensaio de dureza superficial, investigar se os processos primários de fabricação influenciam na resistência e durabilidade do produto.
- Investigar as vantagens e desvantagens de cada processo de fabricação, utilizados durante o experimento.

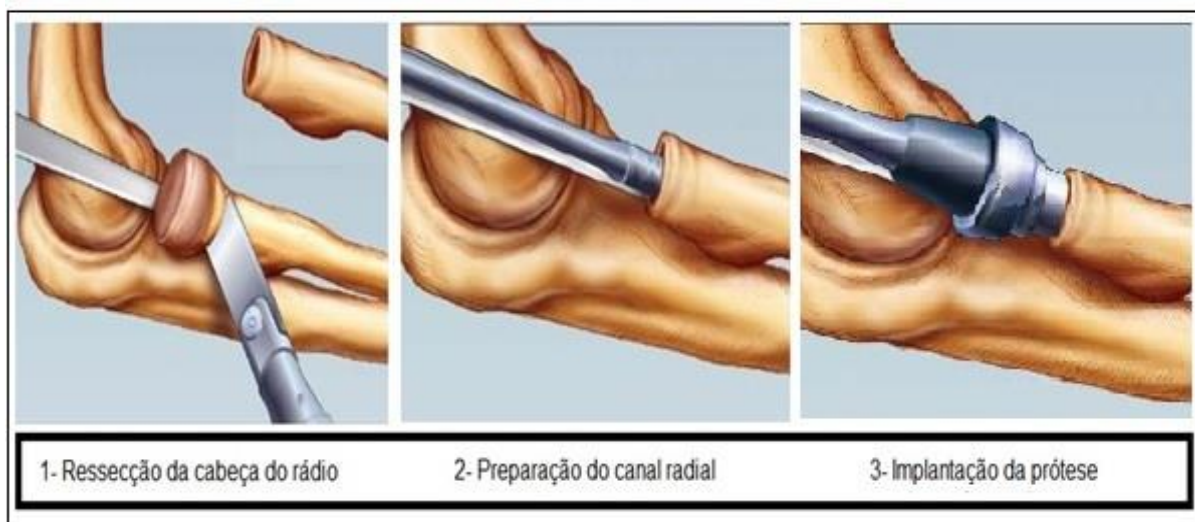
### 3 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo apresenta-se uma verificação do estado da arte sobre os conceitos envolvidos para análise do experimento desenvolvido, mostrando as definições de alguns temas, processos de fabricação e características do comportamento mecânico da liga de titânio em estudo, bem como o que está sendo produzido no meio acadêmico para efeito de comparação com os resultados obtidos no ensaio.

#### 3.1 PRÓTESES PARA ARTICULAÇÃO

As cirurgias de artroplastia podem ser realizadas em diversas partes do corpo, para o trabalho em questão foi escolhida a artroplastia parcial de cotovelo, na Figura 1, pode-se verificar as fases desse procedimento (ROCKWOOD et al. 1991).

Figura 1- Fases de artroplastia de cotovelo



Fonte: Adaptado GM REIS, 2020

O processo de impressão 3D ainda não se apresenta adequado para a produção em massa de próteses e implantes, pois ainda é um processo lento e leva mais tempo para produção de quantidades elevadas de peças (KHALIFA et al., 2021).

Atualmente, as próteses para articulação podem ser fabricadas em diversos tipos de processos diferentes, cada um com suas características específicas, porém essas próteses devem seguir uma normatização, para que não haja divergências, visto que serão utilizadas diretamente no corpo humano e podem apresentar diversos riscos à saúde se não apresentarem as condições adequadas para seu uso (BORGES, 2021).

O processo de manufatura aditiva tem potencial de revolucionar a prática clínica na ortopedia, com a produção de próteses e implantes personalizados a anatomia de cada paciente, com uso de materiais cada vez mais específicos e busca de redução de tempo e custos para os processos, mostrando a constante evolução e avanços tecnológicos (WU et al., 2021).

Os processos de fabricação por usinagem e por manufatura aditiva, ou impressão 3D, são bastante utilizados para esse tipo de prótese, o conceito de manufatura aditiva ainda enfrenta algumas restrições de base tecnológica, que elevam um pouco o custo, mas que pode ser bastante utilizada num futuro próximo (DORNAS et al., 2021).

Rosa (2018), conduziu um estudo onde notou alguns obstáculos referentes a fabricação de próteses para articulação, através do processo de manufatura aditiva, observou progressos relacionados à tecnologia dos processos e acesso de diferentes classes sociais que devido ao alto custo financeiro não tinham perspectiva de uso da tecnologia aplicada, na mesma linha de pesquisa Maciel et al.(2022) conduziram um estudo referente à impressão de próteses em ligas de polímeros, utilizaram como modelo uma prótese de articulação em uma parte do dedo humano, denominado falange, e realizaram estudos em vários polímeros, chegando a conclusão que para o estudo específico que estavam realizando, o material *nylon* mostrou-se mais adequado à aplicação.

Neto (2022), avançou com os estudos referentes à impressão de próteses analisando a manufatura entre dois materiais distintos, titânio e *Peek*, o problema em questão tratado no estudo leva a discussão sobre os resultados finais de acabamento e das dificuldades dos processos de impressão de cada material em arcabouços de próteses articulares, como conclusão, observou-se que o *Peek*, um material da família dos polímeros entregou um melhor acabamento e características cirúrgicas mais adaptáveis, principalmente devido ao processo de manufatura

aditiva em polímeros estar um pouco mais avançado em níveis de tecnologia e ter mais investimentos de recursos.

### 3.2 TITÂNIO E SUAS LIGAS – ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

As ligas de titânio são bastante resistentes, chegando a atingir valores de limite de resistência à tração de 1400 MPa em temperatura ambiente, além de possuírem boa ductilidade, boa usinabilidade e forjabilidade, possuem um ponto de fusão de 1668°C e módulo de elasticidade 107 GPa, com densidade de 4,5 g/cm<sup>3</sup>, é um material com aplicações relativamente recentes em engenharia. O titânio é um material biocompatível, o que o torna um ótimo componente para uso na área biomédica, sua característica de elevada resistência a corrosão o torna interessante para aplicações também em outras áreas da indústria, podendo ser utilizado em componentes de turbinas a gás, aeroespacial, automobilística, naval e uso em utensílios pessoais. A Tabela 1 mostra a composição química para obtenção da liga Ti6Al4V, bem como a porcentagem aplicada de cada componente, conforme norma (ASTM F136, 2013) e a Tabela 2 apresenta algumas características mecânicas referente a liga Ti6Al4V.

Tabela 1 – Composição química da liga Ti6Al4V- ELI

Elemento	Composição, % (Massa/Massa)
Nitrogênio (N)	0.05
Carbono (C)	0.08
Hidrogênio (H)	0.012
Ferro ( Fe)	0.25
Oxigênio (O)	0.13
Alumínio (Al)	5.5 – 6.5
Vanádio (V)	3.5–4.5
Titânio (Ti)	Balanço

Fonte: Norma ASTM F136, 2013

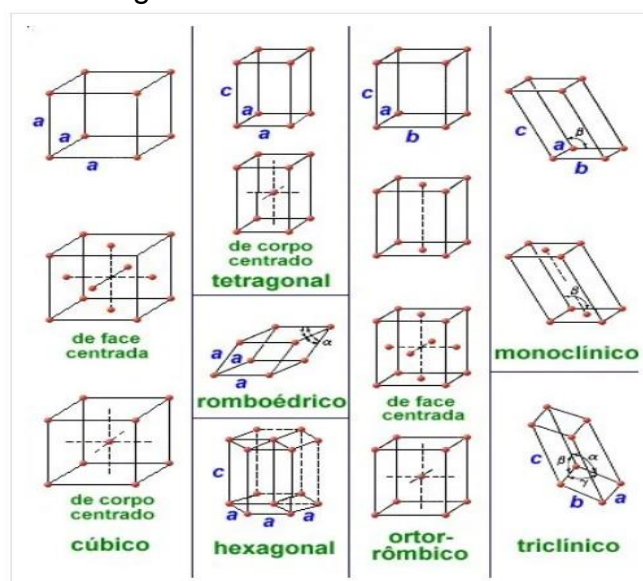
Tabela 2 - Características mecânicas da liga Ti6Al4V

Propriedade	Valor
Densidade	4,43 g/cm <sup>3</sup>
Ponto de fusão	1604 - 1660°C
Resistência à tração	895 - 1170 MPa
Resistência ao rendimento	825 - 1103 MPa
Alongamento	8 – 16%
Módulo elástico	114 GPa
Resistência à fadiga	400 - 500 MPa
Resistência à fratura	55 - 115 MPa·m <sup>1/2</sup>
Resistência à corrosão	Excelente
Biocompatibilidade	Excelente

Fonte: Adaptado de Bauer,2007

O Titânio possui as seguintes classificações no sistema da ASTM (*American Society of Testing and Materials*): não-ligados (Titânio em diferentes níveis de pureza), ligas  $\alpha$ , ligas  $\alpha$ - $\beta$  e ligas  $\beta$ , ou seja, a sua divisão é feita de acordo com a sua estrutura cristalina e com as fases presentes. A designação é feita com alusão direta às quantidades de elementos de liga presentes. A figura 2 mostra as estruturas cristalinas que podem dividir-se em redes, conhecidas como redes de Bravais (SMITH, HASHEMI, 2012).

Figura 2 – Rede de Bravais

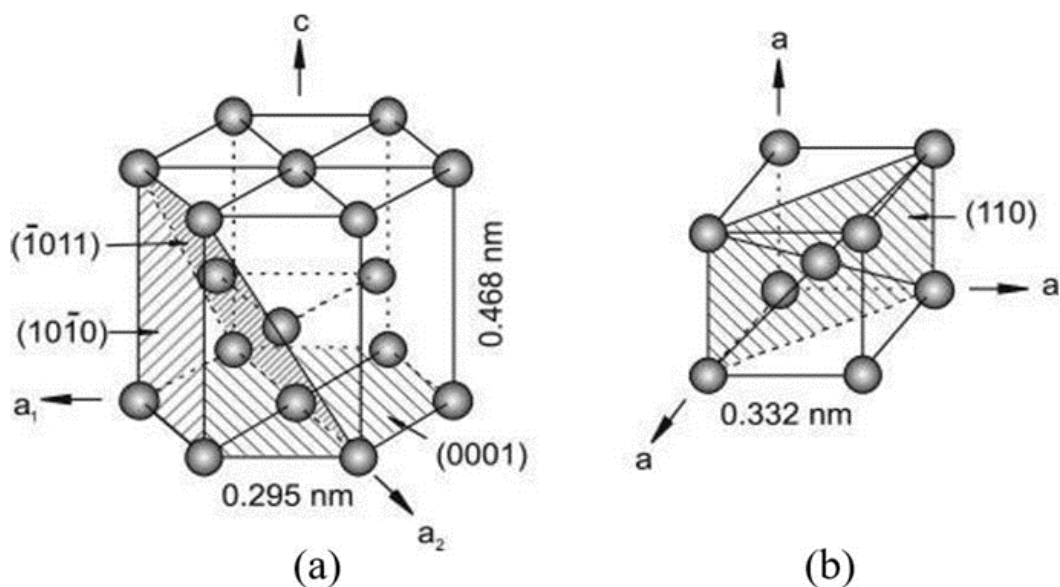


Fonte: Adaptado de Paiva (2022)

Podem ser encontradas comumente três tipos de estrutura cristalina nos metais, Cúbica de Face centrada (CFC), Cúbica de corpo centrada (CCC) e hexagonal compacta (HC), essas estruturas influenciam muito nas propriedades mecânicas do titânio, que possui estruturas cristalinas hexagonal compacta (fase alfa) e cúbica de corpo centrado (beta) presentes a temperatura ambiente, combinando resistência mecânica e resistência a corrosão com conformabilidade e usinabilidade (CALLISTER, RETHWISH, 2016).

O Titânio apresenta duas transformações completas de uma estrutura cristalina para outra cristalizando em baixas temperaturas em uma estrutura hexagonal compacta (HC) figura 3(a), que é chamada de titânio alfa ( $\alpha$ ), ao passo que em altas temperaturas, a fase alfa se transforma em uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), figura 3 (b), denominada titânio beta ( $\beta$ ), que se mantém estável até a temperatura de fusão do titânio, cerca de 1668°C (OLIVEIRA,2022).

Figura 3- Estrutura cristalina do Titânio (HC) (a) e CCC (b)

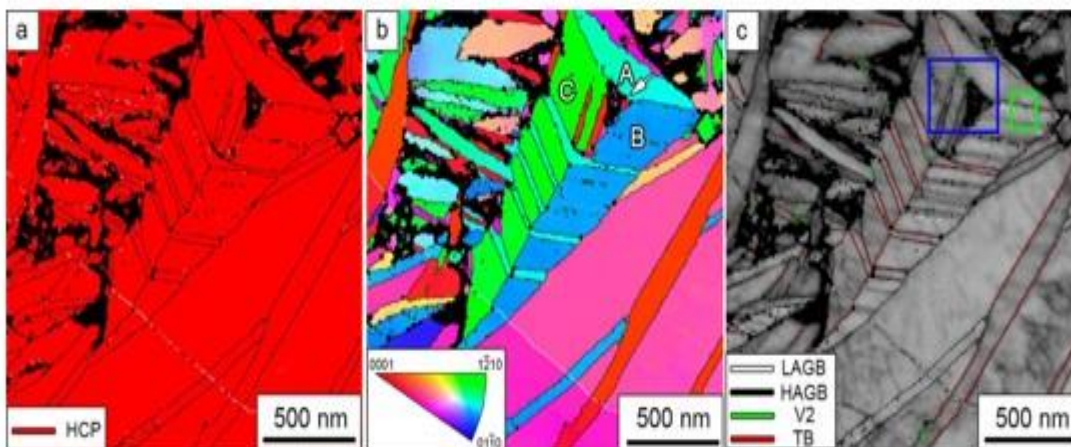


Fonte: Adaptado de Oliveira, 2022

Paiva (2022), estudou as características microestruturas do pó de titânio utilizado na manufatura aditiva, e através dos conceitos das estruturas cristalinas demonstrou através de metalografia e medição de durezas superficiais as diferenças antes e após tratamento térmico da liga de Ti6Al4V, obtendo durezas entre 462 e 493 HV.

Wang et al, (2020), realizaram um estudo que demonstrava as possíveis mudanças de fase em ligas de titânio utilizando um processo aditivo SLM, criando amostras impressas e fatiando-as para análise em microscópio de varredura, para o processo estudado, não encontraram mudança de fase  $\alpha$ - $\beta$ , ficando apenas a fase martensítica  $\alpha$  em evidência. A conclusão mostrou que esse fato pode ter ocorrido devido ao rápido resfriamento do processo, o que causa uma pequena tensão na estrutura, que pode ser sanada posteriormente com um processo de alívio de tensões. A figura 4, apresenta um mapa de fase TKD, onde as imagens (a,b e c) mostram uma microestrutura típica do Ti6Al4V com três orientações diferentes, criando uma forma triangular.

Figura 4 – Mapa de fase - TKD – (apenas fase  $\alpha$  – martensítica)



Fonte: Adaptado de Wang et al, 2020

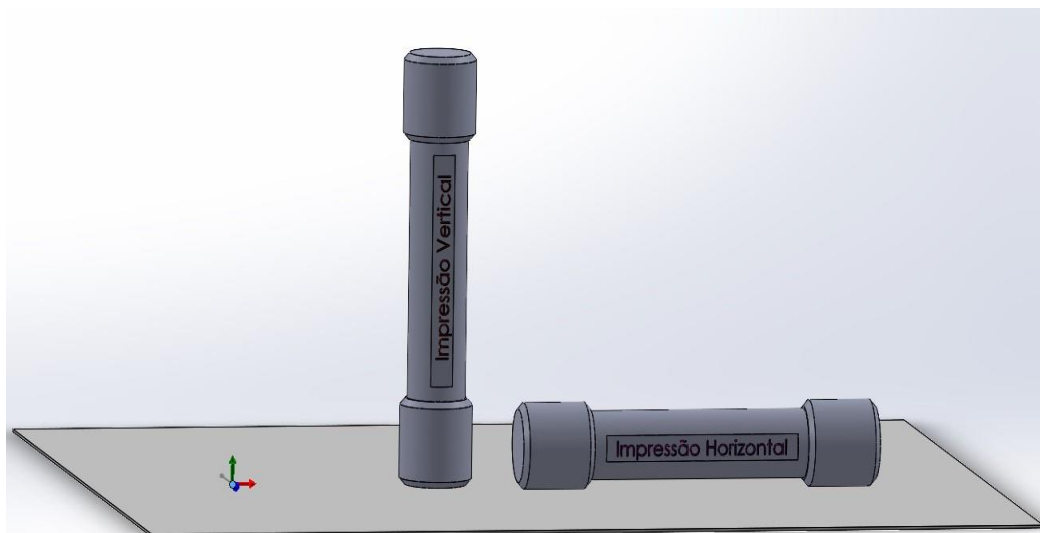
O ensaio de tração unidirecional consiste na aplicação crescente de uma força unidirecional em um corpo de prova, de modo a alongá-lo em uma única direção até sua ruptura, sendo possível extrair importantes informações sobre o material ensaiado, como a tensão de escoamento e limite de resistência à tração (CALLISTER, 1994).

Mirone et al., (2022), realizaram um estudo a respeito da fusão por EBM, produzindo amostras para ensaios em direções diferentes de deposição, com impressão das amostras na vertical e na horizontal, como representado na Figura 5.

Para realização do experimento foram produzidas amostras conforme a norma ASTM E8, para realização de ensaios de tração, com o objetivo de analisar o

comportamento mecânico do material produzido, através de duas orientações diferentes nos modelos de impressão.

Figura 5 – Posições de deposição de material



Fonte: Adaptado de Mirone et al.(2022)

A conclusão após os testes mostrou que a posição de impressão não é um fator determinante para as características mecânicas dos produtos, pois após ensaios observaram-se diferenciações extremamente discretas no resultado dos testes entre os modelos impressos na vertical ou horizontal.

Alves et al. (2020), realizaram um estudo tratando sobre a influência da orientação da deposição de material na impressão 3D, horizontal e vertical, e como essa orientação pode influenciar na microestrutura e usinabilidade do Ti6Al4V. Através de variações de parâmetros e verificações de acabamentos superficiais, analisaram as características dos efeitos térmicos e algumas características de propriedades mecânicas.

Os valores dos testes de tração obtidos para tensão de escoamento demonstrados em gráfico e tabela foi de aproximadamente 1006MPa para a amostra impressa na vertical e de 931MPa a 901MPa nas amostras convencional e impressa na horizontal, considerando as conclusões das propriedades mecânicas, pode-se observar que para a impressão na horizontal houve uma redução de

precipitação da fase  $\beta$ , enquanto na impressão vertical esse fato não se apresentou. A Tabela 3 demonstra a tabela de resultados do estudo.

Tabela 3 – Resultados comparativo EBM V – EBM HOR e Amostra Convencional

Processo	Resistência a Tração (MPa)	Tensão de Escoamento(MPa)	Módulo de Elasticidade E (GPa)	Alongamento (%)
CONV				
	995	932	100	14
	986	931	110	14
	977	930	131	13
Média	986±9	931±1	114±15	13±1
EBM-V				
	1094	1011	115	16
	1075	1004	99	14
	1071	1003	100	5
Média	1080±12	1006±4	105±9	11±5
EBM-H				
	1004	928	110	13
	961	869	117	14
	985	908	112	15
Média	983±21	901±29	113±3	14±1

Fonte: Adaptado de Alves, 2020

### 3.3 SISTEMA DE FUSÃO POR FEIXE DE ELÉTRONS EBM

A manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D, foi um marco na revolução da indústria 4.0, sendo um avanço do processo de prototipagem rápida surgido por volta dos anos 80. A evolução dessa tecnologia com o passar dos anos e como as mais diversas áreas podem fazer uso desse processo (FIGUEIREDO E CESAR, 2022).

Os principais setores que fazem uso dessa tecnologia e vem adquirindo ótimos resultados são a engenharia mecânica, principalmente na área automotiva, a medicina e odontologia através de próteses e implantes, e construção civil, com impressão de maquetes e materiais de concreto e cimentícios. Esse processo

ganhou um salto de tecnologia e tem um campo ainda maior para expansão, principalmente por produzir peças leves e resistentes (JONES E BROWN, 2019).

A evolução da manufatura aditiva tornou possível a impressão em materiais metálicos, Gomes e Wiltgen (2020) apresentaram um artigo com técnicas utilizadas nesse tipo de impressão e alguns custos relacionados a essa técnica. Algumas das tecnologias estudadas foram, *Powder Bed Fusion (PBF)*, *Selective Laser Melting (SLM)*, *Electron Beam Melting (EBM)*, *Direct Metal Laser Sintering (DMLS)*, *Binder Jetting (BJ)*, *Direct Energy Deposition (DED)*, *Sheet Lamination (SL)*. Os materiais que podem ser utilizados em cada técnica são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Tecnologias e materiais aplicáveis a MA

<b>Tecnologia</b>	<b>Matérias-Prima Utilizadas</b>
<i>SLS</i>	<i>Al, Ti, Ligas de Ni, CoCr, Steel</i>
<i>SLM</i>	<i>Al, Ti, Ligas de Ni, CoCr, Steel</i>
<i>EBM</i>	<i>Al, Ti, Ligas de Ni, CoCr, Steel</i>
<i>DMLS</i>	<i>Al, Ti, Ligas de Ni, CoCr, Steel</i>
<i>BJ</i>	<i>WC, W, CoCr, Steel/ Bronze, Steel, Inco</i>
<i>DED</i>	<i>Ti, Ligas de Ni, Steel, Co, Al</i>
<i>UAM</i>	<i>Al, Cu</i>

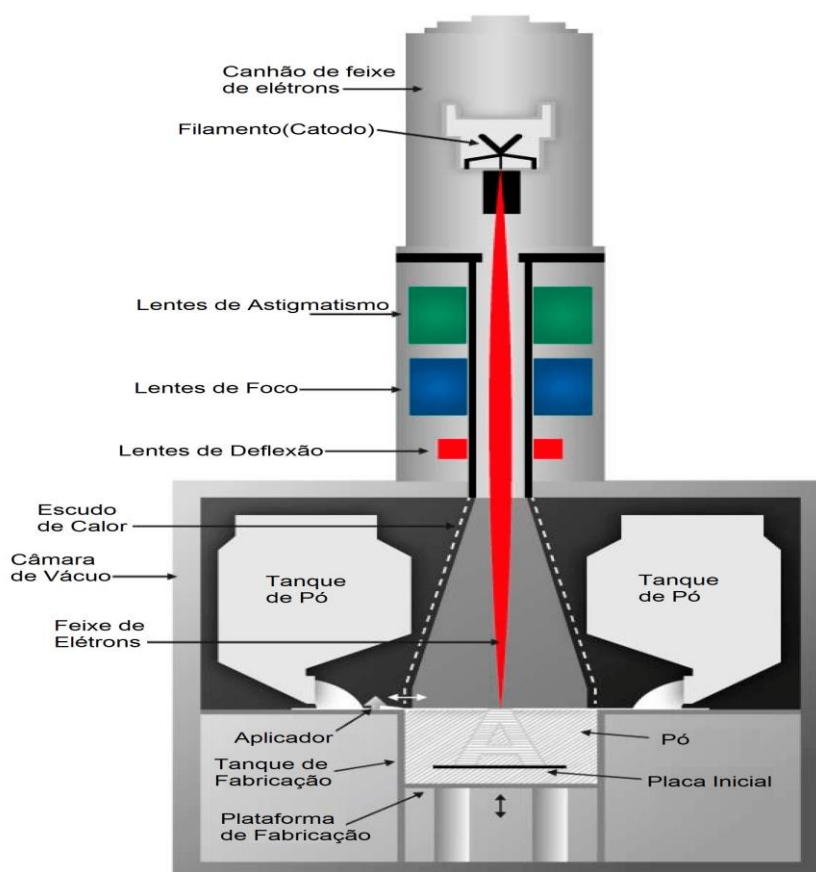
Fonte: Gomes e Wiltgen (2020)

O processo de Fusão por Feixe de Elétrons EBM utiliza um feixe de elétrons de alta potência, que gera a energia necessária para haver uma alta capacidade de fusão e alta produtividade. No processo de fusão por feixe de elétrons, a matéria-prima na forma de pó metálico é colocada em uma câmara de formação de alto vácuo. O sistema de alimentação de uma máquina de fusão por feixe de elétrons espalha o material, camada por camada, controlando rigorosamente a espessura de cada camada. A máquina lê dados de um modelo CAD 3D e, com a ajuda de bobinas eletromagnéticas, controla a precisão do feixe de elétrons em movimento, que derrete as camadas (TSHEPHE et al., 2022).

A partir do aquecimento de pó metálico específico dentro de uma temperatura característica de cada material, as camadas vão sendo depositadas para formar o produto final, que sai praticamente isento de tensões residuais, devido ao trabalho simultâneo entre vácuo e alta temperatura no processo de fusão.

Ao usar a fusão por feixe de elétrons como fonte de calor, os pós metálicos podem ser consolidados em um componente sólido. Esse processo de fusão em leito de pó produz peças de metal totalmente densas, diretamente do pó metálico, com as características do material alvo, conforme Figura 6.

Figura 6 – Processo de fusão por feixe de elétron



Fonte: Adaptado de Tshephe (2022)

As vantagens da impressão por EBM são a capacidade de produzir peças com geometrias complexas, redução de resíduos de material e a possibilidade de utilizar ligas metálicas avançadas. No entanto, desafios como a otimização dos parâmetros do processo, controle da microestrutura e custos, ainda são tópicos de pesquisa atuais (SMITH et al., 2020; SILVA e SOUZA, 2021).

### 3.4 INFLUÊNCIA DOS PROCESSOS PRIMÁRIOS DE FABRICAÇÃO NAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DA LIGA DE TITÂNIO

O foco deste trabalho não foi o estudo profundo dos processos primários de fabricação que podem ser utilizados para obtenção das próteses, porém durante o processo de escrita verificou-se que esses processos influenciam e podem afetar a microestrutura do material. Temas sobre conceitos de usinagem, rugosidade, dureza superficial e testes destrutivos não tiveram muita relevância, pois não fazem parte do tema central do trabalho, foram mostrados apenas os conceitos mais relevantes relacionados ao experimento, para facilitar o entendimento técnico.

As barras de seção circular de titânio são produzidas a partir de um processo de trefilação/extrusão, depois são submetidas ao *stress relieved* e ainda passam por um processo final de tratamento denominado *Annealed* a 705°C, que é um processo semelhante à normalização, após esses processos é realizada a retirada de uma camada superficial denominada alpha case (ASTM 136-13,2013)

Muiruri, et al, (2020), realizaram um estudo direcionado ao *stress relieved*, que é um processo de alívio de tensões após a fabricação por manufatura aditiva, como resultado desse trabalho observaram uma melhora na microestrutura relacionada a fase alpha devido ao processo de resfriamento rápido durante o processo, que também é orientado na norma ASTM F136-13, de acordo com o estudo a tensão de escoamento passou de aproximadamente 900 MPa para 1075 MPa, esse estudo foi realizado em um processo denominado DMLS (*Direct Metal Laser-Sintered*), Mohammadhosseini, et al, (2015), realizaram um estudo semelhante, porém com o processo de adição por EBM, comparando os dois processos de manufatura, observou-se que o EBM, devido às características de deposição não produzem a mesma elevação na tensão de escoamento, ficando mais próximo a tensão de escoamento de um material produzido pelo processo de laminação, que fica em torno de 890 MPa a 945 MPa.

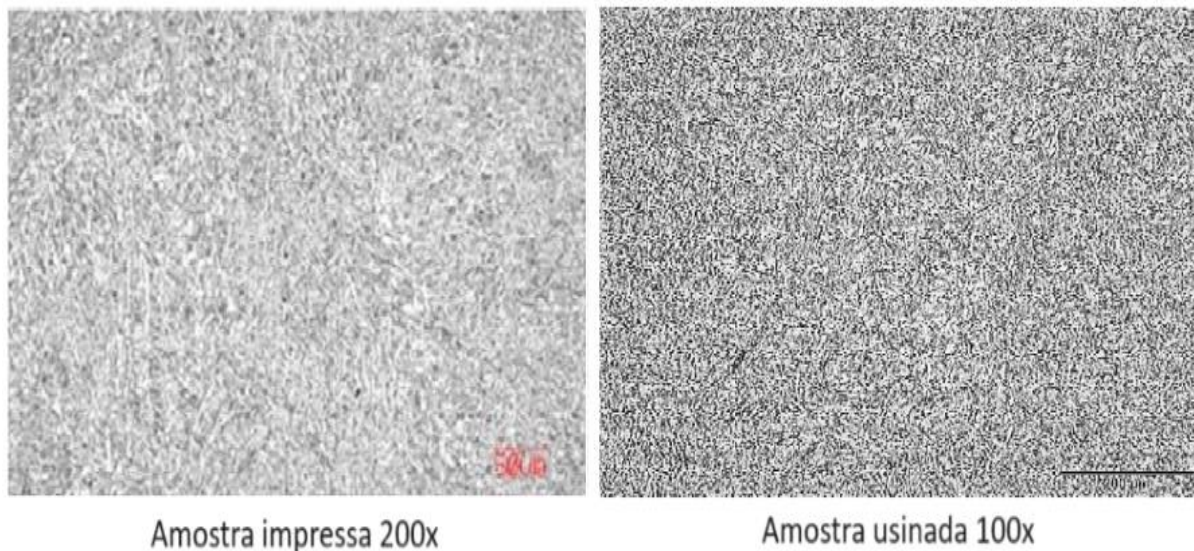
Barbieri (2022), conduziu um estudo onde foi analisado o efeito da anisotropia em materiais impressos em diferentes orientações pelo processo de adição por EBM, a anisotropia é um fenômeno no qual as propriedades de um material variam dependendo da orientação dos grãos da microestrutura, esse fenômeno torna-se indesejado em algumas aplicações com materiais metálicos e

são mais desejáveis em materiais que passam por conformação mecânica.

Com relação aos materiais obtidos por meio da manufatura aditiva sabe-se que existe um efeito anisotrópico microestrutural, proveniente de defeitos internos e poros que podem influenciar nas propriedades mecânicas macroscópicas dos produtos (CAO et al.,2022)

A microestrutura dos processos de fabricação por deposição, através de manufatura aditiva são extremamente parecidas com as do processo convencional e podem ser observados na figura 7, obtidos a partir de literaturas dos fabricantes dos materiais.

Figura 7 – Comparativo da microestrutura entre Amostras MA e Convencional – Arcam – pó para impressão



Fonte: Arcam, 2023

A produção das próteses pode passar por inúmeros processos para obtenção do produto, para este estudo analisou-se o processo de usinagem para melhoria das características de acabamento superficial das peças, diversos são os estudos no meio acadêmico que demonstram a influência dos acabamentos de superfície no comportamento mecânico das próteses. Os processos utilizados no estudo foram o torneamento e o fresamento.

Segundo Ferraresi (1970), a operação de usinagem pode ser entendida como processo que confere a peça sua forma, dimensões e acabamento através da

remoção de material sobressalente na forma de cavacos.

Torneamento é um processo de manufatura subtrativo destinado a obtenção de superfícies de revolução com o auxílio de uma ou mais ferramentas de corte estacionária, onde a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca, simultaneamente, seguindo uma trajetória coplanar com o eixo referido, são obtidas formas cilíndricas, geralmente não muito complexas, com uma ferramenta de corte usinando com uma única aresta, ou seja ferramenta mono cortante (FERRARESI, 1970).

A operação de fresamento consiste na remoção do material de forma intermitente, através do movimento de rotação e translação com ação multicortante da ferramenta, obtendo superfícies de diversas formas. A peça e a ferramenta podem assumir movimentos relativos, combinados ou independentes, permitindo acabamentos planos, curvos, ranhuras, entre outros, e podem ser desenvolvidas diversas ferramentas (FERRARESI, 1977).

Festas et al, (2021), conduziram um trabalho referente à usinagem em ligas de titânio, esse estudo levou em consideração processos diversos, que incluíram torneamento e fresamento, nele foram atribuídas diversas velocidades de corte e avanços utilizando o mesmo tipo de ferramenta, a conclusão foi que para as operações de torneamento e fresamento uma velocidade de corte com boa característica fica em torno de 100m/min, e o avanço ideal fica em torno de 0,3mm/rev para torneamento e 0,1mm/dente no fresamento.

### 3.5 TRABALHOS RELACIONADOS RECENTES

Para demonstrar de forma mais clara o estado da arte e realizar um comparativo de alguns trabalhos semelhantes com o intuito de demonstrar como esse trabalho pode contribuir com o avanço da fronteira da ciência através da pesquisa de palavras chaves pesquisadas, verificou-se o que vem sendo estudado relacionado ao assunto referente a manufatura aditiva conforme verificado na tabela 5.

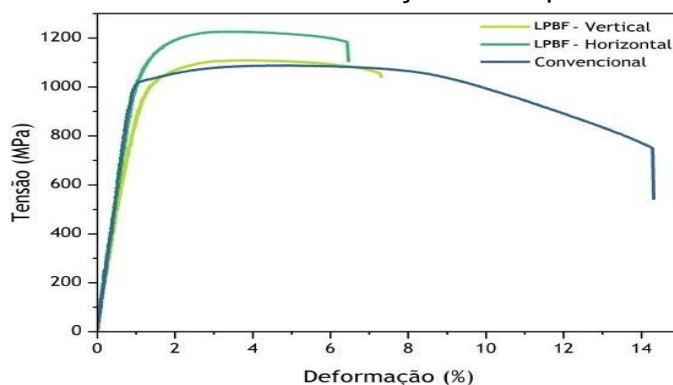
Tabela 5 – Trabalhos Relacionados Recentes

TRABALHOS RELACIONADOS RECENTES
Nunes, 2021 – Ti-6Al-4V Produzido por Manufatura Aditiva - Efeito do Tratamento térmico
Silva, 2023 – Comparação da microestrutura e dureza do Titânio Puro e da Liga Ti-6Al-4V fabricada por manufatura aditiva
Yáñez, 2022 – <i>The Influence of Dimensions and Powder Recycling on the Roughness and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Parts Fabricated by Laser Powder Bed Fusion</i>

Fonte: Próprio Autor, 2023

Nunes (2021), conduziu um experimento comparando as características mecânicas da liga Ti6Al4V produzida por processos de manufatura aditiva e por processos convencionais, o processo de adição utilizado foi o LPBF, e as caracterizações de propriedades mecânicas obtidas através de ensaios de tração, utilizando-se a mesma norma de padronização para as amostras produzidas em processos diferentes, observou-se que para esse teste, o processo LPBF com amostra impressa na horizontal demonstrou um resultado superior a amostra convencional e a amostra impressa na vertical, com tensão limite de escoamento próximo de 1200 MPa para a amostra de LPBF horizontal e para as demais entre 1050MPa e 1100 Mpa, demonstrando ligeiramente uma melhora das características mecânicas utilizando o processo de impressão na horizontal, como se pode observar na figura 8.

Figura 8 – Gráfico ensaio de tração – comparativo de amostras



Fonte: Adaptado Nunes (2021)

Silva (2023), contribui academicamente realizando um trabalho de comparação entre ligas de titânio, focando na microestrutura e dureza, através de um experimento de medição de durezas na escala *Vickers*, obteve alguns resultados que puderam ser utilizados como parâmetro de comparação com os resultados obtidos no meu experimento, a tabela 6, mostra os resultados encontrados.

Tabela 6 – Resultado obtido na microdureza na escala *Vickers*

<b>Material</b>	<b>Dureza Média (HV)</b>
Titânio Puro	192±7
Liga Ti6Al4V por DMLS	358±7
Liga Ti6Al4V sinterizada a 1300° C	352±7
Liga Ti6Al4V sinterizada a 1400° C	433±7

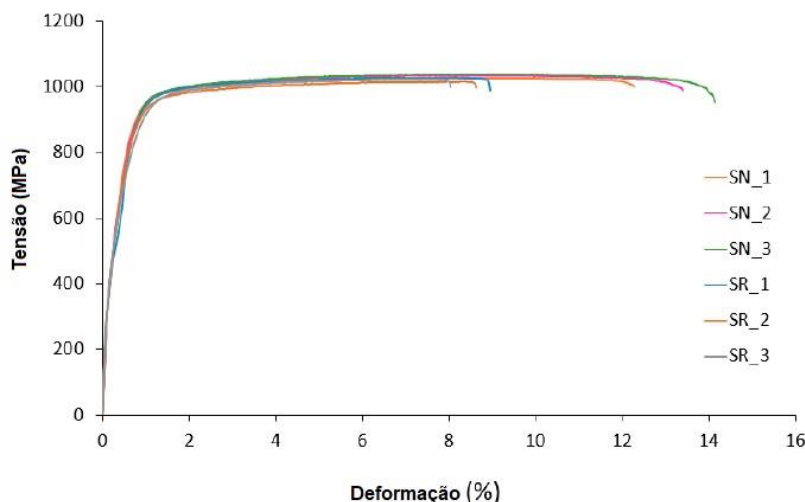
Fonte: Adaptado de Silva (2023)

O processo de MA utilizado por Silva foi o DMLS, e a principal medida de interesse foi a referente a Liga Ti6Al4V por DMLS, com resultado de 358 HV, que ficou dentro do padrão considerado pela Metals,1990.

Yáñez (2022), realizou um trabalho onde comparou por meio de ensaios de laboratório amostras da liga de titânio produzidas por manufatura aditiva com o processo LBPF, utilizando-se de pó metálico novo e pó metálico reciclado.

Os ensaios realizados foram semelhantes ao utilizado no meu trabalho, com o diferencial do tipo de comparação, porém observa-se que o resultado de um dos ensaios de tração realizado com um corpo de prova semelhante, gerou um gráfico de comparação onde as curvas praticamente se sobrepõem, indicando semelhança nas características mecânicas obtidas através do módulo de Young, como verificado na figura 9.

Figura 9 – Gráfico de ensaio de tração com amostras semelhantes, produzidas no mesmo processo com matéria prima de origem diferente



Fonte: Adaptado de Yáñez (2022)

## 4 METODOLOGIA

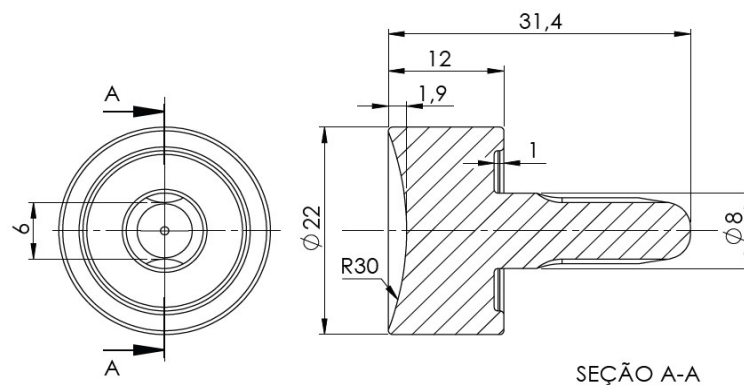
A motivação central desse trabalho foi verificar as propriedades mecânicas de uma prótese para articulação utilizada em cirurgias do cotovelo, produzida em liga de Ti6Al4V-ELI, fabricadas a partir de matéria-prima obtidas pelo processo de usinagem e manufatura aditiva. Inicialmente imaginou-se comparar os processos de usinagem e manufatura aditiva, porém como a impressão 3D ainda não atingiu o patamar de ser utilizado sem necessidade de processos posteriores, o conceito foi alterado para comparação das propriedades da matéria prima.

Os ensaios mecânicos são procedimentos padronizados executados em materiais, obtendo-se através de tabelas, cálculos e gráficos simulações reais de uso chegando até o limite das solicitações, para que se alcance os resultados esperados é importante conhecer o material que será construído o produto. As propriedades mecânicas que podem ser encontradas em diversos materiais são diversas, entre elas, resistência à tração, resistência à compressão, cisalhamento, fadiga, módulo de elasticidade, ductibilidade, fragilidade, resiliência, plasticidade, tenacidade e dureza.

Utilizando-se um modelo autorizado pela empresa GM REIS, da cidade de Campinas, foi realizado um desenho por semelhança da prótese código 235-04 com

descrição “prótese parcial para cabeça de rádio – grande”, disponível no catálogo de instruções de uso do fabricante, figura 10.

Figura 10 – Desenho adaptado de prótese da empresa GM REIS



Fonte: Próprio Autor, 2023

Mesclando-se algumas características do desenho com algumas normas técnicas, buscou-se uma aproximação de situação de uso real para avaliar se a manufatura aditiva entrega características semelhantes ao processo de extrusão. A figura 11 demonstra a prótese produzida pelo processo de manufatura aditiva.

Figura 11 – Prótese produzida pelo processo de manufatura aditiva



Fonte: Próprio Autor, 2023

Utilizou-se um total de três amostras cada modelo para realização da comparação dos resultados dos ensaios, com o intuito de comparação do funcionamento de cada matéria prima utilizada em cada processo, utilizando a mesma norma para ensaios semelhantes.

Os ensaios foram: Ensaio de tração unidirecional, conforme norma ASTM E8/E8M, Ensaio de flexão a três pontos, conforme norma ASTM A370 *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*, Ensaio de dureza superficial, conforme norma ABNT NBR ISO 4287, ensaio de rugosidade superficial, conforme norma ABNT NBR 6405, as quantidades de amostras, processos utilizados para fabricação e normas utilizadas, podem ser verificados na tabela 7.

Tabela 7 – Quantidade de amostras, processos e normas utilizadas

AMOSTRAS	Nº de amostras	Processo de Fabricação da Matéria prima	Processo Posterior de Usinagem	Norma utilizada
Ensaio de tração unidirecional	3	Manufatura aditiva - EBG	Torneamento	E8/E8M
Ensaio de tração unidirecional	3	Barra extrudada	Torneamento	E8/E8M
Ensaio de flexão a 3 pontos	3	Manufatura aditiva - EBG	Torneamento	ASTM A370
Ensaio de flexão a 3 pontos	3	Barra laminada	Torneamento	ASTM A370
Ensaio de Rugosidade e dureza superficial	3	Manufatura aditiva - EBG	Fresamento	6405,4287
Ensaio de Rugosidade e dureza superficial	3	Barra laminada	Fresamento	6405,4287

Fonte: Próprio autor, 2023

A usinagem das amostras foi realizada seguindo o conceito de confecção com os mesmos parâmetros para amostras semelhantes produzidas em processos distintos, a tabela 8 indica alguns dos parâmetros utilizados nos processos de torneamento e fresamento.

Tabela 8 – Parâmetros de usinagem

Parâmetros utilizados para usinagem			
Torneamento	Rotação [RPM]	(Vc)[m/min]	Ap máx [mm]
Inserto WCNMT - Tungaloy	1300	120	0,5mm
Fresamento	Rotação [RPM]	Vc [m/min]	Avanço [mm/dente]
(Fresa APKT Ø16mm)	1400	140	0,1

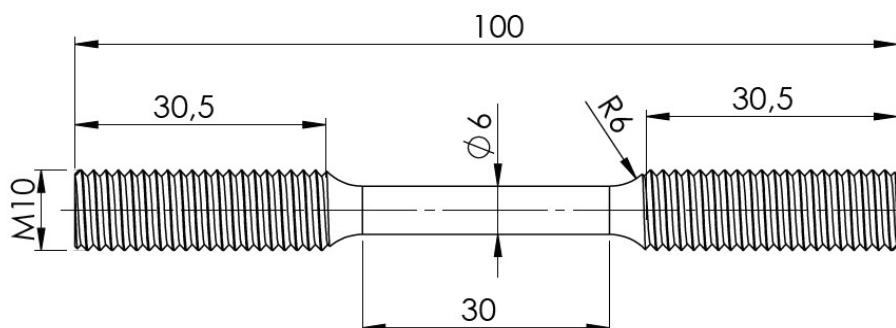
Fonte: Próprio autor, 2023

#### 4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ENSAIO

As amostras utilizadas para os ensaios decorrentes do processo de manufatura aditiva serão feitas em parceria com os laboratórios abertos do CTI Renato Archer, Unidade de pesquisa do MCTI, na cidade de Campinas-SP, onde o equipamento utilizado para a impressão será o *EBM/ARCAM*, através de envio de arquivos *CAD* tridimensional, com extensão *STL*.

O perfil do corpo de prova para o ensaio de tração unidirecional é demonstrado na figura 12, e as imagens das amostras prontas estão demonstrados na figura 13.

Figura 12 – Perfil de amostras para ensaios de tração



Fonte: Próprio Autor, 2023

Figura 13 – Amostras prontas para ensaio de tração unidirecional

Tração usinado



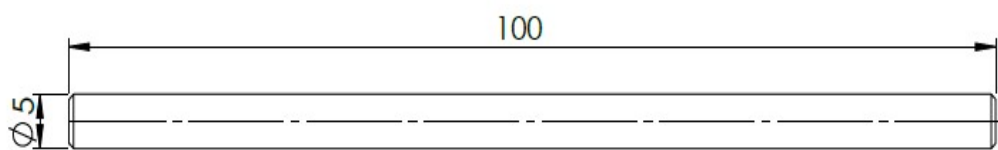
Tração MA



Fonte: Próprio Autor,2023

Para o ensaio de flexão a três pontos, o perfil utilizado está demonstrado na figura 14, e as amostras prontas podem ser verificadas na figura 15.

Figura 14 – perfil para confecção de amostras para teste de flexão



Fonte: Próprio autor,2023

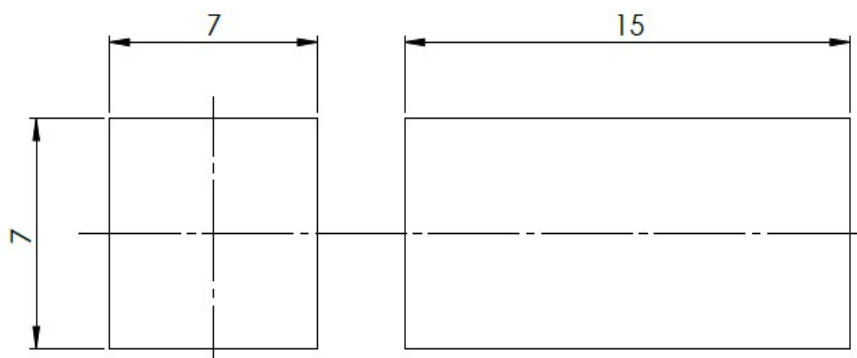
Figura 15 – Amostras para ensaio de flexão prontas



Fonte: Próprio autor,2023

Para o ensaio de dureza superficial o perfil utilizado está demonstrado na figura 16, e as amostras prontas podem ser verificadas na figura 17, as mesmas amostras foram utilizadas para verificação do ensaio de rugosidade após usinagem.

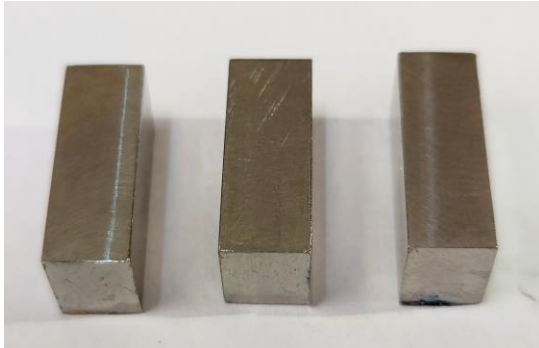
Figura 16 - Perfil para confecção das amostras para ensaios de dureza e rugosidade superficial



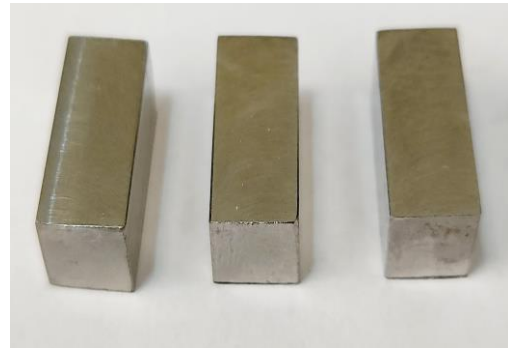
Fonte: Próprio autor,2023

Figura 17 – Amostras para ensaio de flexão prontas

Usinado (Dureza e Rugosidade)



MA – ( Dureza e Rugosidade)



Amostras para rugosidade em bruto



Fonte: Próprio autor,2023

## 4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL

O ensaio de tração uniaxial é um tipo de ensaio mecânico com características destrutivas , onde um corpo de prova é submetido a uma força uniaxial deformando a amostra até o rompimento, os valores de força aplicados e as posições de deformação possibilitam a criação de uma tabela de dados que posteriormente pode gerar um gráfico tensão x deformação, possibilitando a análise de algumas tensões importantes, como tensão limite de escoamento, tensão de ruptura, passagem da região elástica para a região plástica e região de encruamento e estrição.

Para a verificação do ensaio de tração foram construídas amostras pelo processo de manufatura aditiva e pelo processo de usinagem com material de

seção circular obtido pelo processo de laminação, na amostra confeccionada por manufatura aditiva, foi necessária a utilização de processo posterior de torneamento, pois a qualidade de acabamento superficial encontrava-se com um grau de acabamento ruim, de modo perceptível a olho nu, sendo assim, para que a comparação se desse de forma mais equivalente optou-se pela execução do processo de usinagem.

O equipamento utilizado foi uma máquina universal de ensaio de tração Biopid, célula de carga 50KN, velocidade do teste 5 mm/min, pré carga 300N. A figura 18 mostra o corpo de prova com início do empescoçamento.

No início do processo de ensaio, durante a definição dos primeiros parâmetros para obtenção dos resultados, verificou-se que as amostras fixadas através da rosca tiveram uma leve movimentação nas garras, após essa verificação optou-se por retirar levemente as cristas das roscas e fixar diretamente na garra lisa, o que resultou em melhor travamento das amostras, gerando resultados mais confiáveis.

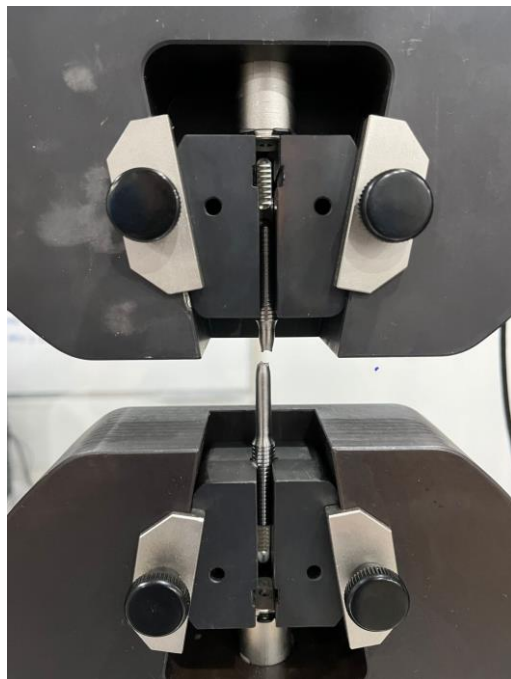
Figura 18 – Início do empescoçamento do teste de tração



Fonte: Próprio Autor, 2023

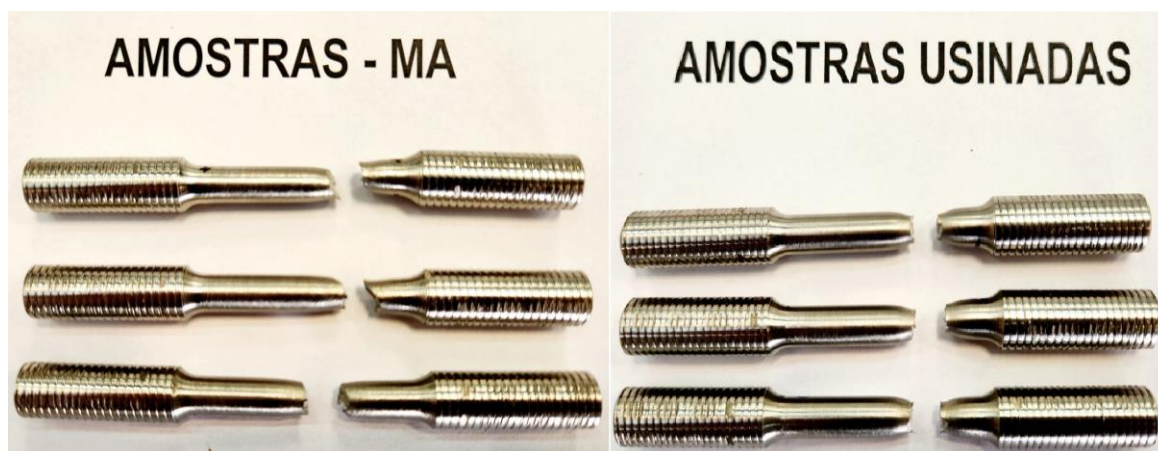
A figura 19 mostra o momento do rompimento da amostra e a figura 20 mostra as amostras após a realização do teste, pode-se observar que quase todas romperam de forma semelhante.

Figura 19 – Momento do rompimento da amostra durante teste de tração



Fonte: Próprio autor, 2023

Figura 20 – Amostras após realização do ensaio de tração



Fonte: Próprio Autor, 2023

### 4.3 ENSAIO DE FLEXÃO A TRÊS PONTOS

O ensaio de flexão a três pontos é um teste que gera resultados semelhantes ao ensaio de tração uniaxial, porém os dados são coletados a partir da curvatura de uma amostra que é apoiada em dispositivos e aplica-se uma carga gradual no centro da amostra. À medida que essa carga é aplicada, e conseqüentemente, o corpo de prova deforma-se, possibilitando a coleta de valores da força aplicada versus a posição de deformação, os valores permitem posteriormente a geração de gráficos tensão x deformação que possibilitam a verificação de características mecânicas, como resistência à flexão, ductibilidade e rigidez.

Para a verificação do ensaio de flexão a três pontos foram construídas amostras pelo processo de manufatura aditiva e pelo processo de usinagem com material de seção circular obtido pelo processo de laminação, na amostra confeccionada por MA, foi necessário a utilização de processo posterior de torneamento, pois a qualidade de acabamento superficial encontrava-se com um grau de acabamento ruim, de modo perceptível a olho nu, sendo assim, para que a comparação se desse de forma mais equivalente optou-se pela execução do processo de usinagem, a escolha desse processo foi pela redução do comprimento do corpo de prova.

O equipamento utilizado foi uma máquina universal de ensaio de flexão, Biopid, célula de carga 10KN, velocidade do teste 10 mm/min, pré carga 250N, posição máxima de curvatura, 20mm, a figura 21 mostra o corpo de prova com início da flexão e a figura 22 demonstra o corpo de prova em curvatura durante o teste de flexão.

Figura 21 - Início teste de flexão a três pontos



Fonte: Próprio autor, 2023

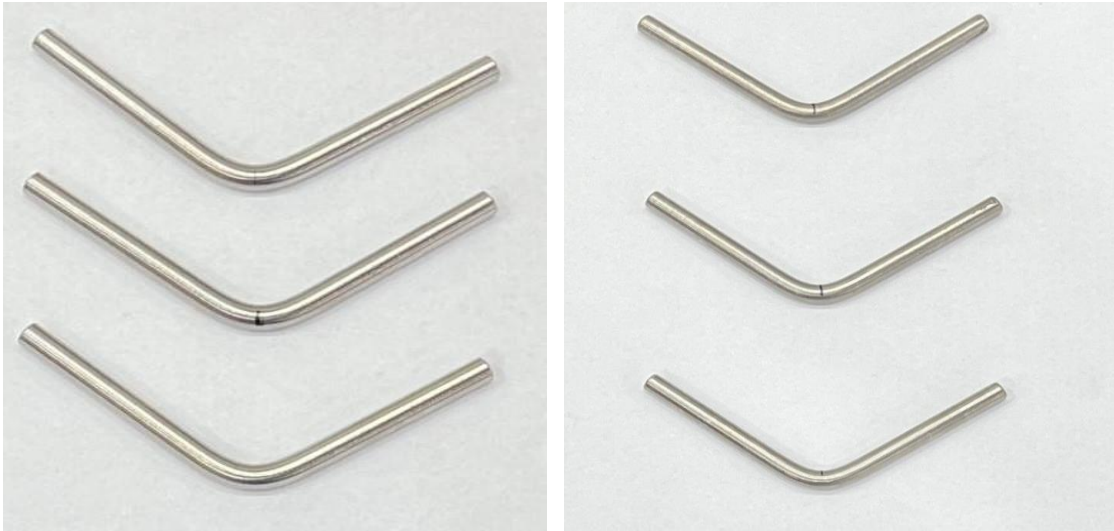
Figura 22 – Corpo de prova em curvatura durante teste de flexão



Fonte: próprio autor, 2023

Na figura 23, pode-se verificar as amostras após o final do teste de flexão, todas atingiram o deslocamento máximo sem ruptura.

Figura 23 – Amostras após finalização do teste de flexão



Fonte: Próprio Autor, 2023

#### 4.4 ENSAIO DE RUGOSIDADE SUPERFICIAL

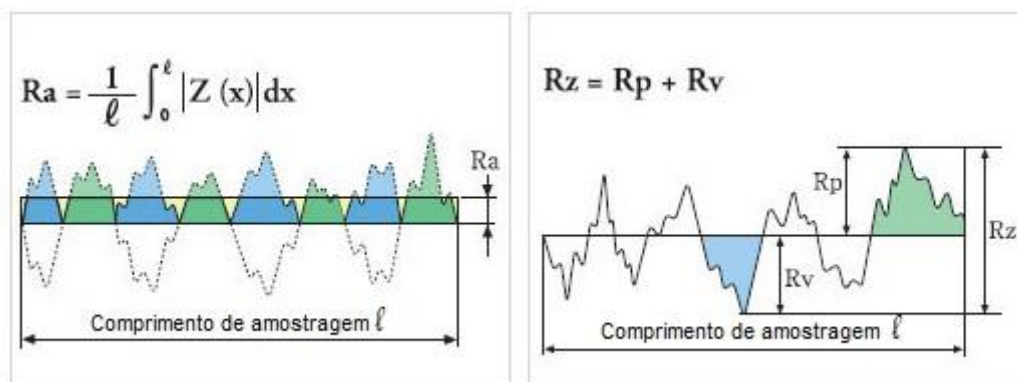
A rugosidade superficial pode ser entendida como um conjunto de pequenos picos e vales em uma determinada superfície, que pode ser medida com um instrumento denominado rugosímetro, que possui em sua ponta um apalpador semelhante a uma agulha que percorre o comprimento de cinco vezes o comprimento de amostragem e identifica as alturas das discordâncias. A característica de rugosidade superficial também está citada na norma ABNT NBR 4287, referente a ensaios em próteses ortopédicas, pois é um item importante tanto nas características mecânicas quanto para contatos direto entre materiais articulares. Na figura 24 observa-se a imagem do rugosímetro utilizado para verificação das amostras e a figura 25 demonstra o formato de uma medição em Ra e uma medição em Rz.

Figura 24 – Rugosímetro Mahr – Senai Araras



Fonte: Próprio Autor, 2023

Figura 25 – Modelo de gráficos Ra e Rz



Fonte: Adaptado de Sthein, 2014

#### 4.5 ENSAIO DE DUREZA SUPERFICIAL

O Ensaio de dureza superficial conforme norma ABNT NBR 4287, foi utilizado para verificação das amostras impressas e convencionais, que sofreram processo de fresamento e também foi realizado medição nas peças como entregues, ou seja antes do processo de usinagem, o que permitiu o comparativo da liga de Ti6Al4V em cada processo.

Para verificação da medida em Brinell ou HB, foi realizado a medição em HRC e feito a conversão utilizando-se tabelas adequadas, o equipamento utilizado para esse tipo de medição é o Durômetro, esse ensaio foi realizado no laboratório

da empresa Viscagi, na cidade de Rio Claro, A figura 26 demonstra o equipamento utilizado para realização das medições.

Figura 26 – Durômetro Galileo



Fonte: Próprio autor, 2023

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 RESULTADOS ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL

A tabela 9 demonstra a identificação das amostras para realização do ensaio de tração uniaxial, MA para os ensaios com manufatura aditiva e com US para os ensaios com o material usinado.

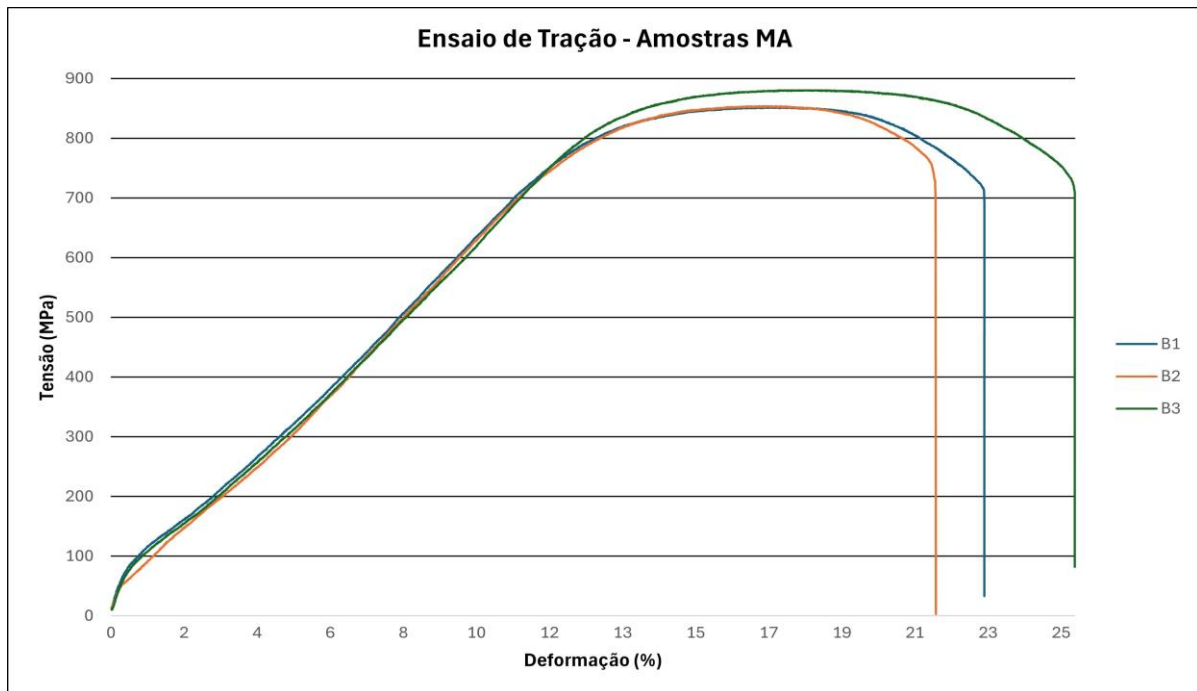
Tabela 9 - Ensaio de tração uniaxial – Conforme Norma ASTM E8/E8M

AMOSTRAS	Tensão de escoamento (MPa)	Limite de resistência a tração (MPa)	Alongamento percentual após ruptura (%)
MA-01	767,70	852,34	12,2
MA-02	744,25	853,99	11,33
MA-03	801,33	880,64	16,5
US- 01	831,66	899,74	14,86
US- 02	854,82	893,90	13,2
US- 03	846,71	897,59	11,73

Fonte: Próprio Autor, 2023

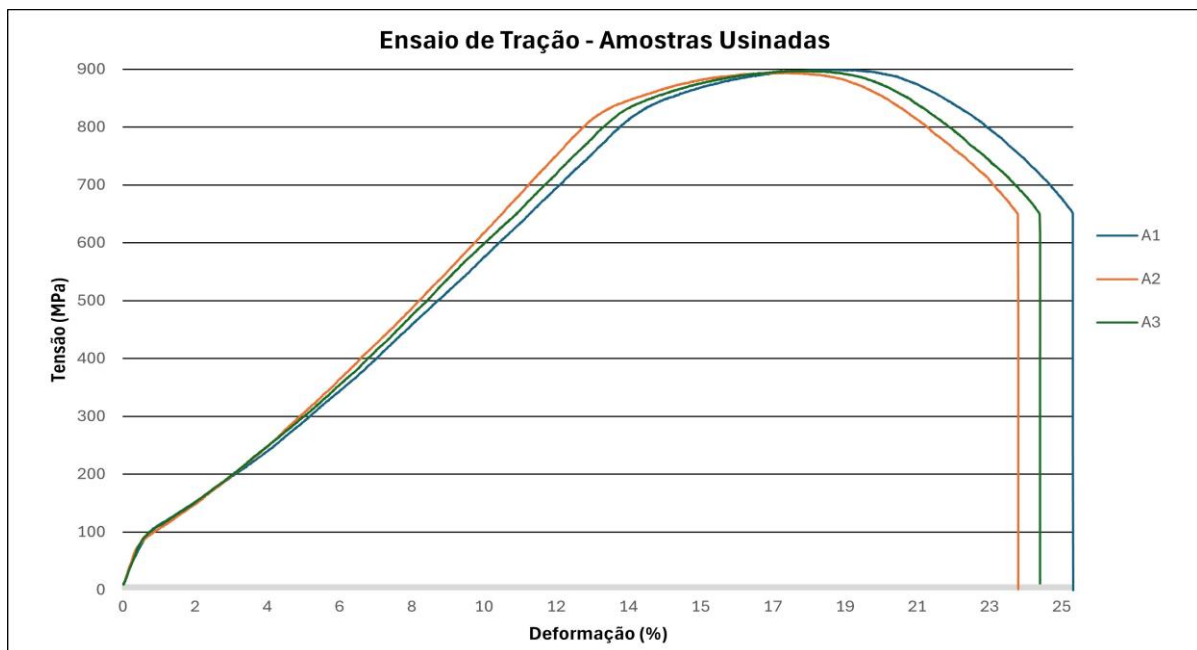
Após as verificações das amostras em laboratório e comparações entre os modelos usinado e impresso, foram gerados gráficos e tabelas com os resultados dos testes de tração uniaxial. A figura 27 demonstra um comparativo dos testes feitos com as amostras MA, a figura 28 mostra os resultados referentes às amostras usinadas, os resultados completos referentes aos testes encontram-se no capítulo “anexos”, no final do trabalho.

Figura 27 - Gráficos Tensão x deformação - ensaio de tração - Amostras MA



Fonte: Próprio Autor, 2023

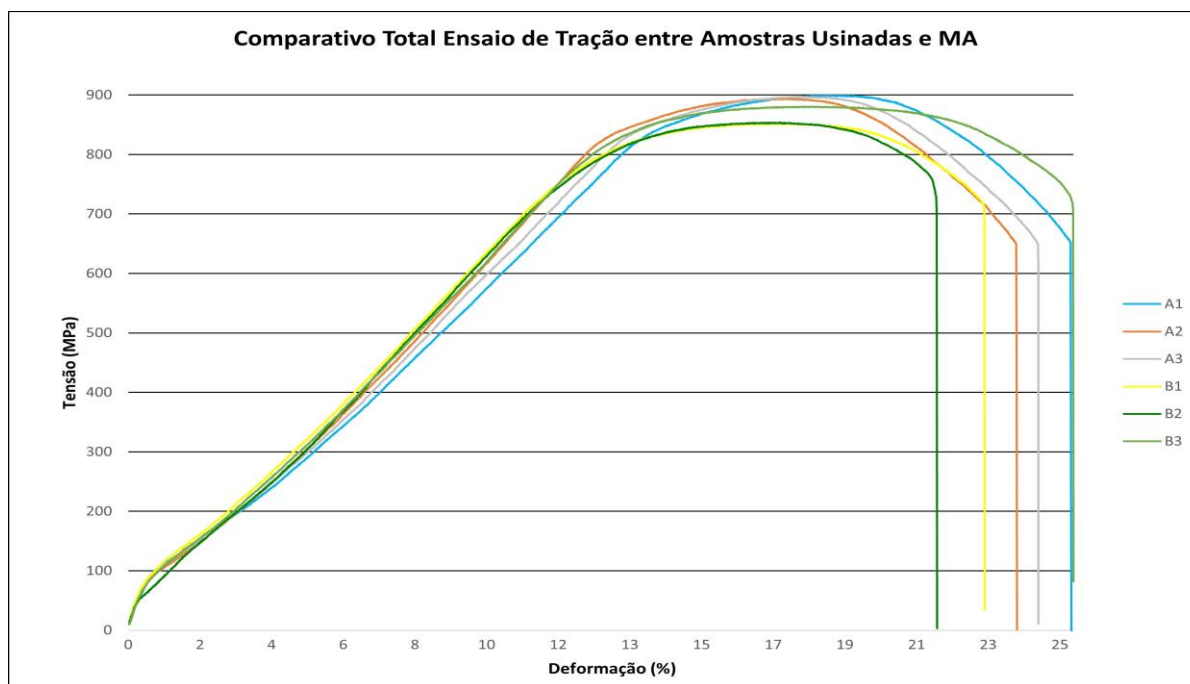
Figura 28 - Gráficos Tensão x deformação - ensaio de tração - Amostras Usinadas



Fonte: Próprio Autor, 2023

Analisando-se os resultados do comparativo do ensaio de tração, percebe-se que as amostras convencionais e produzidas por meio de manufatura aditiva tiveram um comportamento bem parecido conforme verificado na figura 29.

Figura 29 - Comparativo entre MA e US - Tração



considerando os resultados reais de 852,34MPa a 899,74MPa, fica dentro desse range, com uma variação de 47,4MPa.

## 5.2 RESULTADOS ENSAIO DE FLEXÃO A TRÊS PONTOS

A Tabela 10 demonstra a identificação das amostras para realização do ensaio de flexão a três pontos, MA para os ensaios com manufatura aditiva e com US para os ensaios com o material usinado e os resultados da tensão de flexão no escoamento.

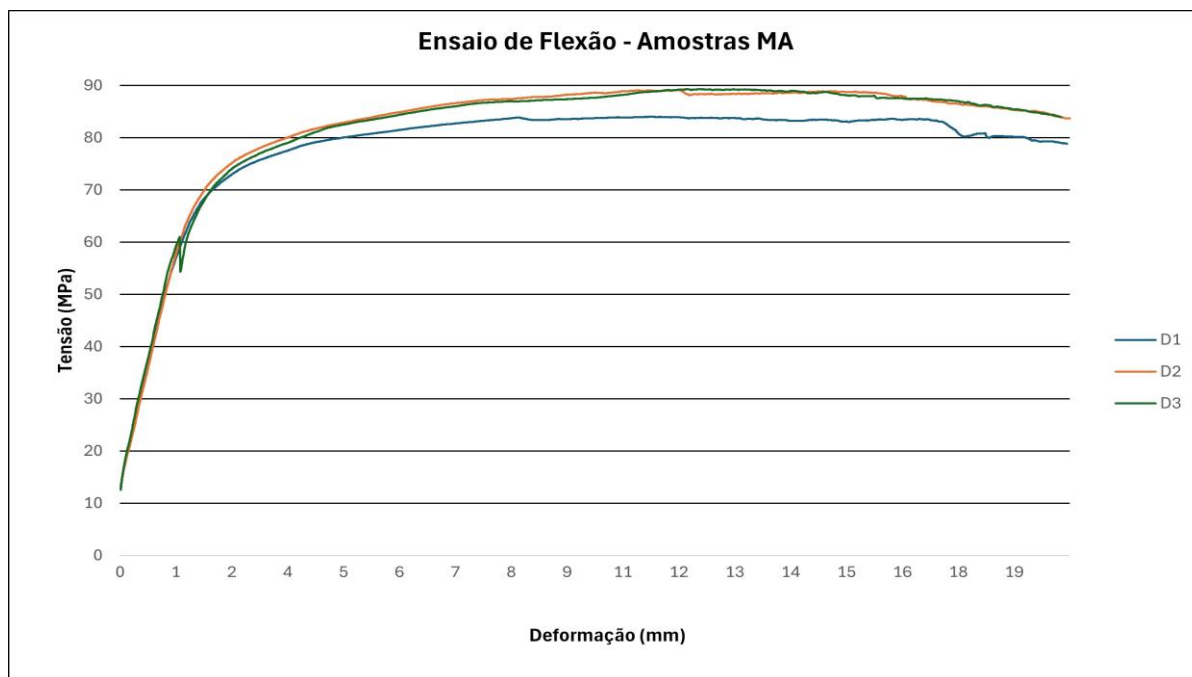
Tabela 10 - Ensaio de flexão a três pontos – Conforme Norma ASTM 5410

AMOSTRAS	Tensão de Flexão no escoamento (MPa)
MA-01	84,8
MA-02	84
MA-03	88,3
US- 01	88
US- 02	84,8
US- 03	88,4

Fonte: Próprio Autor, 2023

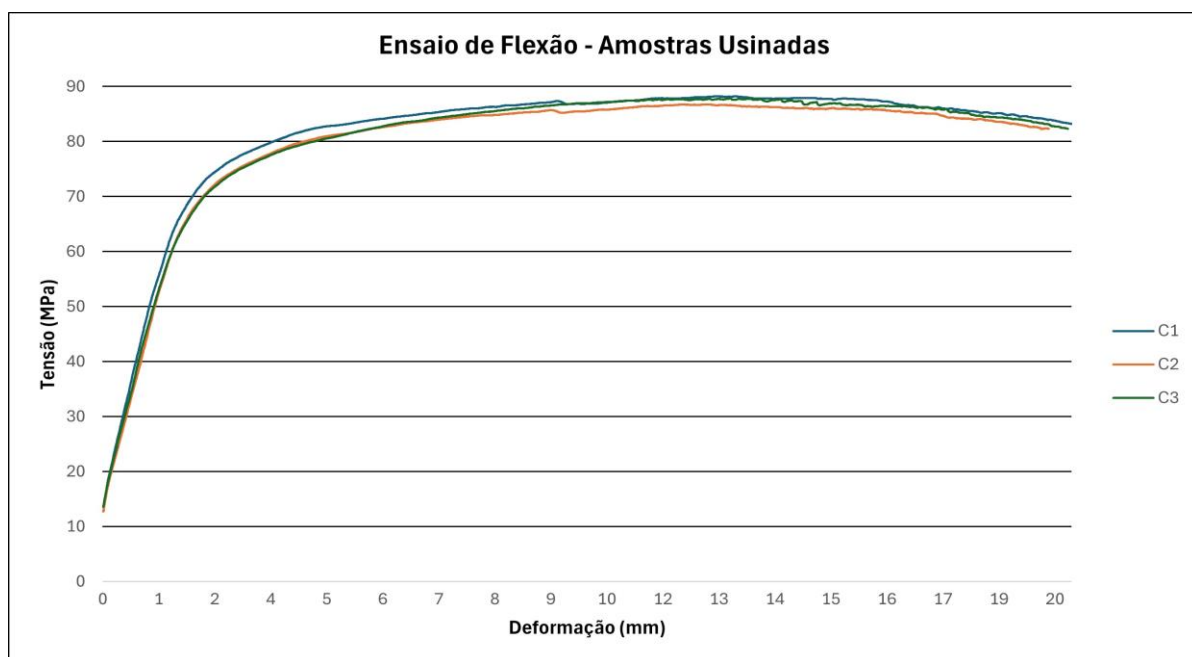
Após as verificações das amostras em laboratório e comparações entre os modelos usinado e impresso, foram gerados gráficos e tabelas com os resultados de flexão a três pontos. A figura 30 demonstra um comparativo dos testes feitos com as amostras MA, a figura 31 mostra os resultados referentes às amostras usinadas, os resultados completos referentes aos testes encontram-se no capítulo “anexos”.

Figura 30 - Gráficos TensãoXdeformação – Ensaio de flexão a três pontos – Amostras MA



Fonte: Próprio Autor, 2023

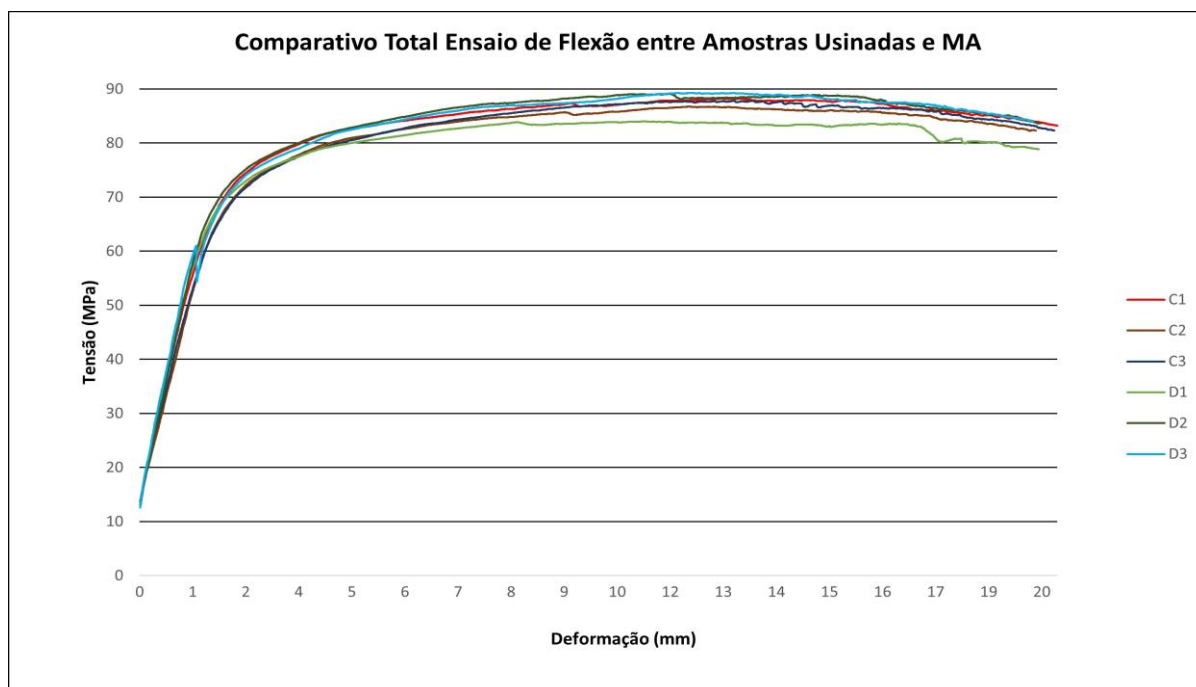
Figura 31 - Gráficos Tensão deformação – Ensaio de flexão a três pontos – Amostras US



Fonte: Próprio Autor, 2023

Analisando o resultado do gráfico comparativo entre as amostras produzidas por MA e US, pode-se observar comportamento muito semelhante ao ensaio de tração, com equiparação muito próxima das tensões de escoamento e tensão máxima, conforme verificado na figura 32.

Figura 32 - Comparativo total entre MA e US



Fonte: Próprio Autor, 2023

Outro fator analisado é que nenhuma amostra sofreu ruptura, o que indica que não existem falhas grosseiras ou discordâncias na microestrutura, porém essa característica poderia ser melhor observada realizando-se uma análise metalográfica nas amostras.

As amostras foram impressas na orientação horizontal, demonstrando que essa orientação não altera a característica de resistência à flexão do material analisado.

### 5.3 RESULTADOS ENSAIO DE RUGOSIDADE

A tabela 11 demonstra a identificação das amostras para realização do ensaio de rugosidade superficial, MA para os ensaios com manufatura aditiva e com US para os ensaios com o material usinado e os resultados das rugosidades Ra e Rz.

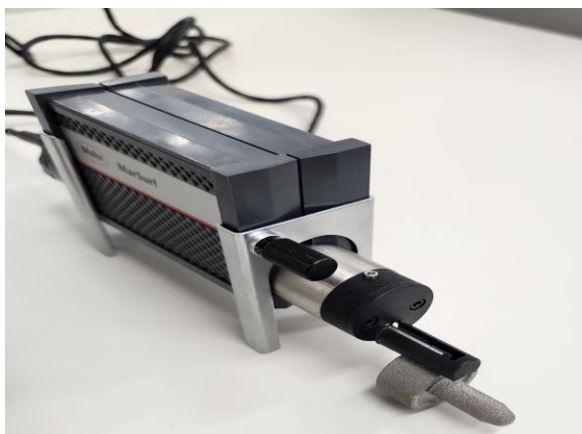
Tabela 11 - Ensaio de rugosidade superficial conforme norma ABNT NBR 6405

AMOSTRAS	Rugosidade (Ra) ( $\mu\text{m}$ )	Rugosidade(Rz) ( $\mu\text{m}$ )
MA-01 - BRUTA	2,1	93
MA-02 - BRUTA	3,9	21
MA-03 - BRUTA	3,9	21
US- 01	0,6	1,1
US- 02	0,5	1,2
US- 03	0,6	1,2
MA-01- US	0,5	1
MA-01- US	0,53	1
MA-01- US	0,6	1

Fonte: Próprio autor

Os gráficos referentes aos ensaios de rugosidade podem ser observados na seção “anexos”. Na figura 33 pode-se observar a medição de rugosidade da prótese bruta, confeccionada através da manufatura aditiva.

Figura 33 – Medição de rugosidade de prótese bruta – MA



Fonte: Próprio autor, 2023

#### 5.4 RESULTADOS ENSAIO DE MEDIÇÃO DE DUREZA SUPERFICIAL

A tabela 12 demonstra a identificação das amostras para realização do ensaio de dureza superficial, MA- BRUTA para os ensaios com manufatura aditiva sem processos posteriores, US para os ensaios com o material usinado e MA-US para as amostras obtidas por manufatura aditiva, porém usinadas posteriormente, e os resultados de dureza Brinell (HB).

Tabela 12 - Ensaio de dureza superficial - ABNT NBR 4287

AMOSTRAS	Dureza Brinell (HB)
MA-01- BRUTA	360
MA-02 - BRUTA	360
MA-03 - BRUTA	360
US- 01	350
US- 02	350
US- 03	350
MA-01- US	350
MA-01- US	350
MA-01- US	350

Fonte: Próprio autor, 2023

Os ensaios de dureza demonstraram uma boa paridade de valores para as amostras analisadas, considerando as literaturas existentes, pode-se verificar que a dureza Brinell para uma liga de Ti6Al4V gira em torno de 330 a 440 HB, e tanto as amostras convencionais quanto as amostras obtidas por MA chegaram com valores próximos a esse, porém deve levar-se em consideração que após qualquer tratamento térmico essas durezas superficiais podem sofrer alterações.

## 6 CONCLUSÃO

Após avaliação dos resultados e comparação com estudos anteriores, pode-se concluir que as próteses fabricadas com liga de Ti6Al4V por meio de manufatura aditiva tem características mecânicas semelhantes a próteses fabricadas com material produzido por usinagem.

A primeira avaliação que foi pensada para o trabalho foi comparar o processo de manufatura aditiva com o processo de usinagem na fabricação de próteses para articulação, porém no decorrer do trabalho, avaliou-se que o processo de manufatura aditiva ainda não é capaz de entregar um produto finalizado, sem necessidade de processos posteriores para acabamento, o que prejudicou a viabilidade do estudo.

Com a mudança de foco, buscou avaliar-se a manufatura aditiva como um processo primário de fabricação para fornecimento da matéria prima, e realizar um comparativo das características mecânicas entre a matéria prima convencional fabricada pelo processo de trefilação e a entregue por manufatura aditiva, com as mesmas características químicas.

Com relação as vantagens e desvantagens de cada processo pode verificar-se que como ambas apresentam características mecânicas semelhantes, o que influencia no momento da escolha ainda são os recursos financeiros, pois avaliando-se que a matéria prima convencional é entregue bruta e exige-se alta remoção de material, a manufatura aditiva entrega um produto mais próximo da geometria final, diminuindo a necessidade de elevada remoção.

Como vantagens do processo de manufatura aditiva em relação a usinagem convencional pode destacar-se: diminuição do material removido; locais em que não se faz necessário elevado nível de precisão, podem ser retirados prontos. As desvantagens são: tempo de processo de manufatura aditiva elevado; custo do processo elevado; qualidade ruim do acabamento.

Para trabalhos futuros, pode avaliar-se a resistência ao desgaste, efeitos posteriores de tratamento térmico, processos de normalização, solubilização e revenimento entre os dois processos, e quem sabe num futuro próximo reavaliar sobre a qualidade do acabamento do processo de manufatura aditiva, eliminando a necessidade de alguns processos posteriores.

## REFERÊNCIAS

ABNT 4287. Associação Brasileira de Normas Técnicas; Conceitos de rugosidade superficial; NBR ISO 4287, 2002

ARCAM, GE. – Additive Manufacturing Journal. SPECTRA Ti6Al4V. Disponível em: [https://www.ge.com/additive/sites/default/files/2020\\_07/SPECTRAH\\_Ti6Al4V\\_CMD/](https://www.ge.com/additive/sites/default/files/2020_07/SPECTRAH_Ti6Al4V_CMD/) Acessado em 08/10/2023

ASTM A370-23, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, ASTM International, 2007

ASTM E8/E8M-22, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, 2007

BARBIERI, J. F. **Efeitos anisotrópicos na plasticidade e fratura na liga Ti-6Al-4V produzida por manufatura aditiva.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2022.

BORGES, C. A. et al. **Impressão 3D para órteses, próteses e materiais especiais: cenário da produção e uso potencial de conhecimento no Brasil.** Tese de Doutorado. 2021.

CALLISTER, William D. Jr. **Materials Science and Engineering. An Introduction.** John Wiley & Sons, Inc. 1994.

CALLISTER JR, William D, RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais - uma introdução.** 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CAO, Z. et al., **Microstructure and Mechanical Properties of Electron Beam Melted.** Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe Alloy, Adv.Eng.Mater, 2022. 2101766. <https://doi.org/10.1002/adem.202101766>.

DORNAS, V. S. et al. **Prospecção Tecnológica de Processo de Fabricação de Próteses Articuladas a partir da Combinação de Materiais Rígidos e Flexíveis em uma Única Peça.** Cadernos de Prospecção, v. 14, n. 2, p. 517-517, 2021.

FERRARESI, D. **Usinagem dos metais: Fundamentos da usinagem dos metais.** [S.l.]: Editôra Edgard Blücher, 1970

FERRARESI, D.; RUFFINO, R. T; PALLEROSI, C. A. **Usinagem dos metais: processo de fresamento.** 3 ed. São Paulo: ABM, 1977

FIGUEIREDO, B. B; CESAR, F. I. G. **Um estudo da utilização da impressora 3D na engenharia e na medicina.** Recisatec - revista científica saúde e tecnologia - ISSN 2763-8405, v. 2, n. 1, p. e2170-e2170, 2022.

GM REIS; **Prótese parcial de cabeça de radio.** Disponível em: <https://www.gmreis.com.br/> Acessado em 27/10/2023

GM REIS; **Próteses parcial de cabeça de radio instrução de uso** [https://gmreis.com.br/wp-content/uploads/2020/07/IU\\_10247700061.RADIUSpdf.pdf/](https://gmreis.com.br/wp-content/uploads/2020/07/IU_10247700061.RADIUSpdf.pdf/) Acessado em 10/12/2022

GOMES, J.F.B.; WILTGEN, F. **Avanços na manufatura aditiva em metais: técnicas, materiais e máquinas.** Revista Tecnologia, v. 41, n. 1, 2020.

HIBBELER, R.C., **Resistência dos materiais**, 7ª ed., Pearson, São Paulo, 2010

JONES, P. AND BROWN, Q. **Application of Electron Beam Melting in Aerospace Manufacturing.** Journal of Aerospace Technology and Management, 2019.

MACHADO, Á. R; ABRÃO, A. A.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B.; RUFFINO, R. T. **Teoria da usinagem dos materiais.** São Paulo: Edgard Blücher. 2009.

MACIEL D. de C. et al. **DESENVOLVIMENTO DE PRÓTESE PARA AUSÊNCIA DE FALANGE MEDIANA.** Revista Prociências, v. 6, n. 2, p. 70-96, 2023.

MIRONE, G. et al; **Effect of Process Parameters on the Mechanical Properties of a Titanium Alloy Fabricated by Electron Beam Melting (EBM).** IOP Conference Series. Materials Science and Engineering 1214.1,2022.

MOHAMMADHOSSEINI, A.; MASOOD, S.; FRASER, D.; JAHEDI, M. **Dynamic compressive behaviour of Ti-6Al-4V alloy processed by electron beam melting under high strain rate loading.** *Adv. Manuf.* 2015, 3, 232–243, doi:10.1007/s40436-015-0119-0.

NUNES, H. J. M. **Ti-6Al-4V Produzido por Manufatura Aditiva-Efeito do Tratamento Térmico**, 2021.

PAIVA, M. S. E.; **Estudo da metalurgia física do titânio e suas ligas para uso em biomateriais.** Escola de Engenharia Mackenzie, 2022.

RENISHAW. Disponível em <https://www.renishaw.com.br/> acessado em 12/12/2023

REZENDE, R.F. *et al.* **Artroplastia total na lesão complexa do cotovelo**, *Revista brasileira de ortopedia*, 58(5), pp. e813–e817,2023.

ROCKWOOD CA, Green DP, Bucholz RW. **Fractures in adults** 1991; 2:794-812

ROSA, R.G. **Processo de fabricação de próteses mecânicas através de manufatura aditiva**. Revista Científica FHO/UNIARARAS, v. 6, n. 1, 2018.

SELLA, G.do V. *et al.* **Comparative Clinical Evaluation of Two Techniques of Arthroscopic Treatment of Partial Articular Rotator Cuff Tears**, *Revista brasileira de ortopedia*, 56(6), pp. 726–732,2021.

SILVA, G.V.F.da *et al.* **Avaliação da influência das condições de usinagem sobre o estado de superfície obtido no fresamento de ligas de titânio**, *Matéria*, 27(2), pp. Matéria, 2022, Vol.27 (2),2022.

SILVA, R. ; SOUZA, L. **Recent Developments in Electron Beam Melting Technology: A Review**. Additive Manufacturing, 2021.

SMITH, A. *et al.* **Advancements in Electron Beam Melting for Metal Additive Manufacturing**. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2020.

TSHEPHE, T. S. *et al.* **Additive manufacturing of titanium-based alloys - A review of methods, properties, challenges, and prospects**. Heliyon, p. e09041, 2022.

WU C., M. ZHAN, **Microstructural evolution, mechanical properties and fracture toughness of near  $\beta$  titanium alloy during different solution plus aging heat treatments**.

*AlloysCompd*.805(2021)11441160.<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.07.134>.

TITANIUM INFORMATION GROUP, **Titanium Alloys - Ti6Al4V Grade 5**. Disponível em: <<https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1547>>. Acesso em: 12 dezembro de 2023.

BAUER, J.R.O. **Propriedades mecânicas do titânio comercialmente puro e d a liga Ti-Al-4V fundidos em diferentes ambientes** [Tese de Doutorado]. São Paulo: faculdade de Odontologia da USP; 2007.

## ANEXOS



Máquina Universal de Ensaios



Nome Empresarial: BIOPDI - Indústria, Comércio, Importação e Exportação de equipamentos Médicos e Odontológicos LTDA

Nome Fantasia: BIOPDI

CNPJ: 13.027.001/0001-71

IE: 637.154.638.116

email: notafiscal@biopdi.com.br

**Ensaio:** Laminado 1

**Norma:**

**Identificação:** A1

**Célula de Carga:** 50kN

**Vel. Deslocamento:** 5mm/min

**Temperatura:**

**Data:**

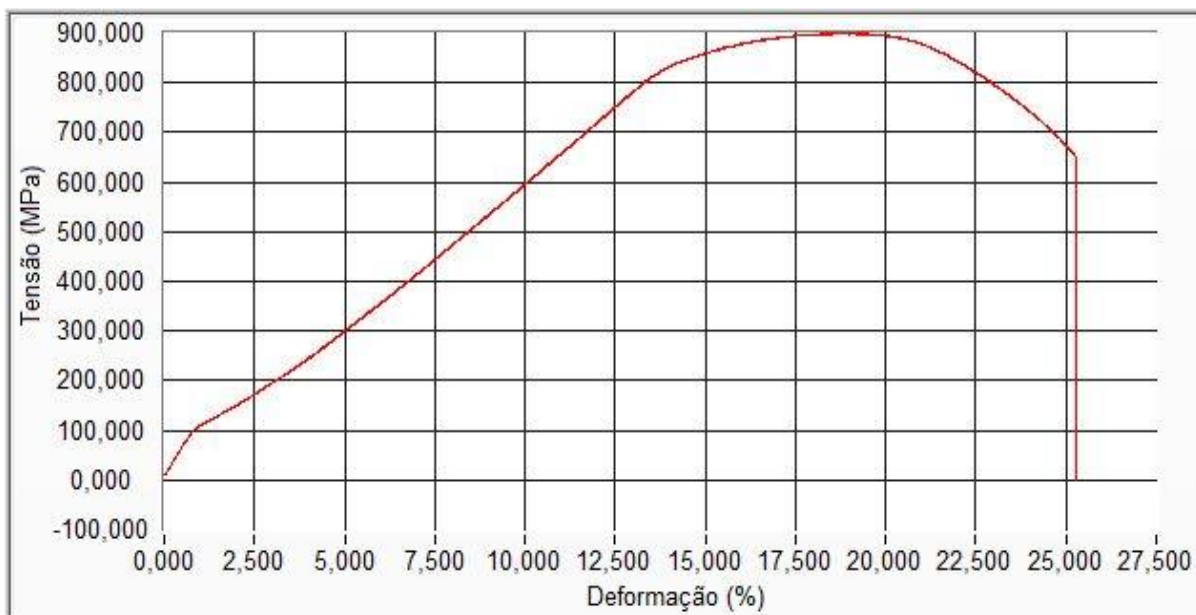
**Hora:**

**Ensaio Realizado:** Tração

**Pré Carga:** 300N

**Umidade Relativa:**

**Máquina Utilizada:**



AMOSTRAS Nº	FORÇA MÁXIMA N	POSIÇÃO MÁXIMA mm	TENSÃO MÁXIMA MPa	TENSÃO ESCOAMENTO MPa	ALONGAMENTO %	Red.ÁREA %	M. YOUNG MPa
Ensaio 1	25017,5255	7,5823	899,7473	831,6672	14,8667	45,3157	5992,4914
Ensaio 2							
Ensaio 3							
Ensaio 4							
Ensaio 5							
Ensaio 6							
Ensaio 7							
Ensaio 8							
Ensaio 9							
Ensaio 10							
Valor Mínimo	25017,5255	7,5823	899,7473	831,6672	14,8667	45,3157	5992,4914
Valor Máximo	25017,5255	7,5823	899,7473	831,6672	14,8667	45,3157	5992,4914
Valor Médio	25017,5255	7,5823	899,7473	831,6672	14,8667	45,3157	NaN
Desvio Padrão	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN



Máquina Universal de Ensaios


**Biopdi**  
 SOLUÇÕES EM ENSAIO DE MATERIAS

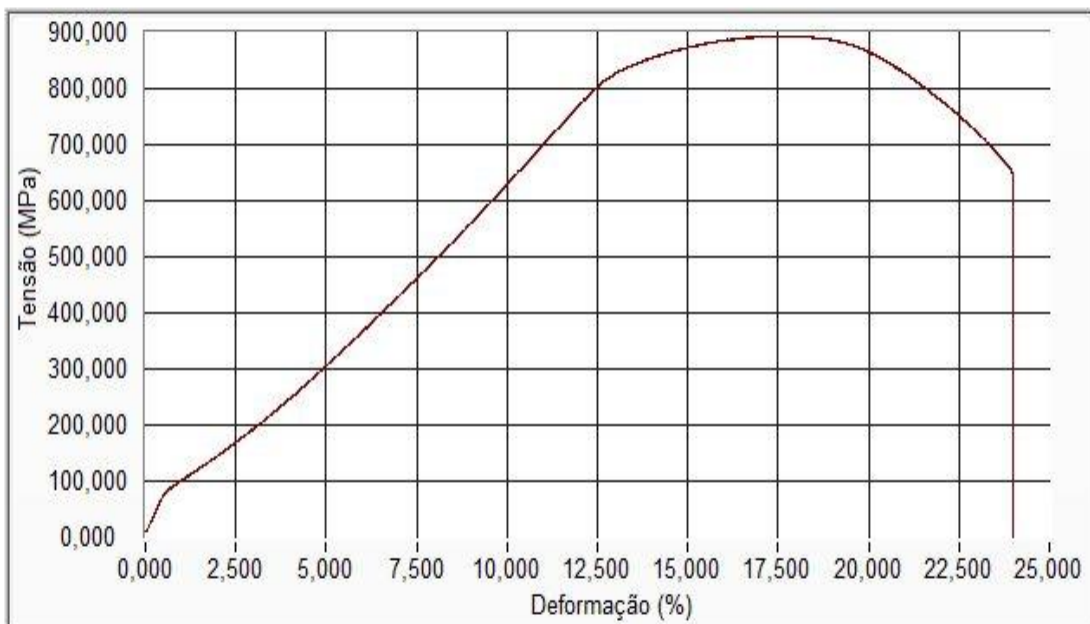
Nome Empresarial: BIOPDI - Indústria, Comércio, Importação e Exportação de equipamentos Médicos e Odontológicos LTDA

Nome Fantasia: BIOPDI

CNPJ: 13.027.001/0001-71

IE: 637.154.638.116

email: notafiscal@biopdi.com.br

**Ensaio:** Laminado 2**Norma:****Identificação:** A2**Célula de Carga:** 50kN**Vel. Deslocamento:** 5mm/min**Temperatura:****Data:****Hora:****Ensaio Realizado:** Tração**Pré Carga:** 300N**Umidade Relativa:****Máquina Utilizada:**

AMOSTRAS Nº	FORÇA MÁXIMA N	POSIÇÃO MÁXIMA mm	TENSÃO MÁXIMA MPa	TENSÃO ESCOAMENTO MPa	ALONGAMENTO %	Red.ÁREA %	M. YOUNG MPa
Ensaio 1							
Ensaio 2	24855,1466	7,2015	893,9074	854,8258	13,2000	45,8120	6161,5930
Ensaio 3							
Ensaio 4							
Ensaio 5							
Ensaio 6							
Ensaio 7							
Ensaio 8							
Ensaio 9							
Ensaio 10							
Valor Mínimo	24855,1466	7,2015	893,9074	854,8258	13,2000	45,8120	6161,5930
Valor Máximo	24855,1466	7,2015	893,9074	854,8258	13,2000	45,8120	6161,5930
Valor Médio	24855,1466	7,2015	893,9074	854,8258	13,2000	45,8120	NaN
Desvio Padrão	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN



Máquina Universal de Ensaios



Nome Empresarial: BIOPDI - Indústria, Comércio, Importação e Exportação de equipamentos Médicos e Odontológicos LTDA

Nome Fantasia: BIOPDI

CNPJ: 13.027.001/0001-71

IE: 637.154.638.116

email: notafiscal@biopdi.com.br

**Ensaio:** Laminado 3

**Norma:**

**Identificação:** A3

**Célula de Carga:** 50kN

**Vel. Deslocamento:** 5mm/min

**Temperatura:**

**Data:**

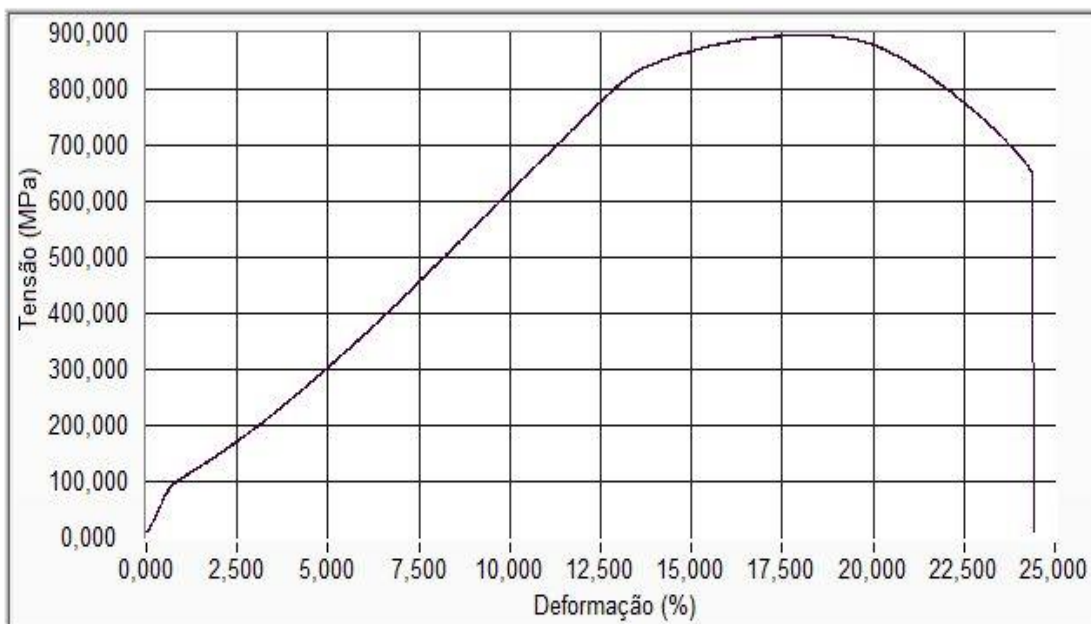
**Hora:**

**Ensaio Realizado:** Tração

**Pré Carga:** 300N

**Umidade Relativa:**

**Máquina Utilizada:**



AMOSTRAS Nº	FORÇA MÁXIMA N	POSIÇÃO MÁXIMA mm	TENSÃO MÁXIMA MPa	TENSÃO ESCOAMENTO MPa	ALONGAMENTO %	Red.ÁREA %	M. YOUNG MPa
Ensaio 1							
Ensaio 2							
Ensaio 3	24957,6036	7,3212	897,5922	846,7192	11,7333	46,7975	6044,9427
Ensaio 4							
Ensaio 5							
Ensaio 6							
Ensaio 7							
Ensaio 8							
Ensaio 9							
Ensaio 10							
Valor Mínimo	24957,6036	7,3213	897,5922	846,7192	11,7333	46,7975	6044,9427
Valor Máximo	24957,6036	7,3213	897,5922	846,7192	11,7333	46,7975	6044,9427
Valor Médio	24957,6036	7,3213	897,5922	846,7192	11,7333	46,7975	NaN
Desvio Padrão	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN



Máquina Universal de Ensaios



Nome Empresarial: BIOPDI - Indústria, Comércio, Importação e Exportação de equipamentos Médicos e Odontológicos LTDA

Nome Fantasia: BIOPDI

CNPJ: 13.027.001/0001-71

IE: 637.154.638.116

email: notafiscal@biopdi.com.br

Ensaio: Laminado 1-2-3

Norma:

Identificação: A1-2-3

Célula de Carga 50kN

Vel. Deslocamento: 5mm/min

Temperatura:

Data:

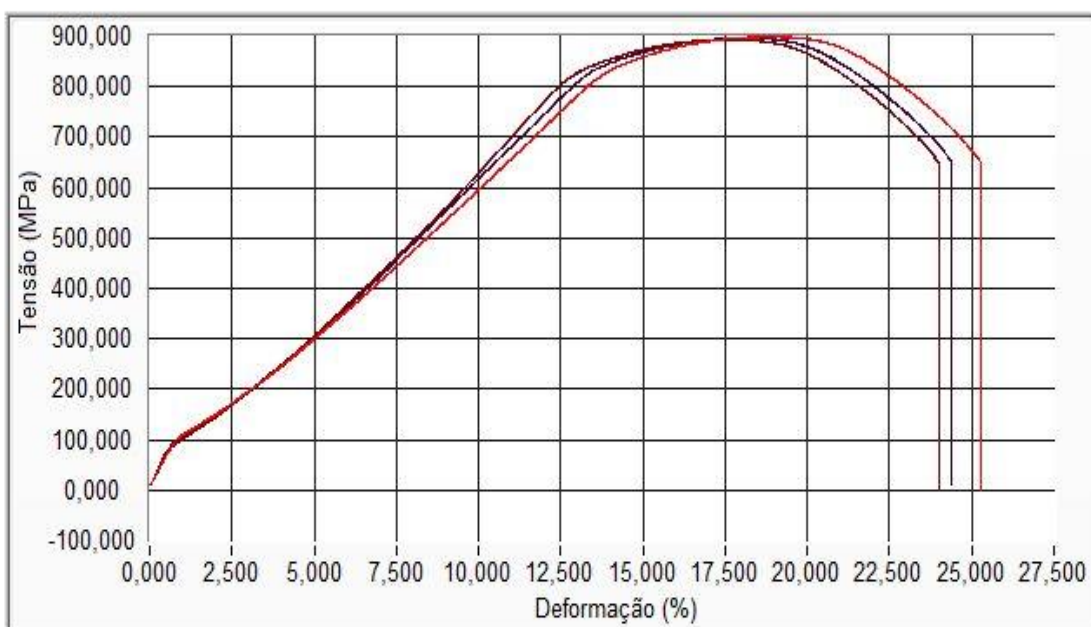
Hora:

Ensaio Realizado: Tração

Pré Carga: 300N

Umidade Relativa:

Máquina Utilizada:



AMOSTRAS Nº	FORÇA MÁXIMA N	POSIÇÃO MÁXIMA mm	TENSÃO MÁXIMA MPa	TENSÃO ESCOAMENTO MPa	ALONGAMENTO %	Red.ÁREA %	M. YOUNG MPa
Ensaio 1	25017,5255	7,5823	899,7473	831,6672	14,8667	45,3157	5992,4914
Ensaio 2	24855,1466	7,2015	893,9074	854,8258	13,2000	45,8120	6161,5930
Ensaio 3	24957,6036	7,3212	897,5922	846,7192	11,7333	46,7975	6044,9427
Ensaio 4							
Ensaio 5							
Ensaio 6							
Ensaio 7							
Ensaio 8							
Ensaio 9							
Ensaio 10							
Valor Mínimo	24855,1466	7,2015	893,9074	831,6672	11,7333	45,3157	5992,4914
Valor Máximo	25017,5255	7,5823	899,7473	854,8258	14,8667	46,7975	6161,5930
Valor Médio	24943,4252	7,3683	897,0823	844,4040	13,2667	45,9751	NaN
Desvio Padrão	82,1127	0,1947	2,9532	11,7516	1,5677	0,7542	NaN



Máquina Universal de Ensaios



Nome Empresarial: BIOPDI - Indústria, Comércio, Importação e Exportação de equipamentos Médicos e Odontológicos LTDA

Nome Fantasia: BIOPDI

CNPJ: 13.027.001/0001-71

IE: 637.154.638.116

email: notafiscal@biopdi.com.br

Ensaio: IMPRESSO 3D

Data:

Norma:

Hora:

Identificação: B1

Ensaio Realizado: Tração

Célula de Carga 50kN

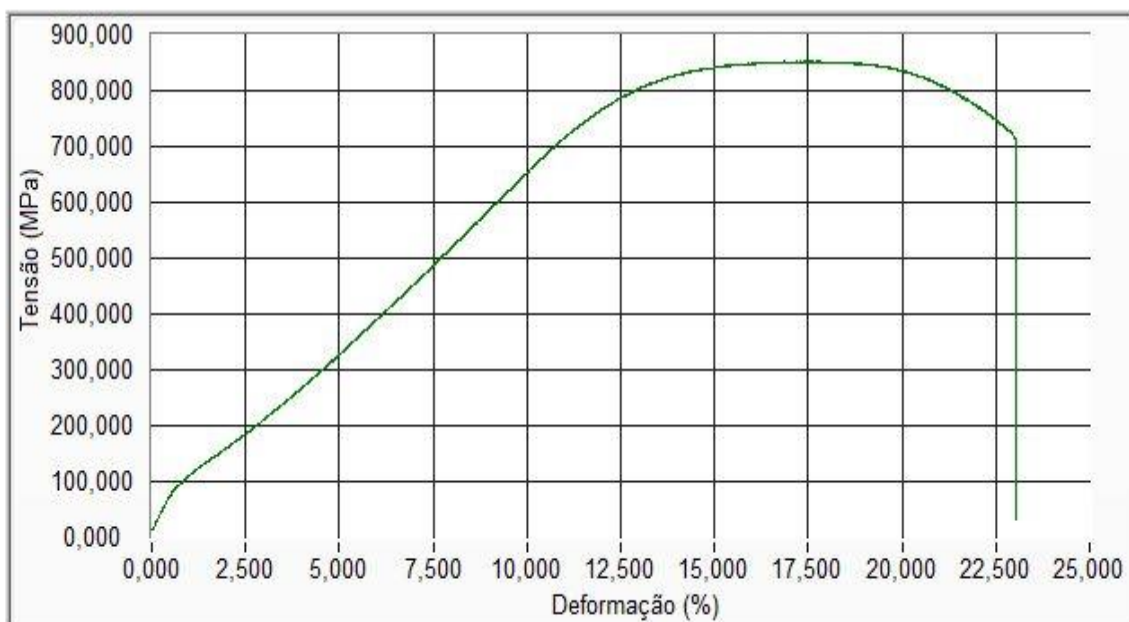
Pré Carga: 300N

Vel. Deslocamento: 5mm/min

Umidade Relativa:

Temperatura:

Máquina Utilizada:



AMOSTRAS Nº	FORÇA MÁXIMA N	POSIÇÃO MÁXIMA mm	TENSÃO MÁXIMA MPa	TENSÃO ESCOAMENTO MPa	ALONGAMENTO %	Red.ÁREA %	M. YOUNG MPa
Ensaio 1							
Ensaio 2							
Ensaio 3							
Ensaio 4	22442,1280	6,9133	852,3482	767,7065	12,2000	24,8303	6436,3069
Ensaio 5							
Ensaio 6							
Ensaio 7							
Ensaio 8							
Ensaio 9							
Ensaio 10							
Valor Mínimo	22442,1280	6,9133	852,3482	767,7065	12,2000	24,8303	6436,3069
Valor Máximo	22442,1280	6,9133	852,3482	767,7065	12,2000	24,8303	6436,3069
Valor Médio	22442,1280	6,9133	852,3482	767,7065	12,2000	24,8303	NaN
Desvio Padrão	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN



Máquina Universal de Ensaios



Nome Empresarial: BIOPDI - Indústria, Comércio, Importação e Exportação de equipamentos Médicos e Odontológicos LTDA

Nome Fantasia: BIOPDI

CNPJ: 13.027.001/0001-71

IE: 637.154.638.116

email: notafiscal@biopdi.com.br

**Ensaio:** IMPRESSO 3D

**Norma:**

**Identificação:** B2

**Célula de Carga:** 50kN

**Vel. Deslocamento:** 5mm/min

**Temperatura:**

**Data:**

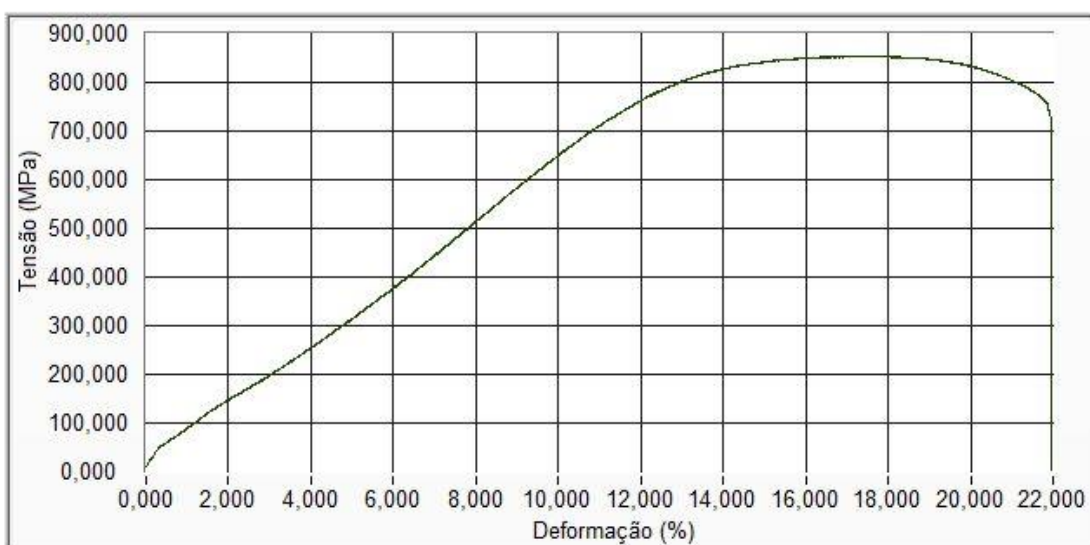
**Hora:**

**Ensaio Realizado:** Tração

**Pré Carga:** 300N

**Umidade Relativa:**

**Máquina Utilizada:**



AMOSTRAS Nº	FORÇA MÁXIMA N	POSIÇÃO MÁXIMA mm	TENSÃO MÁXIMA MPa	TENSÃO ESCOAMENTO MPa	ALONGAMENTO %	Red.ÁREA %	M. YOUNG MPa
Ensaio 1							
Ensaio 2							
Ensaio 3							
Ensaio 4							
Ensaio 5	23745,5058	6,5883	853,9995	744,2584	11,3333	21,2553	6642,8713
Ensaio 6							
Ensaio 7							
Ensaio 8							
Ensaio 9							
Ensaio 10							
Valor Mínimo	23745,5058	6,5883	853,9995	744,2584	11,3333	21,2553	6642,8713
Valor Máximo	23745,5058	6,5883	853,9995	744,2584	11,3333	21,2553	6642,8713
Valor Médio	23745,5058	6,5883	853,9995	744,2584	11,3333	21,2553	NaN
Desvio Padrão	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN



Máquina Universal de Ensaios



Nome Empresarial: BIOPDI - Indústria, Comércio, Importação e Exportação de equipamentos Médicos e Odontológicos LTDA

Nome Fantasia: BIOPDI

CNPJ: 13.027.001/0001-71

IE: 637.154.638.116

email: notafiscal@biopdi.com.br

**Ensaio:** IMPRESSO 3D

**Norma:**

**Identificação:** B3

**Célula de Carga:** 50kN

**Vel. Deslocamento:** 5mm/min

**Temperatura:**

**Data:**

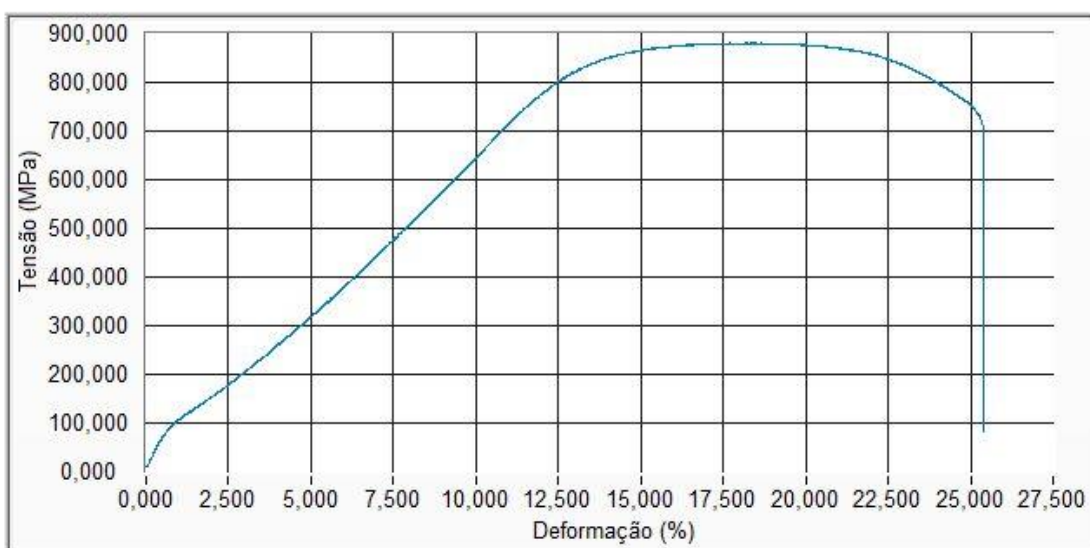
**Hora:**

**Ensaio Realizado:** Tração

**Pré Carga:** 300N

**Umidade Relativa:**

**Máquina Utilizada:**



AMOSTRAS Nº	FORÇA MÁXIMA N	POSIÇÃO MÁXIMA mm	TENSÃO MÁXIMA MPa	TENSÃO ESCOAMENTO MPa	ALONGAMENTO %	Red.ÁREA %	M. YOUNG MPa
Ensaio 1							
Ensaio 2							
Ensaio 3							
Ensaio 4							
Ensaio 5							
Ensaio 6	24651,1639	7,6127	880,6410	801,3369	16,5000	38,8117	6551,144228
Ensaio 7							
Ensaio 8							
Ensaio 9							
Ensaio 10							
Valor Mínimo	24651,1639	7,6127	880,6410	801,3369	16,5000	38,8117	6551,1442
Valor Máximo	24651,1639	7,6127	880,6410	801,3369	16,5000	38,8117	6551,1442
Valor Médio	24651,1639	7,6127	880,6410	801,3369	16,5000	38,8117	NaN
Desvio Padrão	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN



Máquina Universal de Ensaios



Nome Empresarial: BIOPDI - Indústria, Comércio, Importação e Exportação de equipamentos Médicos e Odontológicos LTDA

Nome Fantasia: BIOPDI

CNPJ: 13.027.001/0001-71

IE: 637.154.638.116

email: notafiscal@biopdi.com.br

**Ensaio:** IMPRESSO 3D

**Norma:**

**Identificação:** B1-2-3

**Célula de Carça:** 50kN

**Vel. Deslocamento:** 5mm/min

**Temperatura:**

**Data:**

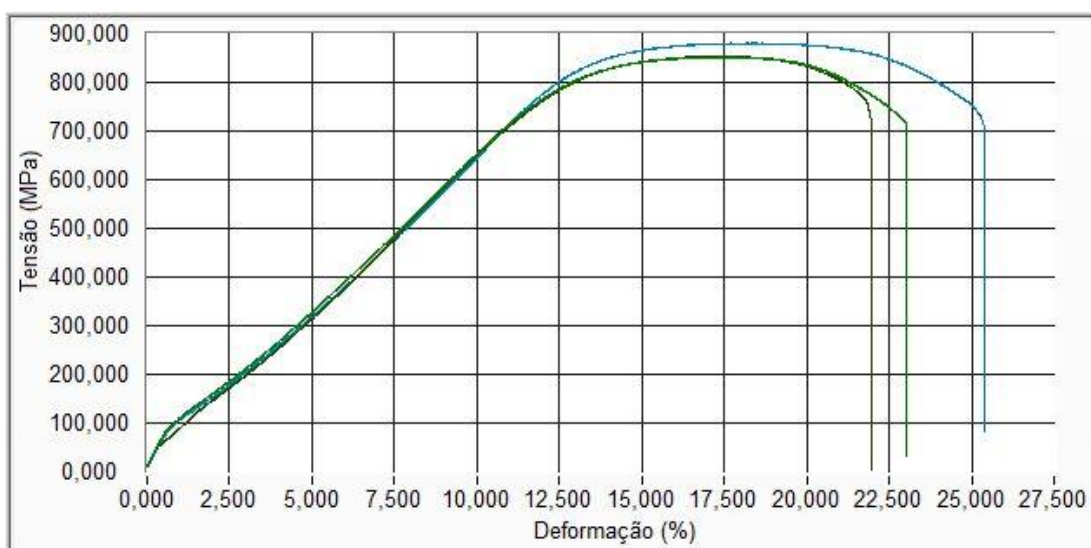
**Hora:**

**Ensaio Realizado:** Tração

**Pré Carça:** 300N

**Umidade Relativa:**

**Máquina Utilizada:**



AMOSTRAS Nº	FORÇA MÁXIMA N	POSIÇÃO MÁXIMA mm	TENSÃO MÁXIMA MPa	TENSÃO ESCOAMENTO MPa	ALONGAMENTO %	Red.ÁREA %	M. YOUNG MPa
Ensaio 1							
Ensaio 2							
Ensaio 3							
Ensaio 4	22442,1280	6,9133	852,3482	767,7065	12,2000	28,8187	6436,3069
Ensaio 5	23745,5058	6,5883	853,9995	744,2584	11,3333	21,7821	6642,8713
Ensaio 6	24651,1639	7,6127	880,6410	801,3369	16,5000	38,8117	6551,144228
Ensaio 7							
Ensaio 8							
Ensaio 9							
Ensaio 10							
Valor Mínimo	22442,1280	6,5883	852,3482	744,2584	11,3333	21,7821	6436,3069
Valor Máximo	24651,1639	7,6127	880,6410	801,3369	16,5000	38,8117	6642,8713
Valor Médio	23612,9326	7,0381	862,3295	771,1006	13,3444	29,8042	NaN
Desvio Padrão	1110,4691	0,5235	15,8796	28,6902	2,7669	8,5575	NaN



Máquina Universal de Ensaios



Nome Empresarial: BIOPDI - Indústria, Comércio, Importação e Exportação de equipamentos Médicos e Odontológicos LTDA  
 Nome Fantasia: BIOPDI  
 CNPJ: 13.027.001/0001-71  
 IE: 637.154.638.116  
 email: notafiscal@biopdi.com.br

Ensaio: LAMIN. E 3D

Data:

Norma:

Hora:

Identificação: [a1-2-3][B1-2-3]

Ensaio Realizado: Tração

Célula de Carga 50kN

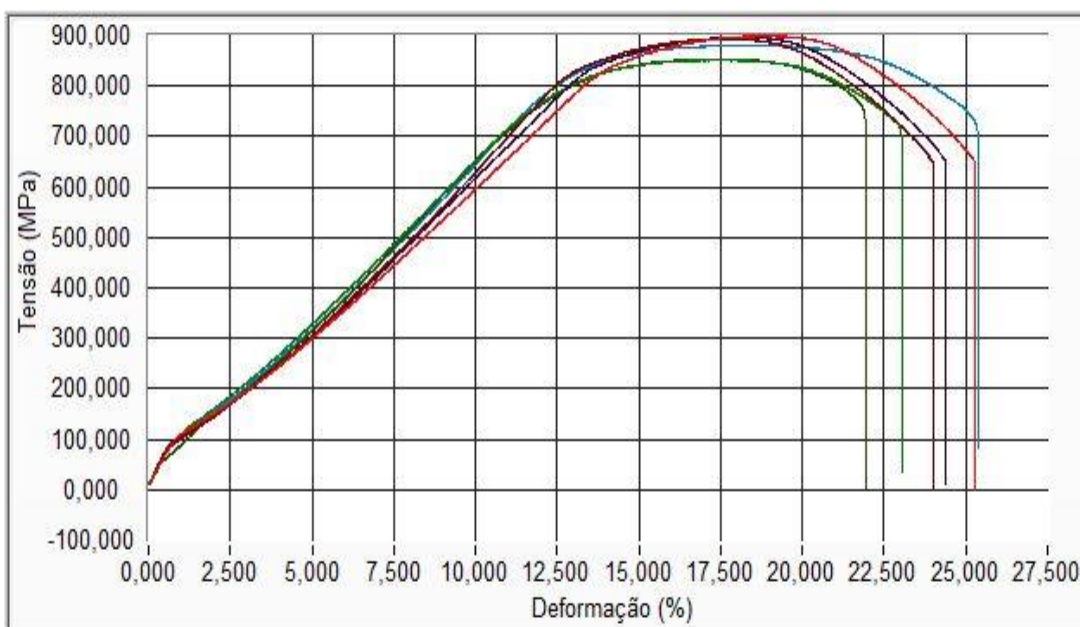
Pré Carça: 300N

Vel. Deslocamento: 5mm/min

Umidade Relativa:

Temperatura:

Máquina Utilizada:



AMOSTRAS Nº	FORÇA MÁXIMA N	POSIÇÃO MÁXIMA mm	TENSÃO MÁXIMA MPa	TENSÃO ESCOAMENTO MPa	ALONGAMENTO %	Red.ÁREA %	M. YOUNG MPa
Ensaio 1	25017,5255	7,5823	899,7473	831,6672	14,8667	45,3157	5992,4914
Ensaio 2	24855,1466	7,2015	893,9074	854,8258	13,2000	45,8120	6161,5930
Ensaio 3	24957,6036	7,3212	897,5922	846,7192	11,7333	46,7975	6044,9427
Ensaio 4	22442,1280	6,9133	852,3482	767,7065	12,2000	28,8187	6436,3069
Ensaio 5	23745,5058	6,5883	853,9995	744,2584	11,3333	21,7821	6642,8713
Ensaio 6	24651,1639	7,6127	880,6410	801,3369	16,5000	38,8117	6551,144228
Ensaio 7							
Ensaio 8							
Ensaio 9							
Ensaio 10							
Valor Mínimo	22442,1280	6,5883	852,3482	744,2584	11,3333	21,7821	5992,4914
Valor Máximo	25017,5255	7,6127	899,7473	854,8258	16,5000	46,7975	6642,8713
Valor Médio	24278,1789	7,2032	879,7059	807,7523	13,3056	37,8896	NaN
Desvio Padrão	1013,4184	0,3968	21,6028	44,6823	2,0118	10,3908	NaN



Máquina Universal de Ensaios



Nome Empresarial: BIOPDI - Indústria, Comércio, Importação e Exportação de equipamentos Médicos e Odontológicos LTDA

Nome Fantasia: BIOPDI

CNPJ: 13.027.001/0001-71

IE: 637.154.638.116

email: notafiscal@biopdi.com.br

Ensaio: C1

Norma:

Identificação:

Célula de Carga 10kN

Vel. Deslocamento: 10mm/min

Temperatura:

Data:

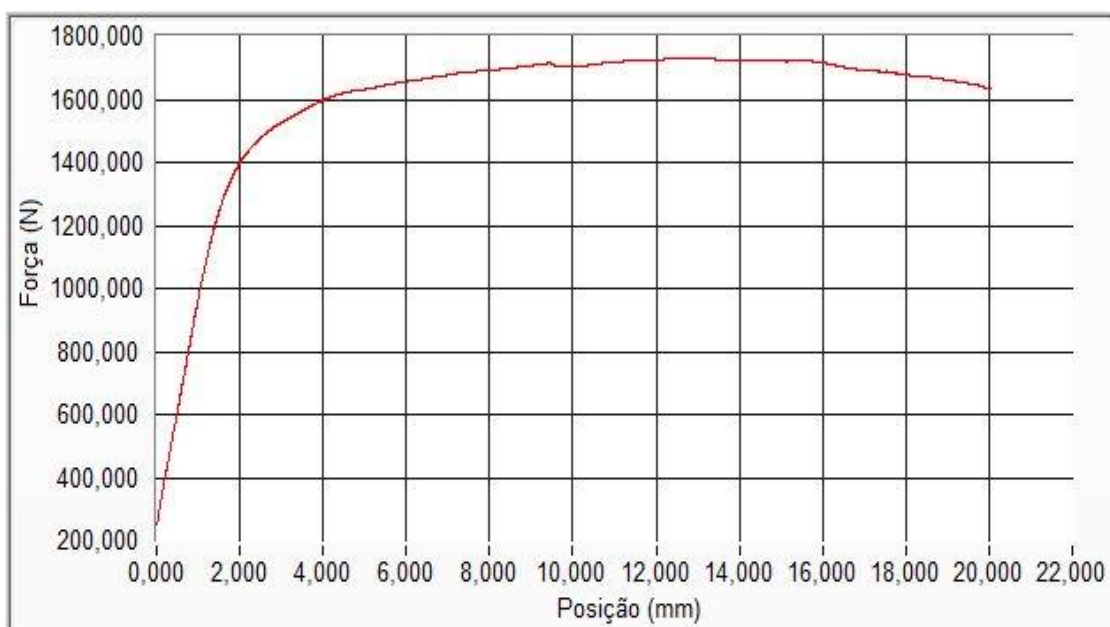
Hora:

Ensaio Realizado: Flexão

Pré Carga: 250N

Umidade Relativa:

Máquina Utilizada:



AMOSTRAS Nº	FORÇA MÁXIMA N	POSIÇÃO MÁXIMA mm	TENSÃO MÁXIMA MPa	TENSÃO ESCOAMENTO MPa	ALONGAMENTO %	Red.ÁREA %	M. YOUNG MPa
Ensaio 1	1732,1756	20,0342	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Ensaio 2							
Ensaio 3							
Ensaio 4							
Ensaio 5							
Ensaio 6							
Ensaio 7							
Ensaio 8							
Ensaio 9							
Ensaio 10							
Valor Mínimo	1732,1756	20,0342	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Valor Máximo	1732,1756	20,0342	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Valor Médio	1732,1756	20,0342	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Desvio Padrão	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN



Máquina Universal de Ensaios



Nome Empresarial: BIOPDI - Indústria, Comércio, Importação e Exportação de equipamentos Médicos e Odontológicos LTDA

Nome Fantasia: BIOPDI

CNPJ: 13.027.001/0001-71

IE: 637.154.638.116

email: notafiscal@biopdi.com.br

Ensaio: C2

Norma:

Identificação:

Célula de Carga 10kN

Vel. Deslocamento: 10mm/min

Temperatura:

Data:

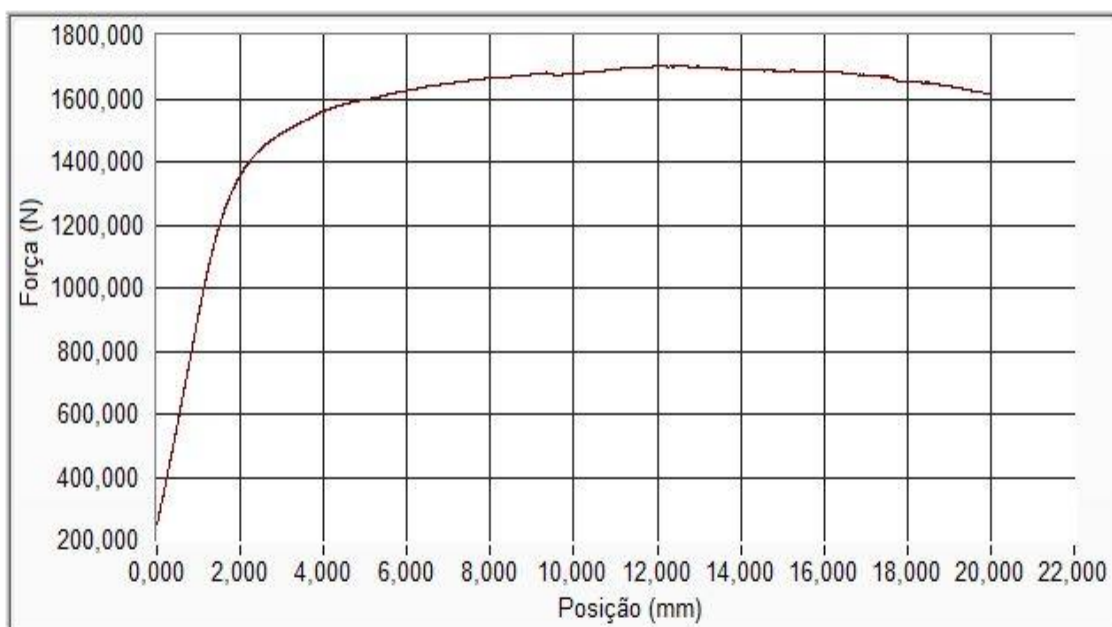
Hora:

Ensaio Realizado: Flexão

Pré Carga: 250N

Umidade Relativa:

Máquina Utilizada:



AMOSTRAS Nº	FORÇA MÁXIMA N	POSIÇÃO MÁXIMA mm	TENSÃO MÁXIMA MPa	TENSÃO ESCOAMENTO MPa	ALONGAMENTO %	Red.ÁREA %	M. YOUNG MPa
Ensaio 1							
Ensaio 2	1703,3193	20,0031	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Ensaio 3							
Ensaio 4							
Ensaio 5							
Ensaio 6							
Ensaio 7							
Ensaio 8							
Ensaio 9							
Ensaio 10							
Valor Mínimo	1703,3193	20,0031	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Valor Máximo	1703,3193	20,0031	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Valor Médio	1703,3193	20,0031	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Desvio Padrão	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN



Máquina Universal de Ensaios



Nome Empresarial: BIOPDI - Indústria, Comércio, Importação e Exportação de equipamentos Médicos e Odontológicos LTDA

Nome Fantasia: BIOPDI

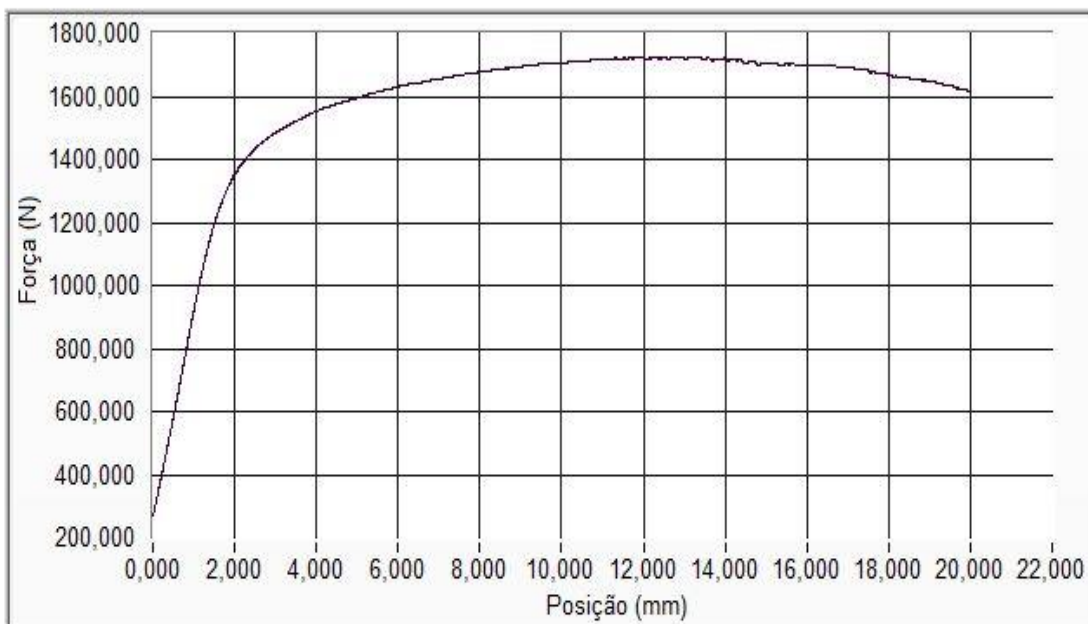
CNPJ: 13.027.001/0001-71

IE: 637.154.638.116

email: notafiscal@biopdi.com.br

**Ensaio:** C3  
**Norma:**  
**Identificação:**  
**Célula de Carga:** 10kN  
**Vel. Deslocamento:** 10mm/min  
**Temperatura:**

**Data:**  
**Hora:**  
**Ensaio Realizado:** Flexão  
**Pré Carga:** 250N  
**Umidade Relativa:**  
**Máquina Utilizada:**



AMOSTRAS Nº	FORÇA MÁXIMA N	POSIÇÃO MÁXIMA mm	TENSÃO MÁXIMA MPa	TENSÃO ESCOAMENTO MPa	ALONGAMENTO %	Red.ÁREA %	M. YOUNG MPa
Ensaio 1							
Ensaio 2							
Ensaio 3	1725,6748	20,0042	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Ensaio 4							
Ensaio 5							
Ensaio 6							
Ensaio 7							
Ensaio 8							
Ensaio 9							
Ensaio 10							
Valor Mínimo	1725,6748	20,0042	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Valor Máximo	1725,6748	20,0042	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Valor Médio	1725,6748	20,0042	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Desvio Padrão	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN

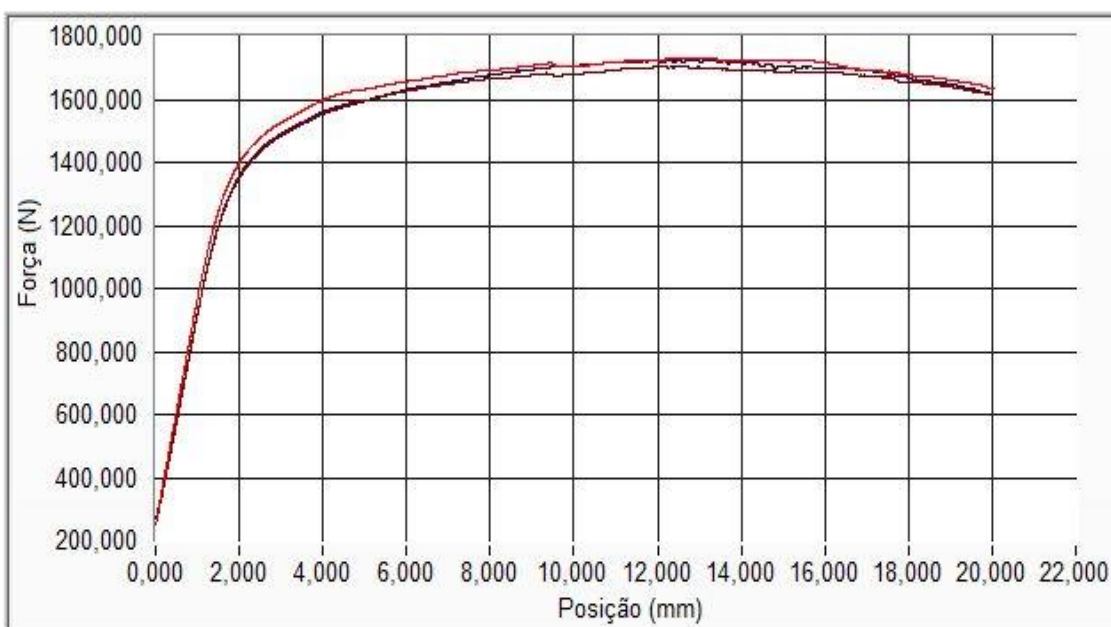


Máquina Universal de Ensaios



Nome Empresarial: BIOPDI - Indústria, Comércio, Importação e Exportação de equipamentos Médicos e Odontológicos LTDA  
 Nome Fantasia: BIOPDI  
 CNPJ: 13.027.001/0001-71  
 IE: 637.154.638.116  
 email: notafiscal@biopdi.com.br

<b>Ensaio:</b>	C1-2-3	<b>Data:</b>	
<b>Norma:</b>		<b>Hora:</b>	
<b>Identificação:</b>		<b>Ensaio Realizado:</b>	Flexão
<b>Célula de Carga:</b>	10kN	<b>Pré Carga:</b>	250N
<b>Vel. Deslocamento:</b>	10mm/min	<b>Umidade Relativa:</b>	
<b>Temperatura:</b>		<b>Máquina Utilizada:</b>	



AMOSTRAS Nº	FORÇA MÁXIMA N	POSIÇÃO MÁXIMA mm	TENSÃO MÁXIMA MPa	TENSÃO ESCOAMENTO MPa	ALONGAMENTO %	Red.ÁREA %	M. YOUNG MPa
Ensaio 1	1732,1756	20,0342	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Ensaio 2	1703,3193	20,0031	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Ensaio 3	1725,6748	20,0042	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Ensaio 4							
Ensaio 5							
Ensaio 6							
Ensaio 7							
Ensaio 8							
Ensaio 9							
Ensaio 10							
Valor Mínimo	1703,3193	20,0031	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Valor Máximo	1732,1756	20,0342	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Valor Médio	1720,3899	20,0138	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Desvio Padrão	15,1367	0,0176	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000



Máquina Universal de Ensaios



Nome Empresarial: BIOPDI - Indústria, Comércio, Importação e Exportação de equipamentos Médicos e Odontológicos LTDA

Nome Fantasia: BIOPDI

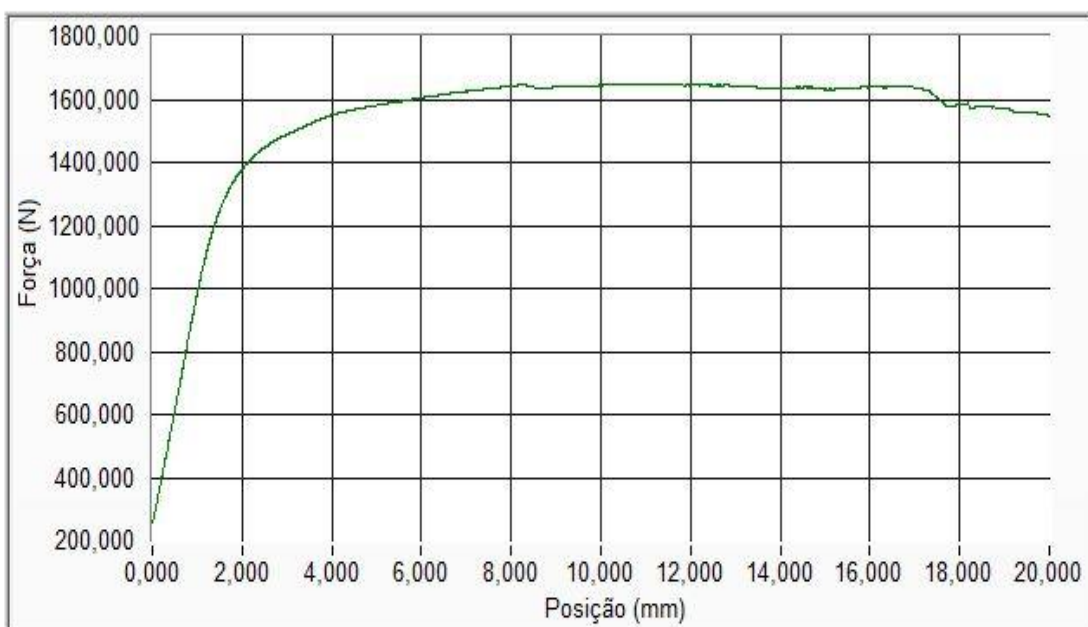
CNPJ: 13.027.001/0001-71

IE: 637.154.638.116

email: notafiscal@biopdi.com.br

Ensaio: D1  
 Norma:  
 Identificação:  
 Célula de Carga: 10kN  
 Vel. Deslocamento: 10mm/min  
 Temperatura:

Data:  
 Hora:  
 Ensaio Realizado: Flexão  
 Pré Carga: 250N  
 Umidade Relativa:  
 Máquina Utilizada:



AMOSTRAS Nº	FORÇA MÁXIMA N	POSIÇÃO MÁXIMA mm	TENSÃO MÁXIMA MPa	TENSÃO ESCOAMENTO MPa	ALONGAMENTO %	Red.ÁREA %	M. YOUNG MPa
Ensaio 1							
Ensaio 2							
Ensaio 3							
Ensaio 4	1649,9766	20,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Ensaio 5							
Ensaio 6							
Ensaio 7							
Ensaio 8							
Ensaio 9							
Ensaio 10							
Valor Mínimo	1649,9766	20,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Valor Máximo	1649,9766	20,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Valor Médio	1649,9766	20,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Desvio Padrão	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN

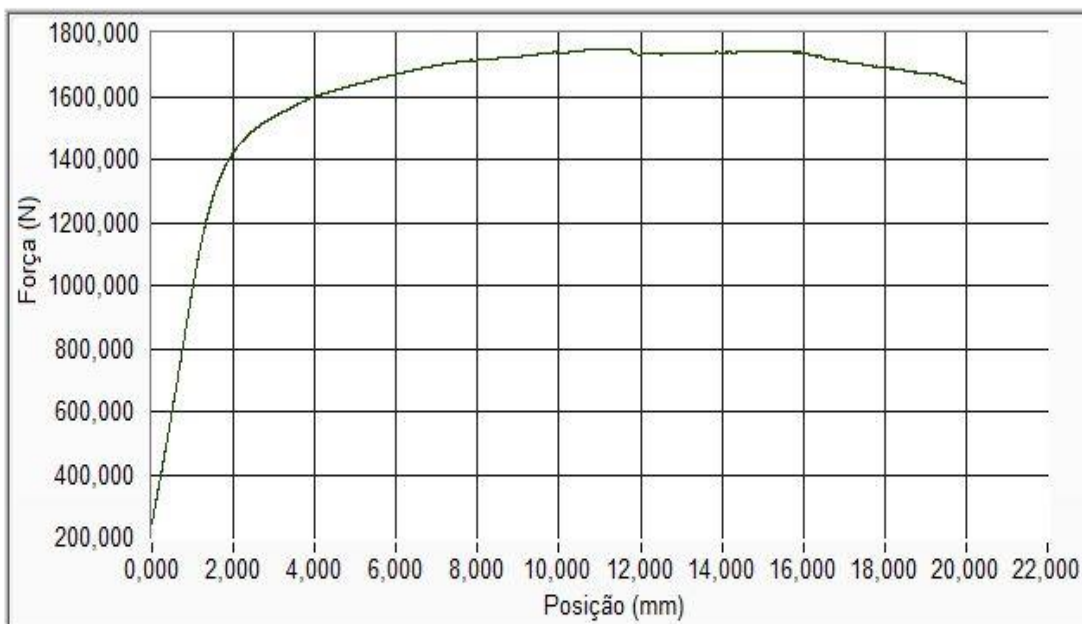


Máquina Universal de Ensaios



Nome Empresarial: BIOPDI - Indústria, Comércio, Importação e Exportação de equipamentos Médicos e Odontológicos LTDA  
 Nome Fantasia: BIOPDI  
 CNPJ: 13.027.001/0001-71  
 IE: 637.154.638.116  
 email: notafiscal@biopdi.com.br

<b>Ensaio:</b>	D2	<b>Data:</b>	
<b>Norma:</b>		<b>Hora:</b>	
<b>Identificação:</b>		<b>Ensaio Realizado:</b>	Flexão
<b>Célula de Carga:</b>	10kN	<b>Pré Carga:</b>	250N
<b>Vel. Deslocamento:</b>	10mm/min	<b>Umidade Relativa:</b>	
<b>Temperatura:</b>		<b>Máquina Utilizada:</b>	



AMOSTRAS Nº	FORÇA MÁXIMA N	POSIÇÃO MÁXIMA mm	TENSÃO MÁXIMA MPa	TENSÃO ESCOAMENTO MPa	ALONGAMENTO %	Red.ÁREA %	M. YOUNG MPa
Ensaio 1							
Ensaio 2							
Ensaio 3							
Ensaio 4							
Ensaio 5	1750,1612	20,0021	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Ensaio 6							
Ensaio 7							
Ensaio 8							
Ensaio 9							
Ensaio 10							
Valor Mínimo	1750,1612	20,0021	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Valor Máximo	1750,1612	20,0021	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Valor Médio	1750,1612	20,0021	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Desvio Padrão	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN



Máquina Universal de Ensaios



Nome Empresarial: BIOPDI - Indústria, Comércio, Importação e Exportação de equipamentos Médicos e Odontológicos LTDA

Nome Fantasia: BIOPDI

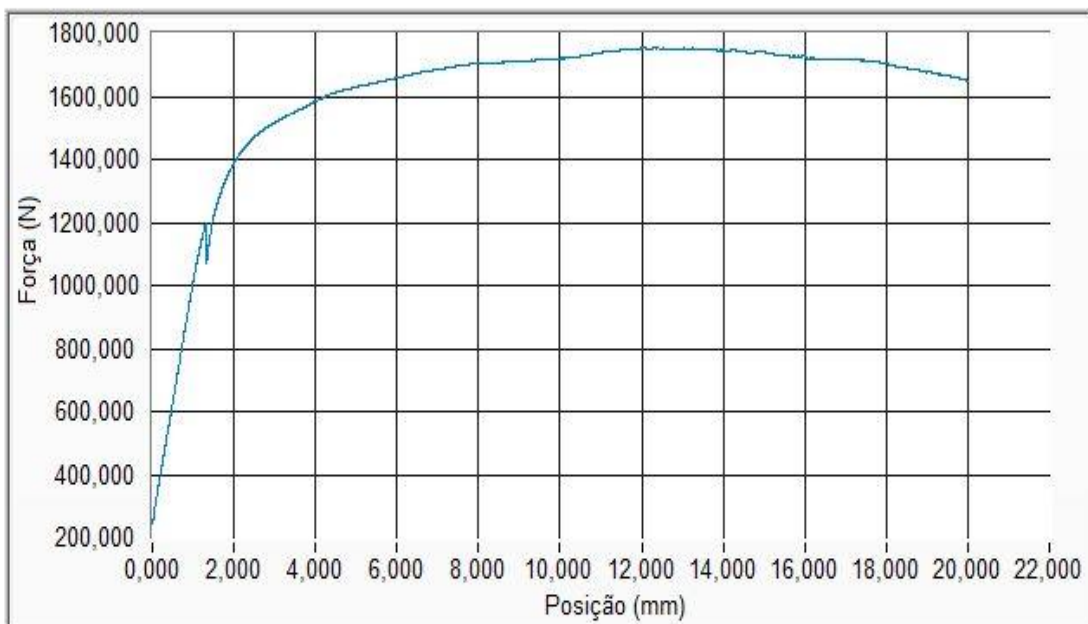
CNPJ: 13.027.001/0001-71

IE: 637.154.638.116

email: notafiscal@biopdi.com.br

Ensaio: D3  
 Norma:  
 Identificação:  
 Célula de Carga 10kN  
 Vel. Deslocamento: 10mm/min  
 Temperatura:

Data:  
 Hora:  
 Ensaio Realizado: Flexão  
 Pré Carga: 250N  
 Umidade Relativa:  
 Máquina Utilizada:



AMOSTRAS Nº	FORÇA MÁXIMA N	POSIÇÃO MÁXIMA mm	TENSÃO MÁXIMA MPa	TENSÃO ESCOAMENTO MPa	ALONGAMENTO %	Red.ÁREA %	M. YOUNG MPa
Ensaio 1							
Ensaio 2							
Ensaio 3							
Ensaio 4							
Ensaio 5							
Ensaio 6	1752,9060	20,0029	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,000000
Ensaio 7							
Ensaio 8							
Ensaio 9							
Ensaio 10							
Valor Mínimo	1752,9060	20,0029	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Valor Máximo	1752,9060	20,0029	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Valor Médio	1752,9060	20,0029	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Desvio Padrão	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN



Máquina Universal de Ensaios



Nome Empresarial: BIOPDI - Indústria, Comércio, Importação e Exportação de equipamentos Médicos e Odontológicos LTDA

Nome Fantasia: BIOPDI

CNPJ: 13.027.001/0001-71

IE: 637.154.638.116

email: notafiscal@biopdi.com.br

Ensaio: C e D

Norma:

Identificação:

Célula de Carga 10kN

Vel. Deslocamento: 10mm/min

Temperatura:

Data:

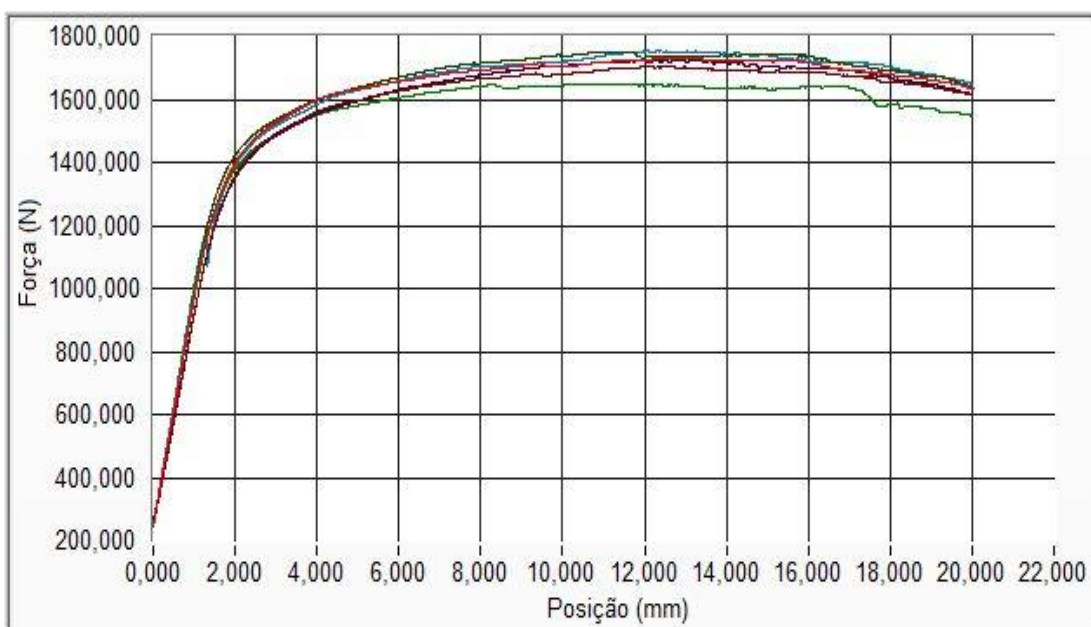
Hora:

Ensaio Realizado: Flexão

Pré Carga: 250N

Umidade Relativa:

Máquina Utilizada:



AMOSTRAS Nº	FORÇA MÁXIMA N	POSIÇÃO MÁXIMA mm	TENSÃO MÁXIMA MPa	TENSÃO ESCOAMENTO MPa	ALONGAMENTO %	Red.ÁREA %	M. YOUNG MPa
Ensaio 1	1732,1756	20,0342	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Ensaio 2	1703,3193	20,0031	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Ensaio 3	1725,6748	20,0042	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Ensaio 4	1649,9766	20,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Ensaio 5	1750,1612	20,0021	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Ensaio 6	1752,9060	20,0029	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,000000
Ensaio 7							
Ensaio 8							
Ensaio 9							
Ensaio 10							
Valor Mínimo	1649,9766	20,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Valor Máximo	1752,9060	20,0342	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Valor Médio	1719,0356	20,0077	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Desvio Padrão	38,3377	0,0130	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

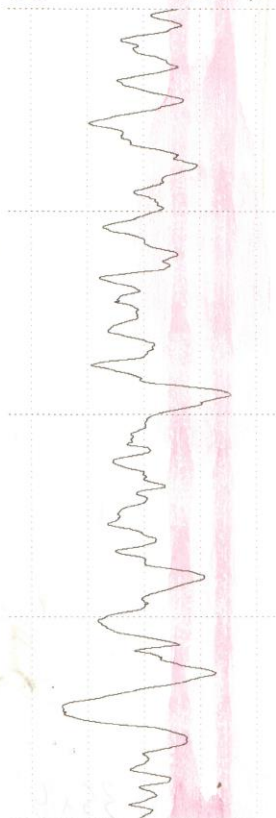


MarSurf M 300 C

SENAI 5.90  
LABORATORIO  
METROLOGIA RUG2  
Tel. 19 3543 1760

Data 16/11/2023  
Hora 10:39  
T0 Pxx-350 350 11  
Lt 17.50 mm  
Ls GS desl.  
Lc -GS 2.500 mm  
Ra 3.863 µm  
Rq 4.977 µm  
Rz 21.14 µm  
RzJ 13.58 µm  
Rmax 27.40 µm  
Rp 9.868 µm  
RpA 14.80 µm  
Rpm 9.868 µm  
Rv 11.27 µm  
Rpk 6.397 µm  
Rk 11.94 µm  
Rvk 5.232 µm  
Mr1 10 %  
Mr2 89 %  
A1 335.4  
A2 298.1  
Vo 0.030  
Rt 30.30 µm  
R3z 9.925 µm  
R<sub>Pc</sub>(0.5,-0.5) 20 /c  
R<sub>mr</sub>(-1.00,5.0) 7.5 %  
R<sub>mr</sub>(-2.00,5.0) 11 %  
R<sub>mr</sub>(-5.00,5.0) 29 %  
R<sub>Sm</sub> 866 µm  
S 467 µm  
Rsk -0.07

R Perfil NEG  
Lc -GS 2.500 mm  
HOR 2.500 mm  
VER 10.0 µm



PERFIL BRUTA

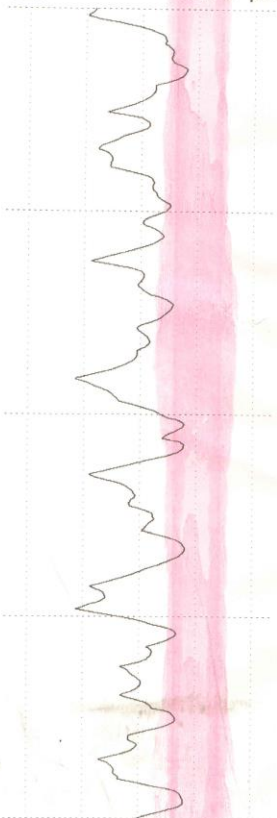


MarSurf M 300 C

SENAI 5.90  
LABORATORIO  
METROLOGIA RUG2  
Tel. 19 3543 1760

Data 16/11/2023  
Hora 10:41  
T0 Pxx-350 350 11  
Lt 5.600 mm  
Ls GS desl.  
Lc -GS 0.800 mm  
Ra 20.95 µm  
Rq 25.88 µm  
Rz 98.60 µm  
RzJ 79.30 µm  
Rmax 145.0 µm  
Rp 55.01 µm  
RpA 74.24 µm  
Rpm 55.01 µm  
Rv 43.59 µm  
Rpk 27.27 µm  
Rk 72.75 µm  
Rvk 17.70 µm  
Mr1 11 %  
Mr2 93 %  
A1 1555  
A2 577.1  
Vo 0.058  
Rt 145.0 µm  
R3z \*\*\*\* µm  
R<sub>Pc</sub>(0.5,-0.5) 38 /c  
R<sub>mr</sub>(-1.00,5.0) 5.5 %  
R<sub>mr</sub>(-2.00,5.0) 5.9 %  
R<sub>mr</sub>(-5.00,5.0) 7.3 %  
R<sub>Sm</sub> 429 µm  
S 200 µm  
Rsk 0.017

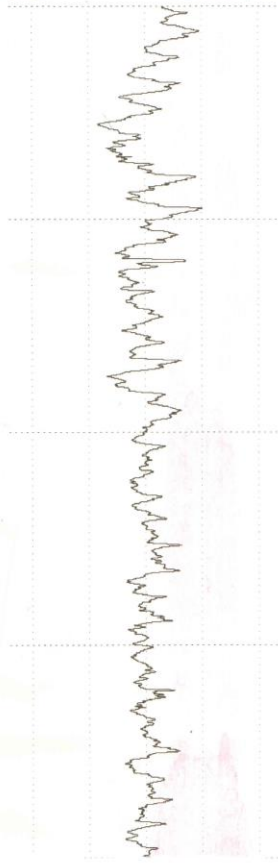
R Perfil NEG  
Lc -GS 0.800 mm  
HOR 0.800 mm  
VER 50.0 µm



PROTESE BRUTA

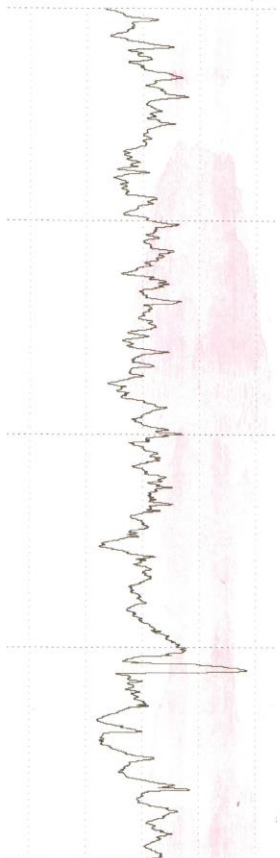
Data 16/11/2023  
Hora 10:32  
T0 Pxx-350 350 11  
Lt 5.600 mm  
Ls GS desl.  
Lc -GS 0.800 mm  
Ra 0.561 µm  
Rq 0.719 µm  
Rz 3.146 µm  
RzJ 1.922 µm  
Rmax 4.651 µm  
Rp 1.306 µm  
RpA 2.130 µm  
Rpm 1.306 µm  
Rv 1.840 µm  
Rpk 0.878 µm  
Rk 1.834 µm  
Rvk 0.942 µm  
Mr1 8.4 %  
Mr2 88 %  
A1 37.06  
A2 58.61  
Vo 0.006  
Rt 4.651 µm  
R3z 2.600 µm  
R<sub>Pc</sub>(0.5,-0.5) 55 /c  
R<sub>mr</sub>(-1.00,5.0) 50 %  
R<sub>mr</sub>(-2.00,5.0) 89 %  
R<sub>mr</sub>(-5.00,5.0) 100 %  
RSm 119 µm  
S 52 µm  
Rsk -0.57

R Perfil NEG  
Lc -GS 0.800 mm  
HOR 0.800 mm  
VER 2.50 µm



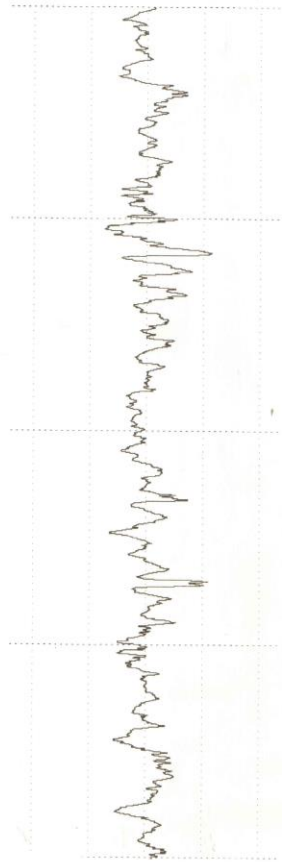
Data 16/11/2023  
Hora 10:33  
T0 Pxx-350 350 11  
Lt 5.600 mm  
Ls GS desl.  
Lc -GS 0.800 mm  
Ra 0.619 µm  
Rq 0.817 µm  
Rz 4.125 µm  
RzJ 2.336 µm  
Rmax 6.677 µm  
Rp 1.790 µm  
RpA 2.069 µm  
Rpm 1.790 µm  
Rv 2.335 µm  
Rpk 0.995 µm  
Rk 2.111 µm  
Rvk 1.041 µm  
Mr1 11 %  
Mr2 91 %  
A1 56.30  
A2 45.57  
Vo 0.005  
Rt 6.677 µm  
R3z 2.466 µm  
R<sub>Pc</sub>(0.5,-0.5) 45 /c  
R<sub>mr</sub>(-1.00,5.0) 35 %  
R<sub>mr</sub>(-2.00,5.0) 85 %  
R<sub>mr</sub>(-5.00,5.0) 100 %  
RSm 210 µm  
S 62 µm  
Rsk -0.67

R Perfil NEG  
Lc -GS 0.800 mm  
HOR 0.800 mm  
VER 2.50 µm



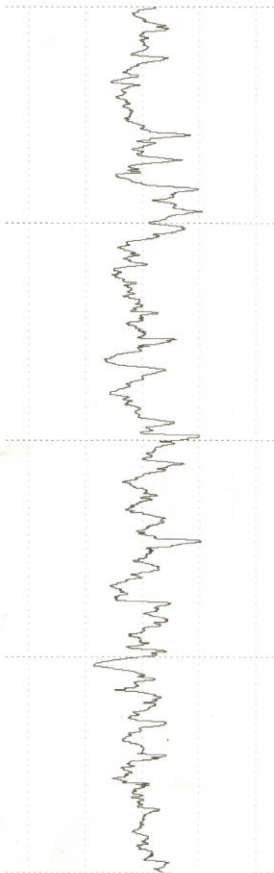
Data 16/11/2023  
Hora 10:31  
T0 Pxx-350 350 11  
Lt 5.600 mm  
Ls GS desl.  
Lc -GS 0.800 mm  
Ra 0.503 µm  
Rq 0.649 µm  
Rz 3.432 µm  
RzJ 1.941 µm  
Rmax 4.749 µm  
Rp 1.505 µm  
RpA 1.910 µm  
Rpm 1.505 µm  
Rv 1.926 µm  
Rpk 0.565 µm  
Rk 1.692 µm  
Rvk 0.775 µm  
Mr1 9.0 %  
Mr2 89 %  
A1 25.38  
A2 41.80  
Vo 0.004  
Rt 4.749 µm  
R3z 2.399 µm  
R<sub>Pc</sub>(0.5,-0.5) 42 /c  
R<sub>mr</sub>(-1.00,5.0) 52 %  
R<sub>mr</sub>(-2.00,5.0) 94 %  
R<sub>mr</sub>(-5.00,5.0) 100 %  
RSm 154 µm  
S 51 µm  
Rsk -0.55

R Perfil NEG  
Lc -GS 0.800 mm  
HOR 0.800 mm  
VER 2.50 µm

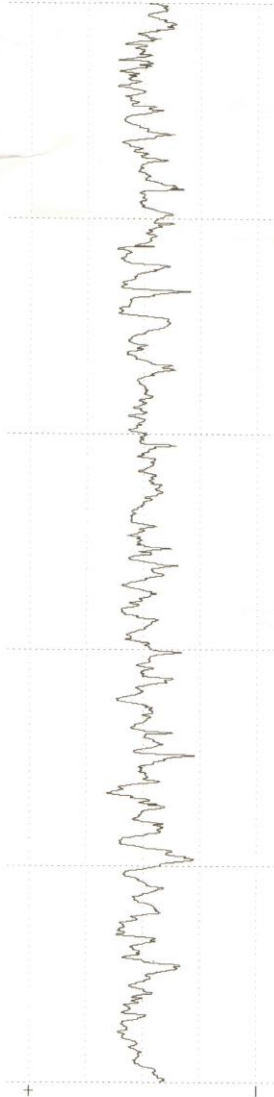


Data 16/11/2023  
Hora 10:29  
T0 Pxx-350 350 11  
Lt 5.600 mm  
Ls GS desl.  
Lc -GS 0.800 mm  
Ra 0.615 µm  
Rq 0.777 µm  
Rz 3.849 µm  
RzJ 2.200 µm  
Rmax 4.230 µm  
Rp 1.705 µm  
RpA 2.210 µm  
Rpm 1.705 µm  
Rv 2.144 µm  
Rpk 0.607 µm  
Rk 2.158 µm  
Rvk 0.981 µm  
Mr1 7.9 %  
Mr2 89 %  
A1 23.94  
A2 53.24  
Vo 0.005  
Rt 4.852 µm  
R3z 2.692 µm  
RPC(0.5,-0.5) 50 /c  
Rmr(-1.00,5.0) 42 %  
Rmr(-2.00,5.0) 86 %  
Rmr(-5.00,5.0) 100 %  
RSm 170 µm  
S 58 µm  
Rsk -0.31

R Perfil NEG  
Lc -GS 0.800 mm  
HOR 0.800 mm  
VER 2.50 µm



MA



Ra 0.494 µm  
Rq 0.617 µm  
Rz 3.115 µm  
RzJ 1.849 µm  
Rmax 3.937 µm  
Rp 1.279 µm  
RpA 1.679 µm  
Rpm 1.279 µm  
Rv 1.836 µm  
Rpk 0.389 µm  
Rk 1.640 µm  
Rvk 0.706 µm  
Mr1 11 %  
Mr2 89 %  
A1 21.09  
A2 38.85  
Vo 0.004  
Rt 3.937 µm  
R3z 2.368 µm  
RPC(0.5,-0.5) 58 /c  
Rmr(-1.00,5.0) 55 %  
Rmr(-2.00,5.0) 95 %  
Rmr(-5.00,5.0) 100 %  
RSm 116 µm  
S 49 µm  
Rsk -0.33

Data 16/11/2023  
Hora 10:27  
T0 Pxx-350 350 11  
Lt 5.600 mm  
Ls GS desl.  
Lc -GS 0.800 mm  
Ra 0.535 µm  
Rq 0.696 µm  
Rz 3.779 µm  
RzJ 2.114 µm  
Rmax 4.401 µm  
Rp 1.554 µm  
RpA 1.831 µm  
Rpm 1.554 µm  
Rv 2.225 µm  
Rpk 0.730 µm  
Rk 1.663 µm  
Rvk 1.004 µm  
Mr1 16 %  
Mr2 89 %  
A1 58.07  
A2 55.30  
Vo 0.006  
Rt 4.559 µm  
R3z 2.332 µm  
RPC(0.5,-0.5) 42 /c  
Rmr(-1.00,5.0) 45 %  
Rmr(-2.00,5.0) 91 %  
Rmr(-5.00,5.0) 100 %  
RSm 190 µm  
S 54 µm  
Rsk -0.43

R Perfil NEG  
Lc -GS 0.800 mm  
HOR 0.800 mm  
VER 2.50 µm

