Desenvolvimento de Prótese de Membro Superior por Manufatura Aditiva

Bruno R. Souza, Gabriel Ricardo Mingione, Guilherme B. da Conceição, Mayk A. Rodrigues, Pedro H. Bettoni

Orientador: MRs. Danilo Carvalho, Coorientador: MRs Alexandre Neves

Departamento de Engenharia Mecânica Universidade Anhembi Morumbi (UAM)

Resumo — Em busca de melhorar a qualidade de vida das pessoas que necessitam de uma maior acessibilidade e consciência de inclusão na sociedade, apresentando a teoria e a prática da fabricação por meio de manufatura aditiva de próteses para membros superiores, promovendo conforto e independência em atividades cotidianas, que atualmente não tem acesso a algum modelo de próteses. O intuito é apresentar para o mercado uma solução de produção com um custo mais acessível, uma vez que os produtos disponíveis no mercado são caros e muitas vezes o cidadão não tem o poder de compra. A partir do conceito de desenho universal serão adotados testes em software de simulação e em corpo de prova visando a questão estética e funcional. Para viabilizar esse projeto, utilizou - se as tecnologias mais acessíveis e fáceis de serem encontradas nacionalmente.

***Palavras-Chave* — Próteses. Desenho Universal. Acessibilidade.**

I. INTRODUÇÃO

EM face do contexto social atual, ser portador de necessidades, em particular pessoas com deficiências físicas que moram no Brasil, ainda é uma barreira a se enfrentar. Conforme as evoluções tecnológicas do mundo, tornou-se possível conectar diversos setores de conhecimento com outras áreas profissionais em prol da criação de ambientes e produtos para pessoas com deficiências, assegurando que todos possam utilizar com segurança e autonomia os diversos espaços e objetos construídos, conhecido como desenho universal. Com isso a engenharia vem se mobilizando através da manufatura aditiva para a prototipagem de próteses estéticas e funcionais. [1, 33]

Segundo a pesquisa do censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatistica (IBGE) de 2010, cerca de 6,7% da população brasileira declarou ter algum grau de dificuldade em alguma das habilidades auditivas, visuais, físicas ou mental/intelectual, desta porcentagem 2,3% representa a dificuldade motora, portanto, a acessibilidade é um assunto que está relacionada com os obstáculos cotidiano. E, com a finalidade de facilitar o dia a dia destas pessoas e o acesso que a medicina tem ao banco de imagens dos pacientes através dos exames de ultrassonografia, ressonância magnética, raio x ou tomografia computadorizada, é possível a fabricação de próteses idênticas ao membro original do paciente. [1]

A partir da análise da monografia Prótese De Membro Superior Por Manufatura Aditiva: Um Estudo Comparativo De Materiais Poliméricos Utilizáveis, desenvolvida por estudantes da universidade Anhembi Morumbi, identificou-se que através das comparações feitas em laboratório seguindo a norma ASTM D638 referente a ensaios de tração em polímeros com o corpo de prova, o acido polilático (PLA) com densidade em 100% foi alcançado a maior resistência do material e com um custo considerável e baixo. [2]

Em vista disso, o uso do PLA se destacou sendo o melhor material para a produção dos modelos utilizados por pessoas com amputações dos membros superiores. Considerando os dados provindo da análise do material, é possível observar a necessidade do aprimoramento dos aspectos físicos do conjunto de próteses para os modelos estéticos fixos.[2]

Utilizando métodos de simulações computacionais, é possível criar modelos em 3D para estudar as características mecânicas, como a resistência à carga, fator de segurança e deslocamento. A fim de buscar uma margem de resultados seguros para uma utilização cotidiana do usuário, dessa forma garantindo comodidade e segurança para os mesmos, além de ser acessível a população de baixa renda.

II. PROBLEMA DE PESQUISA / OBJETIVOS

A amputação é um dos meios mais antigos da medicina que sempre foi indicada em situações de trauma de membros, lesões graves de nervos, artérias, partes moles e ossos com a intenção de minimizar ou eliminar um possível risco a vida. [26]

Os principais motivos de amputação de membros superiores no Brasil por suas vezes são de ordem traumáticas decorrentes de acidentes de trabalho ou de trânsitos, sendo do sexo masculino a maior quantidade de casos relatados. [25]

O corte de um membro pode ser feita em diversas partes de um membro do corpo dentre eles são classificadas das seguintes formas a desarticulação, amputações abaixo do cotovelo, amputações de carpo e amputações transmetacarpianas. [27]

Observe na imagem a seguir níveis de amputações:

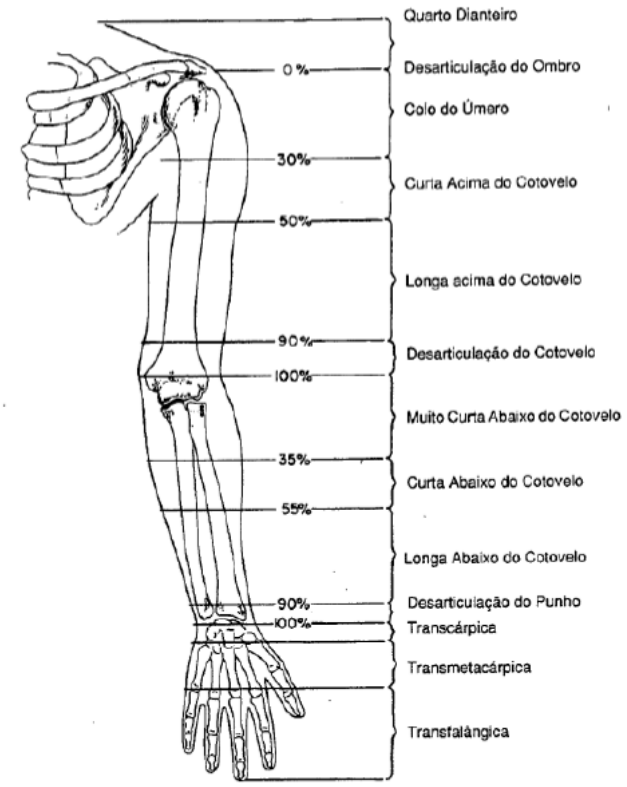

Fig. 1. Níveis de amputações
Fonte: CARVALHO, 2004 [27]

Em situações de amputações é recomendado a conservação máxima de tecidos e partes ósseas com o propósito de auxiliar no momento de fixação da prótese ao coto para manter o máximo de movimentos restantes do membro, porque quanto menor o coto para fixação mais complexo será a substituição do membro amputado. Há casos em que a uma desarticulação do ombro a substituição, se torna de extremamente complexa por falta de pontos de apoio para a adaptação e fixação para o encaixe da prótese. [25, 26, 27]

Com o avanço constate no setor de tecnologia e criação de novas áreas comerciais, é possível criar novas soluções para problemas, como também aprimorar resoluções já existentes. Tendo isso em vista, pode-se analisar a situação de pessoas com restrições de mobilidade física, mais especificamente, aquelas com a ausência de um membro superior, tais como a mão, o antebraço ou o braço por inteiro, seja ela de nascença ou por amputação. De acordo com as estatísticas de 2018 da Organização Mundial de Saúde (OMS) [3], mais de 80 mil pessoas são amputadas por ano, contando os membros superiores e inferiores, onde 70% dos casos são devidos a diabetes. Outros motivos são o câncer, acidentes de trânsito ou até mesmo a violência urbana. A solução encontrada para este assunto é a fabricação de próteses, feitas de diversos materiais, para substituir o membro perdido. Existem classificações de próteses como montra a Fig. 2.

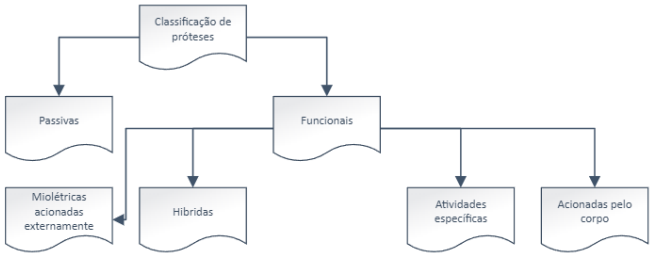

Fig.2. Fluxograma de Classificação de Tipos de Próteses
Fonte: Própria

Conforme a classificação, as próteses são separadas em duas categorias, as que são funcionais tendo uma parte mecânica para simular os movimentos de uma mão real. Os estéticos, onde não há movimento e serve exclusivamente para "completar" o espaço vazio.

Seguindo essa linha, na década de 80 surgiram as primeiras companhias responsáveis pela implantação da manufatura aditiva industrial, sendo a 3D Systems e Stratasys, porém tendo um foco apenas para indústrias, tornando assim, fora do alcance residencial. A ideia tem como função materializar um projeto feito em um software no computador, conseguindo imprimir uma vasta gama de peças do setor aeroespacial, automotivo, médico e odontológico. Todavia, a Makerbot e Formlabs foram as empresas responsáveis pela adaptação de tecnologia industrial para o meio residencial, trazendo o conceito de manufatura aditiva para dentro de casa. Ao longo dos últimos 40 anos o mercado veio evoluindo e barateando os custos de tal produto, porém a tecnologia só chegou ao Brasil em 2012 pela empresa Movtech. Em setembro de 2021, é possível comprar uma impressora 3D com pouco mais de R$1.500,00 reais. [4,12,13]

Tendo isso em vista, a ideia é analisar, por meio de simulações e testes, a manufatura aditiva de próteses para membros superiores com essa impressora 3D como ilustra a Fig. 3.

Fig.3. Imagem ilustrativa
Fonte: Creality Ender [16]

De acordo com o 3Dlab (2019), para aumentar a resistência mecânica de peças que são submetidas ao processo de manufatura aditiva, é indispensável considerar parâmetros alterados, como por exemplo o layout de impressão 3D, orientação de impressão, geometria e porcentagem de preenchimento da peça e seleção do material. Mantendo esses parâmetros alinhados, é possível que aja uma redução no custo de impressão e principalmente no tempo, onde a duração de impressão está diretamente relacionado a porcentagem de preenchimento. As propriedades mecanicas da peça podem ser melhores com as aprimorações do processo. [28, 29]

Outra forma de aumentar a resistência da peça é selecionar corretamente o material, pois os termoplásticos possuem particularidades diferentes e sua aplicação depende totalmente da característica final do objeto, como: alta dureza, resistência à tração, deformação elástica, etc. A padronização da impressão 3D está dividida em 4 seções alteráveis, essas combinações aperfeiçoam o resultado final de acordo com a necessidade do projeto. A figura 4 ilustra a divisão das seções.[28, 29]

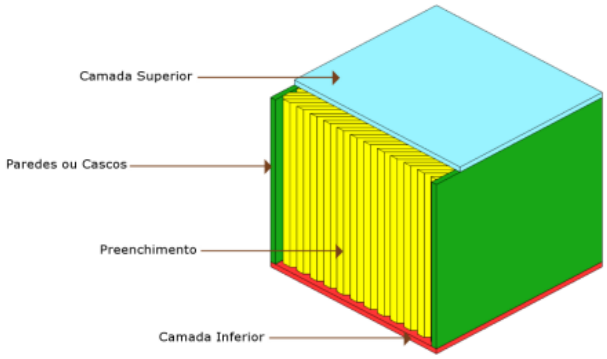

Fig.4. Camadas de impressão
Fonte: Adaptado 3D Lab [29]

Uma vez que o projeto está concluído, é importante ressaltar que o sentido de impressão interfere totalmente na resistência da peça, sendo que o mesmo precisa estar alinhado com a aplicação de força que a peça receberá. Geralmente essa decisão é tomada pelo software, porém, é possível faze-la manualmente, dependendo de variáveis que o programa não leva em conta. O mesmo vale para as camadas, superiores e inferiores. [28, 29]

Outro ponto que interfere na resistência é a geometria do objeto. A Figura 5 ilustra a influência do sentido de impressão.

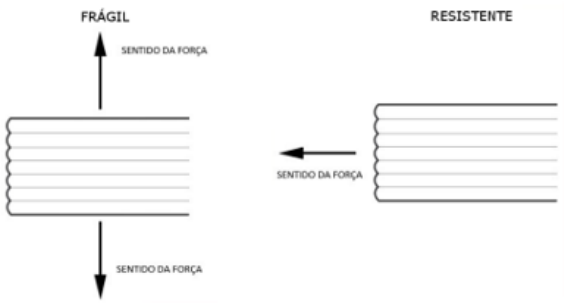

Fig.5. Imagem ilustrativa
Fonte: Adaptada 3D Lab [29]

Baseado em uma tese de conclusão de curso, realizado em 2019 por alunos de engenharia mecânica da Universidade Anhembi Morumbi, no qual foram estudados diversos materiais para analisar qual seria o melhor para a execução de tal prótese, foi concluído que o ácido polilático (PLA) é o mais indicado. Uma vez que já foi feito o estudo e comparação do melhor material, é válido avançar nos testes em cima dele, fazendo corpo de prova, buscando criar dados através de testes com os protótipos para a validação da prótese.

A tabela I a seguir expressa os resultados obtidos no ensaio referente ao material PLA comparado ao ABS, os quais tiveram valores proximos.

TABELA I
ENSAIO DE TRAÇÃO

Propriedades	PLA	ABS
Tensão de Escoamento	24,8 MPa	14,7 MPa
Módulo de Elasticidade	1896,0 MPa	1335,9 MPa
Tensão de Ruptura	46 MPa	29 MPa
Alongamento	3,68%	7,08%

Fonte: UNIVERSIDADE ANHEMBI MORUMBI – Escola de Engenharia, Arquitetura e Tecnologia. Disponível em: Prótese de membro superior por manufatura aditiva: um estudo comparativo de materiais poliméricos utilizáveis.[2]

III. PESQUISA TEÓRICA

O processo de confecção por manufatura aditiva ou impressão 3D como é popularmente conhecido vem crescendo rapidamente nos últimos anos, boa parte disso pelo surgimento de novas técnicas e tecnologias além da diminuição dos custos de equipamentos, apesar da recente popularização, essa é uma técnica datada inicialmente de 1984 por Charles “Chuck” Hull, porém em 1981, o japonês Hideo Kodama do instituto industrial de investigação de Nagoya já havia criado com a técnica de estereolitografia, que permite a criação de modelos 3D recorrendo a dados digitais de um modelo de impressora semelhante ao que Chuck criaria algum tempo depois, mais o fato de que após alguns anos Chuck Hull funda a 3D Systems Corp, empresa que se mantem uma das líderes de Mercado até os dias de hoje.[6]

Neste trabalho, a principal referência para a pesquisa e desenvolvimento, foi a tese de conclusão de curso (TCC), apresentado na Universidade Anhembi Morumbi (UAM), no ano de 2019, pelos integrantes Danilo Borges, Dayane dos Santos, Georges Frantzeskos e Paloma Nascimento, com orientação do professor Alexandre Neves, com o título; Prótese Superior Por Manufatura Aditiva: Um Estudo Comparativo de Materiais Poliméricos Utilizáveis. Em seu trabalho tiveram o objetivo de identificar o melhor material para a confecção de próteses de membro superior, pelo método de manufatura adtiva, durantes tais testes chegaram a conclusão que o material ideal seria o polilactídeo (PLA) polímero biodegradável, derivado de fontes renováveis como amido de milho, mandioca

e cana de açúcar, com temperatura de transição vítrea próxima de 60° C e pode ser utilizado em várias aplicações na saúde, porém não o construindo por não terem acesso a tal material, confeccionando então a prótese com material Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) um termoplástico, derivado do petróleo, com temperatura de transição vítrea aproximada de 105 ºC, com boa resistência ao impacto e ao calor, de fácil processamento, leve e que apresenta um pouco de flexibilidade. Algumas desvantagens do ABS são a variação dimensional de peças impressas e o efeito warp que é a causado pelo encolhimento e deformação da peça ao resfriar.[2]

Baseando-se nestes dados de materiais o intuito é confeccionar uma prótese com o material de melhor resultado em seus testes, o PLA. Quanto a confecção da prótese, o modelo e Design escolhido pelo grupo de TCC já citado, foi o modelo Cyborg Beast para nível de desarticulação de punho, desenvolvida por Jorge Zuniga e seu grupo de pesquisa na Creighton University e disponibilizada pela E-nable, uma comunidade de voluntários on-line com o intuito de desenvolver próteses de membros superior em impressão 3D de forma gratuita ou de baixo custo para crianças e adultos necessitados. Semelhante ao grupo mencionado a ideia é confeccionar a mesma prótese, devido a sua popularidade segundo a E-nable (2019) e a disponibilização dos arquivos de impressão. [22, 23]

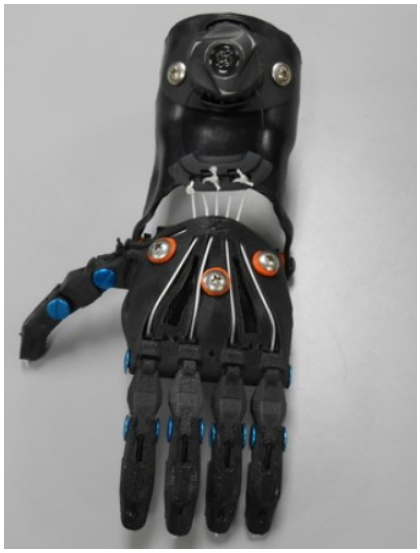

Fig.6. Modelo de prótese Cyborg Beast
Fonte: THINGIVERSE 2021 [15]

Para a realização da prótese se faz necessário mais informações referentes ao processo de impressão 3D. A saber, existem atualmente diversas técnicas e tecnologias de manufatura aditivas, abaixo é possível ver as três das mais comuns como:

1. Estereolitografia (SLA) que consiste em aplicar finas camadas de um material sensível a radiação ultravioleta, sendo expostas a radiação à medida que são extrudadas, uma após a outra, formando o objetivo desejado da base ao topo (bottom-up), ou seja, de baixo para cima;
2. Selective Laser melting (SLM) que utiliza o metal como matéria de impressão, que é derretido e formado camada por camada, onde o metal em formato de pó é depositado sobre a impressora e um laser de alta potência passa em determinadas partes do pó, fundindo a matéria e dando forma a peça por onde o laser passou;
3. Fused Deposition Modeling (FDM) que consiste no aquecimento de um material termoplástico até o estado semilíquido, onde é depositado na mesa de impressão pelo extrusor da impressora e resfriado rapidamente, repetindo-se o processo camada por camada até a conclusão da peça, este método se tornou o mais popular dentre os outros processos por sua facilidade de opção e baixo custo, sendo assim este será o método que adotaremos para a confecção de prótese. [7]

Fig.7. Modelagem produzida pela técnica FDM
Fonte: Stratasys 2021 [14]

Com compreensão das principais técnicas de impressão 3D, se faz necessário o conhecimento de alguns softwares utilizados no processo para a impressão propriamente dita, é necessário um software de fatiamento para cortar o arquivo previamente modelado por outro software, para separa-lo em camadas e traçar as rotas que a impressora irá seguir, existem diversas opões de software no mercado algumas específicas de cada impressora e fabricante e alguns universais de uso livre, como o Cliever Studia da fabricante Cliever e desenvolvido para os seu modelos de impressora, Cliever CL1 e Cliever CL2, o Catalyst desenvolvida para a impressora Uprint SE e os de uso livre como 3D Slash, Cura, Slic3r e Simplify 3D, esses softwares tem como objetivo converter o modelo fatiado em linguagem de máquina, ou seja, coordenadas em x, y e z, reunindo essas informações em um arquivo G-code que é a linguagem de programação normalmente destinada a sistemas CNC (Computer Numerical Control ou Controle Numérico Computadorizado). [8,9,10,11]

Antes do fatiamento do objeto pelos softwares mencionados, é necessário projetar e criar este objeto utilizando o software de modelagem CAD (Computer Aided Design ou Desenho Assistido por Computador), esses também possuem diversos fabricantes no mercado entretanto os mais comuns são o Inventor da fabricante AutoDesk e o SolidWorks desenvolvidos pela fabricante SolidWorks Corporation, esses softwares possuem dentre suas diversas funções além das opções de

modelagem a possibilidade de simulações de várias situações que tal projeto possa vir a sofrer possibilitando que ensaios virtuais possam ser realizados antes mesmo da construção do protótipo, testes como a seleção do matérial e aplicação de esforços.

Citado no livro ensaio dos materiais de Augusto Garcia, Jaime Alvares e Carlos Alexandre é através dos ensaios mecânicos que é permitido a determinação das propriedades mecânicas, como se comporta o material quando submetido a esforços, tensões e deformações. Entre as principais propriedades estão resistência, elasticidade e plasticidade.[30,31]

Os ensaios tem como finalidade capturar informações rotineiras do produto e novas observações sobre os materiais. Algumas vantagens relacionadas que se pode mencionar são reduzir materiais parecidos, obter comparação de resultados, redução de custos e padronização da qualidade do produto.[30,31]

É classificado entre os principais ensaios dos materiais quando se refere a integridade geométrica ou dimensional, testes destrutivos onde a intenção é a avaria total ou parcial da peça e o outro seria os não-destrutivos, ou seja, não comprometem a peça. Ambos ensaios citados anteriormente serão aplicados neste trabalho e no teste destrutivo serão realizados testes como torção, dureza, tração e flexão. Nos testes não destrutivos serão aplicados ensaios em softwares e testes em atividades do dia a dia, como por exemplo, agarrar um copo, segurar pratos, entre outros. [30,31] Para esse procedimento são utilizados alguns métodos como ensaios da própria peça, ensaios em amostras e em corpos de prova extraídos do próprio material.

Entre os ensaios à disposição para aferição das propriedades mecânicas dos materiais, o de tração é o mais utilizado por ser relativamente simples e rápido além de capturar informações importantes e primordiais para o projeto como um todo incluindo a fabricação de peças.

Para esses ensaios são utilizados corpos de provas e são aplicadas cargas de tração nas extremidades do corpo. O resultado do teste de tração é obtido através da curva de tensão pela deformação sofrida pelo corpo.

A. Pesquisa Bibliográfica

Com intuito de adquirir maiores informações de projetos semelhantes, foram estudados os projetos citados acima para diferenciar e aperfeiçoar características que provavelmente poderiam ser melhoradas. Destacando o trabalho de conclusão de curso (TCC), apresentado em 2019, por terem definido o material propício a produção de próteses, visando atingir a população que possui dificuldade motora por motivos de amputação de membros superiores.[2]

Alinhando esses conceitos com outros trabalhos mencionados, como a respeito das técnicas de impressões 3D e softwares necessários para a melhor desenvolvimento das atividades que foram propostas, abrindo portas para um novo tipo de informação com as tecnologias atuais, buscando o baixo custo de produção e repasse para expandir a acessibilidade e uma condição de vida melhor para as pessoas que precisão.

B. Pesquisa de Mercado

Atualmente com a popularização da impressora 3D no mercado, conseguimos obter diversos resultados através de projetos disponibilizados na internet para impressão, podendo ser encontrados em sites como 3Dlab e E-nable, sendo a primeira com projetos mais gerais e a segunda que é uma comunidade de voluntários on-line que auxilia no desenvolvimento de próteses de membro superior em impressão 3D. Esses projetos são utilizados principalmente nas indústrias automobilísticas, aeroespacial, sendo vantajosa por conta do seu baixo custo em produções de até 5.000 unidades e até em indústrias de alimentos para confecção de suas embalagens. Além desses setores, um que tem se tornado destaque é a área da medicina, onde é possível imprimir biomodelos para estudos práticos em universidades, e até próteses sendo humanas ou animais. [2,22, 23]

As impressões citadas acima são realizadas através de rolos de filamentos, tendo como principais o Polietileno Teraftalato modificado com Glicol (PETG) e Ácido Polilático (PLA), sendo o segundo material, o escolhido para realização desse trabalho através de estudos realizados pelos alunos da Universidade Anhembi Morumbi (UAM) no ano de 2019, sendo os integrantes Danilo Borges, Dayane dos Santos, Georges Frantzeskos e Paloma Nascimento, com orientação do professor Alexandre Neves, com o título; Prótese Superior Por Manufatura Aditiva: Um Estudo Comparativo de Materiais Poliméricos Utilizáveis, monografia de conclusão de curso que está sendo utilizado como referência para o desenvolvimento desse estudo.[2, 20, 21]

O Ácido Polilático (PLA) é um poliéster termoplástico, semicristalino ou amorfo feito com ácido lático, e é sintetizado através de fontes renováveis como o açúcar do milho, cana de açúcar, mandioca e beterraba. O PLA destaca-se por ser um polímero biodegradável, com biocompatilidade alta e absorção biológica. Outros destaques ficam por conta de suas propriedades mecânicas sendo muito resistente (resistência PLA aproximada 50 a 70 MPa), pode obter impressões de peças grandes e pode sofrer esforços de atritos. Algumas deficiências do PLA são em relação ao seu acabamento pois precisará de um acabamento posterior com lixas e acetona, e um alongamento limitado até sua ruptura.

Em relação ao seu custo, no mercado é possível encontrar um rolo de filamento de PLA de 1 kg para impressoras 3D na faixa de R$ 140,00 reais. O preço pode variar por conta das cores do material, onde o PLA está entre os mais populares por ter diversas cores à disposição, além da facilidade na impressão utilizando esse polímero. [20, 21]

A Tabela II exibe o custo para a produção da prótese para desarticulação de punho do tipo funcional e mecânica, utilizando o PLA com densidade de preenchimento de 100% que é 201% mais barata comparada com o modelo mais simples encontrados em sites específicos.

TABELA II
CUSTO DE PRODUÇÃO

Item	Quantidade	Custo Estimado
Ácido Polilático (PLA)	72,224 m	R$ 36,84
Energia (Impressora 3D)	0,86 kW	R$ 17,50
Elástico roliço (60% Poliester / 40% Elastano)	150 mm	R$ 2,70
Parafusos de união de aço niquelado Ø5x15mm	6 Unid	R$ 19,50
Total		R$ 76,64

Fonte: Própria (2021)

O custo para a realização do protótipo foi de R$76,64 (cotado em 05/2022), nesse valor estão inclusos, filamento de PLA, parafusos de juntas, linhas para veias de movimentação e energia gasta.

IV. METODOLOGIA

A pesquisa foi destinada a encontrar inovações para melhorar a qualidade de vida de pessoas com membros superiores parcialmente amputados ou de nascença, através da apresentação de testes de aptidão, mecânicos e de temperatura.

Para alcançarmos esses objetivos propostos iremos realizar as simulações computacionais e testes práticos na prótese escolhida, utilizaremos o software Autodesk Inventor, por ser um dos mais completos no mercado com capacidade para diversas simulações como tração, compressão, flambagem e simulações térmicas, além de estar disponível uma licença de utilização gratuita de 3 anos para alunos e educadores.

Os testes a ser feito mecânicos destrutivos de tração e compressão na Máquina de Ensaio Universal EMIC modelo DL 10000, onde possui duas “garras”, uma superior e outra inferior onde o produto é fixado nas extremidades de cima e debaixo com a função de exercer uma força uniaxial gradativa, no momento em que houver sua fratura, é possível concluir, com as informações gráficas que a máquina apresentar, qual o maior valor de tração/deformação que a prótese aguentará. Com o mesmo equipamento, porém com outro corpo de prova, será feito um teste de compressão, prensando o objeto para descobrir qual o maior valor que ele aguenta antes de iniciar a deformação elástica definitiva. Na figura 8 é possível visualizar uma ilustração da Máquina de Ensaio Universal EMIC modelo DL 10000.

Fig.8. Figura ilustrativa maquina universal de ensaio EMIC
Fonte: Soluções Industriais [17]

Para os testes práticos iremos imprimir corpos de prova com algumas configurações de impressão e realizar os testes de tração e compressão, nos laboratórios da Universidade Anhembi Morumbi com as máquinas disponíveis a EMIC Dl10000 para ensaios de tração e a EMIC PCE 100 para ensaios de compressão, ambas com força máxima suportada de 10 toneladas. [17, 18, 19]

Fig.9. Ilustração máquina EMIC PCE 100
Fonte: INSTRON [18]

Buscando submeter também a testes de tração algumas partes da prótese pronta em tamanho real para verificar os pontos de maior fragilidade como junções e articulações. Todas as impressões serão realizadas com a impressora Cliever CL 2 Pro, da fabricante brasileira Cliever escolhida por ser a impressora disponível na universidade mencionada. Abaixo pode-se observar um fluxograma figura 10 da configuração de como será o processo de validação da prótese.

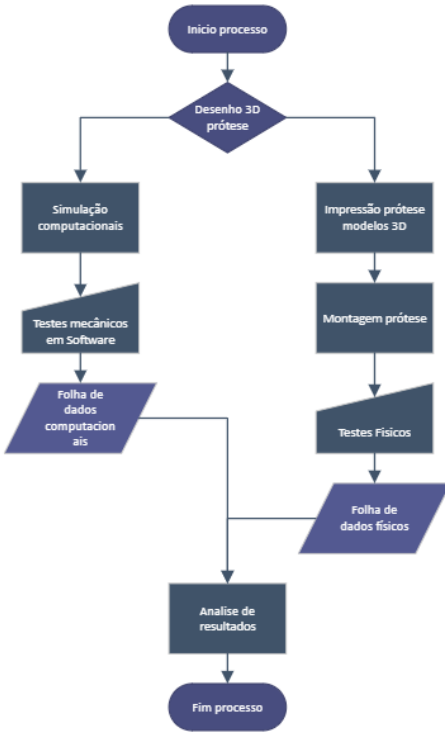

Fig.10. Fluxograma de processo de validação da Próteses
Fonte: Própria

Finalizados os testes em laboratório, a proposta é localizar um possível usuário da prótese para que possa realizar os testes finais de utilização e constatar suas funcionalidades, conforto e adaptação, e caso necessário realizar os devidos ajustes.

V. DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

Com a premissa inicial do projetos sendo o uso do material PLA para a execução da prótese no modelo Cyborg Beast, foram realizadas algumas alterações do protótipo base com o intuito de promover ajustes no desempenho das atividades cotidianas.

Alteração 1: Acoplamento do conector de linhas com o antebraço, visando melhor fixação das linhas e facilitar os ajustes e manutenção.

Alteração 2: Mudança na configuração e quantidade dos pontos de fixação, afim de proporcionar uma maior aderência no coto.

Alteração 3: Modificação do punho e juntas do dedão para a alterar o ângulo de pinça, com intuito de ajustar a pega de objetos.

Alteração 4: Inclusão de textura nas pontas dos dedos para aumentar a aderência entre a prótese e objetos.

A imagem a seguir ilustra a configuração sugerida para impressão grupo anterior para sequência do TCC.

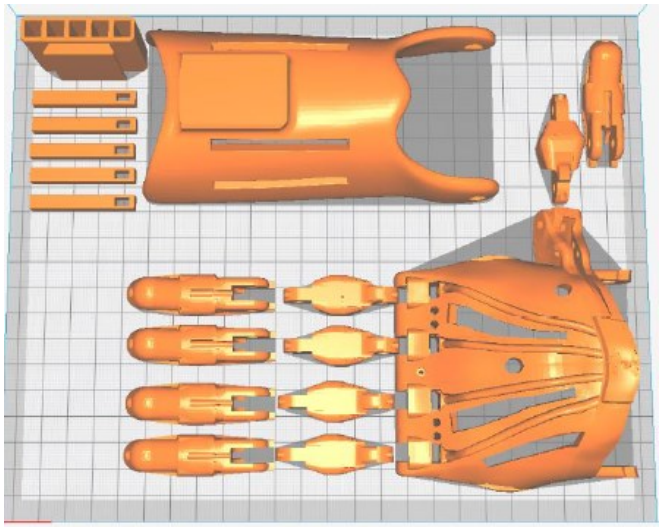

Fig 11. Configuração de impressão para amostragem
Fonte: UNIVERSIDADE ANHEMBI MORUMBI – Escola de Engenharia, Arquitetura e Tecnologia. Disponível em: Prótese de membro superior por manufatura aditiva: um estudo comparativo de materiais poliméricos utilizáveis.[2]

Em seguida poderá ser feito a visualização da nova configuração abordada pelo grupo.

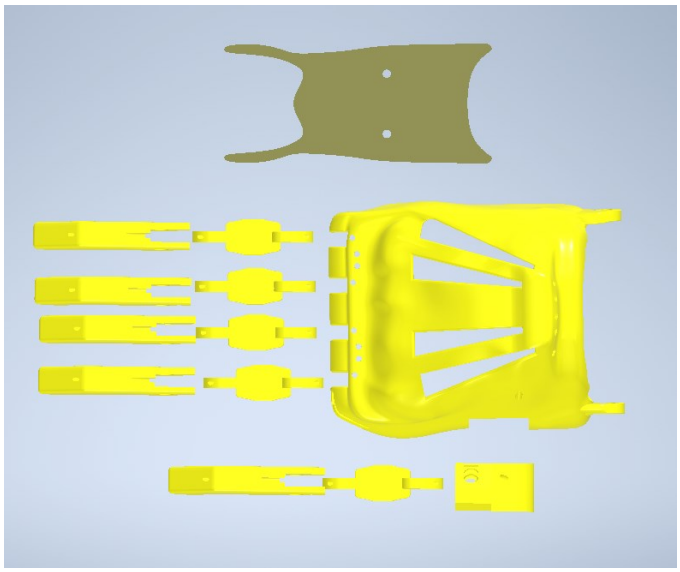

Fig 12. Configuração nova
Fonte: Própria

Após a definição da nova estrutura da prótese, foram feitas simulações da peça com auxílio da ferramenta Inventor, a qual permitiu a análise da comparação dos fatores de segurança em relação a resistência de escoamento do material afim de encontrar uma força máxima de resistência do conjunto inteiro. Na tabela a seguir estão as propriedades utilizadas no software para o PLA:PLA

TABELA III
PROPRIEDADES DO PLA

PROPRIEDADES		Quantidade
Geral	Densidade de massa	1,29 g/cm^3
	Resistência a escoamento	38 MPa
	Resistência máxima á tração	47,2 MPa
Tensão	Módulo de Young	2,91 GPa
	Coeficiente de Poisson	0 s_m
	Módulo cortante	1,455GPa

Fonte: Própria (2021)

Com as definições do matérial configuradas no software Inventor, é possivel realizar as etapas gradativamente para análise de tensões. As forças posicionadas nos pontos de pega da prótese que estão localizadas nas partes inferiores dos dedos, afim de obter informações da capacidade da prótese de vencer uma carga proporcionalmente distribuída nas superfícies de contato com um objeto qualquer. Como mostra ilustração 13 a seguir:

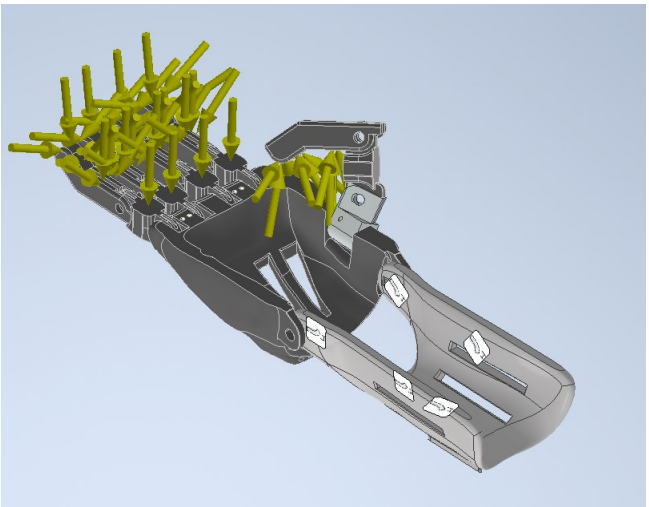

Fig 13. Pontos de contato com objeto
Fonte: Própria

Para a realização dos ensaios de tensão por software foi considerado pontos de pressão em todas as articulações móveis da prótese além da identificação de todos os pontos de contato onde poderia gerar atritos na prótese e os pontos de fixação do coto ao protótipo. A figura 10 a seguir ilustra o mapa com todos os locais de força, pressão e fixação do protótipo:

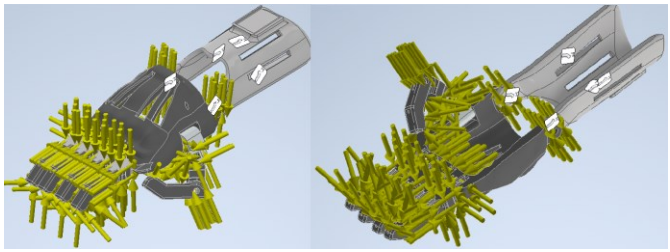

Fig 14. Pontos de força, pressão e fixação.
Fonte: Própria

Após a definição e configuração do protótipo no software, se iniciou o procedimento de simulação que foi realizada até o momento onde encontrou-se um limtite da força que não ultrapassesasse a resistência de escoamento do material. A seguir as imagens mostram a tensão máxima no qual a prótese resistiu e o deslocamento que aconteceu sem que excedesse o seu fator de escoamento.

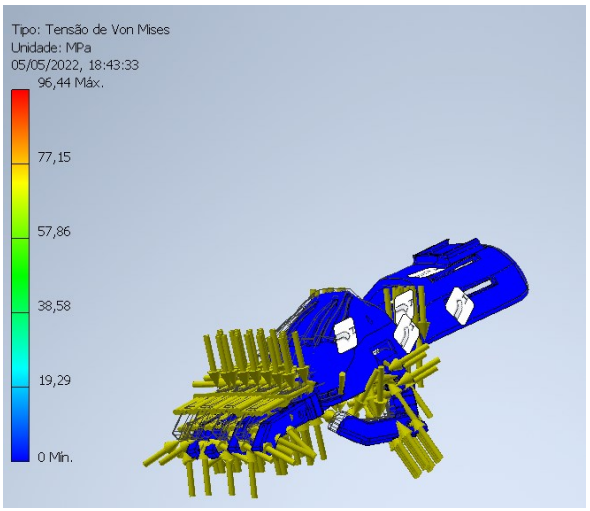

Fig. 15. Tensão máxima
Fonte: Própria

A ilustração a seguir representa o deslocamento sofrido na região mais avermelhada do protótipo chegando a 3,274 mm da posição inicial considerando que a prótese está em movimento de pegar um objeto vencendo uma força peso de 3 quilos.

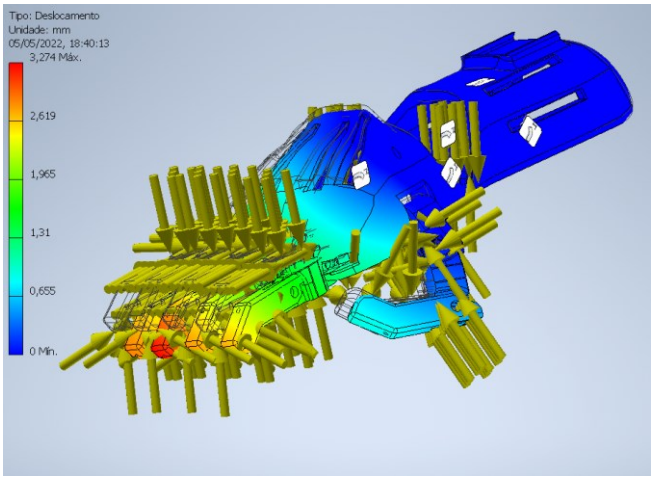

Fig. 16. Deformação máxima
Fonte: Própria

De acordo com os resultados obtidos nas simulações, foi possível obter a informação que se aplicada uma força de 3 quilos, a prótese seria capaz de suportar sem que houvesse a geração de danos destrutivos as juntas e articulações da mesma, dado que será usado nas validações físicas do trabalho afim de compor a biblioteca de testes não destrutivos que envolvem as atividades cotidianas de uma pessoa.

Afim de obter esse resultado empiracamente, a prótese física foi exposta a esforços de objetos que são utilizados em atividades cotidianas a tabela IV a seguir mostra a lista de objetos com informações dos pesos e dimensões de cada item.

TABELA IV
OBJETOS PARA TESTE

Item	Nª	Peso(g)	Altura(mm)	Largura(mm)	Validação
Pote de remédio	1	62	120	65	Aprovado
Desodorante	2	78	130	50	Reprovado
Transformador	3	234	80	65	Aprovado
Caixa genérica	4	251	150	70	Aprovado
Vaso	5	155	160	120	Aprovado
Coqueteleira	6	149	210	100	Aprovado
Carretel	7	268	150	90	Aprovado
Nescau	8	333	155	90	Aprovado
Mamão	9	696	180	100	Aprovado
Copo de vidro	10	219	130	65	Aprovado
Rede de aquário	11	16	340	10	Aprovado
Sacola de mercado	-	410	-	-	Aprovado

Fonte: Própria (2022)

Analisando a tabela acima, nota-se que o peso máximo carregado foi de 696 gramas. Entretanto, o peso do objeto não é a variável mais importante, uma vez que o terceiro item mais leve da lista, 78 gramas, foi reprovado.

Dos 12 itens testados, 11 foram feitos com a prótese na posição horizontal. A pegada se torna mais flexível, pois existem vários jeitos de posicionar os dedos, assim, aumentando as chances de aprovação no teste.

A sacola de mercado, foi o único que teve a execução em posição vertical. Esta por sua vez, foi feita com os dedos fechados no máximo do movimento. Uma sacola vazia foi colocada na mão, e lentamente, iniciou o processo de adição de peso, sendo feito com água, para maior precisão e evolução gradativa. Neste caso, o maior limitador é a tensão dos elásticos que fazem o movimento de pega, uma vez que quanto mais tensionado, maior a carga suportada, porém, é necessário manter uma tensão saudável.

Foram testados diversos objetos, com tamanhos, formas e pesos diferentes. Depois de uma análise detalhada, estudando as propriedades da prótese e dos objetos testados, foi possível concluir que a forma geométrica interfere diretamente na pegada e limitações da mão. Outro fator indispensável, é o atrito que o objeto tem em relação a prótese. A imagem abaixo conta com todos os objetos testados na avaliação da protótipo.

Fig. 17. Objetos testados
Fonte: Própria

O projeto escolhido, conta com pequenos pontinhos na ponta dos dedos, na tentativa de aumentar a aderência. Todavia, o PLA em contato com alguns materiais, tem uma aderência baixa e por falta de pressão na pegada, o objeto acaba escorregando da mão.

Uma melhoria que foi possível verificar para este projeto que escolhemos é a limitação da aderência. Um emborrachamento na ponta dos dedos já seria o suficiente para otimizar o atrito com matérias de baixa aderência com o PLA.

A pegada que a mão tem, sempre dependerá do projeto escolhido, sendo assim, o projeto que foi usado para teste, trouxe limitações para algumas atividades, ressaltando assim, que o design não foi projetado para manuseio de objetos pequenos e delicados, como por exemplo, segurar escova de dente, óculos, caneta, etc.

Quanto aos testes fisicos destrutivos para o ensaio de tração foi utilisado a máquina EMIC dl10000, onde foi fixada a prótese nas suas extremidades afim de identificar o ponto mais fragil da prótese a uma força de tração. A figura18 a seguir representa como a prótese foi posicionada para o teste.

Fig. 18. Ensaio de tração1
Fonte: Própria

Após feita a fixação do corpo de prova, o mesmo foi submetido a uma força de tração crescente até alcançar seu ponto critico, que apresentasse o primeiro sinal de ruptura. Na tabela a seguir, é possível visualizar os resultados obtidos em teste.

TABELA V
RESULTADOS TESTE DE TRAÇÃO

Teste	**Força Maxima** kgf	**Deslocamento** mm
1	20,1	44,88
2	27,7	44,74
Média	23,9	44,81

Fonte: Própria (2022)

Conforme mostra a tabela, foi constatado que nos dois testes a força para que a prótese apresentasse uma falha foram próximos, correspondendo a uma media de 23,9 kgf. Na figura 19 a seguir, o circulo vermelho destaca o resultado onde a prótese apresentou seu primeiro ponto frágil.

Fig. 19. Ensaio de tração1
Fonte: Própria

Conforme a figura 19 representa, é possível verificar que o ponto mais frágil da prótese, com uma força de tração, se encontra nas articulações de fixação entre o punho e o antebraço, resistindo uma força maxima de 234,4 N para apresentar sua primeira fratura.

Já para os testes de compressão, o objetivo principal é entender qual seria a resistência das peças da prótese, caso fosse exposta a algum tipo de impacto ou queda. A tabela a seguir expresa os resultados obtidos em cada uma das peças que compõem o conjunto do protótipo.

TABELA VI
RESULTADOS TESTE DE COMPRESSÃO

Teste	**Força Máxima** N	**Tensão** MPa
Antebraço	6874	0,2701
Falange	4878	12,73
Palma	3437	0,3039

Fonte: Própria (2022)

De acordo com a tabela a cima e possível indentificar as tensões e forças máximas que cada peça da prótese aguentou. O antebraço apresentou uma força máxima (6874N) superior em relação aos outros componentes, por ter uma infraestrutura maior, porém, por sua superficie de contato ser grande, manifestou uma baixa tensão (0,2701MPa) a compressão. Já a falange, demosntrou uma alta tensão (12,73MPa) por ter uma superfície de contato menor e uma força máxima (4878N) mediana em relação aos outros componentes, por ser mais compacta. A palma da mão expressou um resultado oposto a falange, obtendo uma força máxima (3437N) inferior e uma tensão (0,3039) próxima ao antebraço.

VI. CONCLUSÕES

Depois de uma análise das propriedades do protótipo nos teste físicos destrutivos, a prótese garante uma resistência segura para que o usúario possa realizar as atividades em segurar os objetos que foram avaliados e aprovados na análises fisicas não destrutivas.

Já nos testes de qualificação dos objetos foi possível concluir que a forma geométrica interfere diretamente na pegada e limitações da mão, sendo indispensável o atrito que o material do objeto tem em relação a prótese.

O projeto escolhido, conta com textura na ponta dos dedos, na tentativa de aumentar a aderência. No entanto, o PLA em contato com alguns materiais, tem uma aderência baixa e por falta de pressão na pegada, o objeto acaba escorregando da mão, constando que um ponto de limitação da prótese está diretamente relacionado com o material dos tendões utilizados, composto por 60% poliéster e 40% elastano.

Uma melhoria que foi possível verificar para este projeto que escolhemos é a limitação da aderência. Um emborrachamento na ponta dos dedos já seria o suficiente para otimizar o atrito com matérias de baixa aderência com o PLA.

A pegada que a mão tem, sempre dependerá do objeto escolhido, sendo assim, o prototipo que foi usado para teste, trouxe limitações para algumas atividades.

Um fator importante a ser destacado é que o custo de fabricação do protótipo de R$76,64 e relativamente baixo levando em consideração ao tecnologia, material e o acesso ao tipo de equipamento.

VII. Referências

[1] IBGEEDUCA. IBGE - Educa | Jovens. IBGE Educa Jovens. Disponível em: <https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/populacao/20551-pessoas-com-deficiencia.html>. Acesso em: 28 Sep. 2021.

[2] BORGES, DANILO SILVA et al. **Prótese de membro superior por manufatura aditiva: um estudo comparativo de materiais poliméricos utilizáveis.** Orientador: Me. Alexandre Aparecido Neves. 2019. 108 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) - Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2019.

[3] REDACAO. Amputação: o dia antes e depois de amanhã **- HOSPITAIS BRASIL. HOSPITAIS BRASIL**. Disponível em: <https://portalhospitaisbrasil.com.br/amputacao-o-dia-antes-e-depois-de-amanha/>. Acesso em: 28 Sep. 2021.

[4] REDAÇÃO. GUARALDI, Bibiana. Resenha: Print the Legend. 2016. Disponível em: <http://www.comciencia.br>. Acesso em: 13 out. 2021.

[5] REDAÇÃO. Chegou ao Brasil à primeira impressora 3D - Revista lounge*. Revistalounge.com.br. Disponível em: <https://www.revistalounge.com.br/chegou-ao-brasil-a-primeira-impressora-3d/>. Acesso em: 28 Sep. 2021.

[6] THIAGO NEVES PAIVA ; CÁSSIO CIPRIANO NOGUEIRA. ESTUDO **COMPARATIVO DAS PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE IMPRESSÃO 3D NO BRASIL**. Facit Business and Technology Journal, v. 1, n. 24, 2021. Disponível em: <http://revistas.faculdadefacit.edu.br/index.php/JNT/article/view/901/634>. Acesso em: 5 Oct. 2021.

[7] Kunkel M.E, Cano APD, Ganga TAF, Artioli BO, Juvenal EAO. Manufatura Aditiva do Tipo FDM na Engenharia Biomédica. In: Maria Elizete Kunkel. (Org.). Fundamentos e Tendências em Inovação Tecnológica: v.1, 1ed. Seattle, United States: Kindle Direct Publishing, 2020, p. 50-69. Disponivel em: https://www.researchgate.net/publication/350801302_Manufatura_Aditiva_do_Tipo_FDM_na_Engenharia_Biomedica Acesso em 5 Oct 2021

[8] All3DP.com, revista eletrônica de impressão 3D, disponível em: https://all3dp.com/pt/1/programa-impressora-3d-gratuito-fatiamento-modelagem/#apendice-o-fluxo-de-trabalho-da-impressao-3d, Acessado em 05 Oct 2021.

[9] All3DP.com, revista eletrônica de impressão 3D, disponível em: https://all3dp.com/pt/1/programa-impressora-3d-gratuito-fatiamento-modelagem/, Acessado em 05 Oct. 2021.

[10] Cliever Indústria e Comércio de Produtos Tecnológicos SA, Dispnivel em: https://www.cliever.com/p/suporte, acessado em 05 Oct. 2021.

[11] CADimensions, fornecedor de softwares de engenharia, disponível em: https://www.cadimensions.com/blog/whats-new-catalystex/, acessado em 5 Oct. 2021.

[12] MOVTECH, Somos uma empresa pioneira no Brasil, 2018. Disponível em: <http://movtech.com.br/>. Acesso em: 13 out. 2021.

[13] STOKOSA, Jan J. Opções para próteses de membros. Manuais MSD edição para profissionais. Disponível em: <https://www.msdmanuals.com/pt-br/profissional/t%C3%B3picos-especiais/pr%C3%B3teses-de-membros/op%C3%A7%C3%B5es-para-pr%C3%B3teses-de-membros>. Acesso em: 23 Nov. 2021.

[14] O que é FDM? Tecnologia Fused Deposition Modeling para impressão 3D | Stratasys. Stratasys. Disponível em: <https://www.stratasys.com/br/fdm-technology#imageCarousel>. Acesso em: 24 Nov. 2021.

[15] THINGIVERSE.COM. Cyborg Beast by JorgeZuniga. @thingiverse. Disponível em: <https://www.thingiverse.com/thing:261462>. Acesso em: 24 Nov. 2021.

[16] TOP 7 em 3D Aprimoramentos da impressora Creality Ender 3 - impresoras3d.com. impresoras3d.com. Disponível em: <https://www.impresoras3d.com/pt/top-7-em-3d-endireitador-de-creality-Melhorias-na-impressora-3/>. Acesso em: 25 Nov. 2021.

[17] Máquina de ensaio universal emic. Intermetric. Disponível em: <https://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/maquinas-e-equipamentos/intermetric/produtos/acessorios/maquina-de-ensaio-universal-emic->. Acesso em: 25 Nov. 2021.

[18] Série PC EMIC Prensas de Compressão para Laboratório. [s.l.: s.n., s.d.]. Disponível em: <https://www.isorepresentacao.com.br/download/Catalogo-geral-de-prensas-INSTRON.pdf>. Acesso em: 25 Nov. 2021.

[19] Impressora 3D - CL2 Pro - Cliever Tecnologia. Cliever Tecnologia. Disponível em: <https://www.cliever.com/produto/impressora-3d-cl2-pro-243>. Acesso em: 25 Nov. 2021.

[20] Filamentos PLA para Impressora 3D - Linha Completa - FilipeFlop. FilipeFlop. Disponível em: <https://www.filipeflop.com/categoria/impressao-3d/filamentos-pla/>. Acesso em: 25 Nov. 2021.

[21] 3D PRIME - **SOLUÇÕES EM IMPRESSÃO 3D**. Rolo de filamento ABS para imp - 3D Prime - Soluções em impressão 3D. 3D Prime - Soluções em Impressão 3D. Disponível em: <https://www.3dprime.com.br/busca?b=Rolo+de+filamento+ABS+para+imp>. Acesso em: 25 Nov. 2021.

[22] AL4 WEB & DESIGN. Biofabris | PLA: O plástico utilizado para impressões 3D. Biofabris.com.br. Disponível em: <https://biofabris.com.br/pt/pla-o-plastico-utilizado-para-impressoes-3d/>. Acesso em: 25 Nov. 2021.

[23] SANTANA, Leonardo; ALVES, Jorge Lino; SABINO NETTO, Aurélio da Costa; et al. Estudo comparativo entre PETG e PLA para Impressão 3D através de caracterização térmica, química e mecânica. Matéria (Rio de Janeiro), v. 23, n. 4, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/dpWDvBJzSXYtzbKnJdDqHVg/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 30 Jul. 2021.

[24]Black Friday 2021 Mercado Livre | Melhores ofertas. Mercadolivre.com.br. Disponível em: <https://www.mercadolivre.com.br/>. Acesso em: 26 Nov. 2021.

[25] AUGUSTO, Fábio; ED NOGUEIRA NETO; RENATO; *et al*. **Amputação primária no trauma: perfil de um hospital da região centro-oeste do Brasil. Jornal Vascular Brasileiro**, v. 11, n. 4, p. 269–276, 2012. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=245025204004>. Acesso em: 2 maio 2022.

[26] GARLIPPE, Luiz Armando. Estudo epidemiológico dos pacientes com amputação de membros inferiores atendidos no Centro Regional de Reabilitação de Araraquara, Estado de São Paulo, Brasil. 2022. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/17/17139/tde-15082014-115926/pt-br.php>. Acesso em: 2 maio 2022.

[27] CARVALHO, GUSTAVO LONGHI DE. **Proposta de um método de projeto de próteses de membros superiores com a utilização da engenharia e análise do valor**. 2004. 166 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. Acesso em: 2 maio 2022.

[28] 3DFILA, Principais configurações de impressão 3D do fatiador que você precisa conhecer!: Densidade do preenchimento. 2019. Disponível em: <https://3dfila.com.br>. Acesso em: 05 mai. 2022.

[29] 3DLAB. 4 dicas para escolha ideal do material de filamento para impressora 3D, 31 de março de 2017. Disponível em: <https://3dlab.com.br/>. Acesso em: 05 mai. 2022.

[30] file:///C:/Users/Gustavo/Downloads/pdfcookie.com_livro-ensaios-dos-materiais-amauri-garcia.pdf

[31] pdfcookie.com_livro-ensaios-dos-materiais-amauri-garcia.pdf

[32] CYBORG BEAST. Cyborg Beast. College of Education, Health, and Human Sciences. Disponível em: <https://www.unomaha.edu/college-of-education-health-and-human-sciences/biomechanics-core-facility/research/cyborg-beast/index.php>. Acesso em: 28 maio 2022.

[33] NUNES, C.; MADUREIRA, I. Desenho Universal para a Aprendizagem: Construindo práticas pedagógicas inclusivas. Da Investigação às Práticas: Estudos de Natureza Educacional, [S. l.], v. 5, n. 2, p. 126–143, 2015. DOI: 10.25757/invep.v5i2.84. Disponível em: https://ojs.eselx.ipl.pt/index.php/invep/article/view/84. Acesso em: 29 mai. 2022.

[35] e-NABLE Brasil – Dando ao mundo uma mãozinha! E-nablebrasil.org. Disponível em: <http://e-nablebrasil.org/wp/>. Acesso em: 1 jun. 2022.