

Universidade Federal de Goiás
Faculdade de Artes Visuais
Taynara Araújo Franco

***DESENVOLVIMENTO DE UM EXOESQUELETO PARA REABILITAÇÃO DE
MEMBROS SUPERIORES COM FOCO EM CRIANÇAS.***

GOIÂNIA
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
FACULDADE DE ARTES VISUAIS

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): Taynara Araújo Franco

Título do trabalho: Desenvolvimento de um exoesqueleto para reabilitação de membros superiores com foco em crianças

2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [] NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Henrique Goncalves, Professor do Magistério Superior**, em 19/12/2025, às 15:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Taynara Araujo Franco, Discente**, em 15/01/2026, às 12:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5858518** e o código CRC **E667BE55**.

Referência: Processo nº 23070.064522/2025-78

SEI nº 5858518

Taynara Araújo Franco

***DESENVOLVIMENTO DE UM EXOESQUELETO PARA REABILITAÇÃO DE
MEMBROS SUPERIORES COM FOCO EM CRIANÇAS.***

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação
em Design de Ambientes da Faculdade de Artes
Visuais da Universidade Federal de Goiás,
como requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Design de Ambientes.
Orientador: Prof. Dr.: Pedro Henrique Gonçalves

GOIÂNIA

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Franco, Taynara Araújo
DESENVOLVIMENTO DE UM EXOESQUELETO PARA REABILITAÇÃO
DE MEMBROS SUPERIORES COM FOCO EM CRIANÇAS. [e-books] / Taynara
Araújo Franco. - 2025.
XXXIX, 39 f.: 2025

Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique Gonçalves
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Goiás, Faculdade de Artes Visuais (FAV), Design de Ambientes, Goiânia, 2025.

1. Exoesqueleto. 2. Membros Superiores. 3. Reabilitação..

I. Gonçalves, Pedro Henrique, orient. II. Título.

CDU 658.5



UFG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
FACULDADE DE ARTES VISUAIS

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos onze dias do mês de dezembro do ano de 2025 iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “Desenvolvimento de um exoesqueleto para reabilitação de membros superiores com foco em crianças”, de autoria de Taynara Araújo Franco, do curso de Design de Ambientes, da Faculdade de Artes Visuais da UFG. Os trabalhos foram instalados pelo prof. Dr. Pedro Henrique Gonçalves - orientador (FAV/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Arquiteto Ms. Geovane Umbelino Marques (IPElab/UFG) e Fisioterapeuta Dr. Ana Luiza Righetto Greco - membra externa. Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição da estudante. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de 9.7, tendo sido o TCC considerado aprovado.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Henrique Gonçalves, Professor do Magistério Superior**, em 19/12/2025, às 15:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ana Luiza Righetto Greco, Usuário Externo**, em 29/12/2025, às 14:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Geovane Umbelino Marques, Usuário Externo**, em 29/12/2025, às 14:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5858523** e o código CRC **E83134D5**.

Referência: Processo nº 23070.064522/2025-78

SEI nº 5858523

Resumo

Esse projeto apresenta uma proposta de desenvolvimento de um exoesqueleto passivo para a reabilitação de membros superiores voltado para o auxílio de crianças, na faixa etária de 2 a 6 anos, com baixa mobilidade e amplitude de movimento. A metodologia utilizada foi a junção do Design Thinking, tendo como objetivo a resolução de problemas com foco nos usuários; e o ciclo de PDCA (Planejar, Fazer, Verificar e Agir), que proporciona organização e avaliação e ajustes contínuos do processo .

Com o auxílio da modelagem tridimensional, realizada no software Fusion 360, permitindo a elaboração de oito peças para a construção da estrutura do protótipo utilizando impressão 3D por meio de filamento de ABS. Para a execução desse projeto foram realizadas pesquisas sobre análise dos membros superiores, as articulações principais e os planos de ações. Durante o desenvolvimento, foram realizadas pesquisas sobre anatomia dos membros superiores e biomecânica, com interesse nas articulações principais - ombro, cotovelo e punho - nos planos de ações e eixo para a compreensão dos movimentos.

Palavras chaves: *Exoesqueleto, membros superiores, reabilitação.*

Abstract

This project proposes the development of a passive exoskeleton for upper limb rehabilitation, designed to assist children aged 2 to 6 with low mobility and limited range of motion. The methodology employed combines Design Thinking, aimed at human-centered problem-solving, with the PDCA cycle (Plan-Do-Check-Act), which ensures organized execution and continuous process evaluation and adjustment.

With the aid of 3D modeling in Fusion 360 software, eight specific parts were designed to construct the prototype's structure via 3D printing using ABS filament. Throughout the development phase, extensive research was conducted on upper limb anatomy and biomechanics, focusing on the primary joints shoulder, elbow, and wrist as well as the planes of motion and axes to fully understand body movements.

Keywords: *Exoskeleton, upper limbs, rehabilitation.*

SUMÁRIO

Introdução.....	6
1.1 Problemática.....	7
1.2 Objetivos.....	7
1.2.1 Objetivo Geral.....	8
1.2.2 Objetivo Específico.....	8
1.3 Justificativa.....	8
1.4 Metodologia.....	10
Referencial Teórico.....	10
2.1 Análise dos Membros Superiores.....	11
2.1.1 Articulação do Ombro.....	13
2.1.2 Articulação de Cotovelo.....	14
2.1.3 Articulação do Punho.....	15
2.1.4 Condições Neuromusculares.....	15
2.2 Tecnologias Assistivas por meio de manufatura aditiva.....	16
2.2.1 Órteses.....	17
2.2.2 Exoesqueleto.....	18
Desenvolvimento do Projeto.....	19
3.1 Processos e Métodos.....	20
3.2 Planejamento.....	20
3.3 Execução.....	22
3.3.1 - Esboços.....	22
3.3.2 - Modelagem Tridimensional.....	22
3.3.2.1 Encaixes.....	23
3.3.3 Prototipagem.....	25
3.3.3.1 Processo de impressão.....	27
3.3.4 Ajustes.....	29
3.5 Verificação.....	32
3.5.1 Simulação de desempenho.....	33
Considerações Finais.....	35
Referências Bibliográficas.....	37

Introdução

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (2011), mais de um bilhão de pessoas no mundo vivem com alguma deficiência, destas, aproximadamente 200 milhões apresentaram dificuldades no funcionamento dos membros superiores afetando diretamente a autonomia desses indivíduos. Por conta disso, crianças com doenças neuromusculares enfrentam dificuldades para realizar movimentos simples dos membros superiores e inferiores, como alcançar objetos ou sustentar o braço em determinada posição. Essas limitações impactam diretamente a autonomia funcional e dificultam a realização de tarefas básicas do cotidiano, diante disso, dispositivos assistivos têm se mostrado úteis para a reabilitação de movimentos e mobilidade, proporcionando mais independência aos usuários (Alves, et al. 2020).

O desenvolvimento de exoesqueletos passivos se destacam pela estrutura e simulação de movimentos dos membros superiores ou inferiores. Diferente dos modelos ativos ou semi ativos, que utilizam motores ou sistemas eletrônicos, os exoesqueletos passivos funcionam com base em um sistema biomecânico, utilizando da força do usuário e molas ou elásticos para sistemas de alívio de carga para facilitar o movimento. Segundo Diniz (2010), a utilização de dispositivos assistivos favorecem o movimento contínuo e podem contribuir para retardar a perda de funcionalidade em pacientes com doenças neuromusculares.

Por meio da manufatura aditiva foi possível o desenvolvimento e a produção desse projeto, composto por um exoesqueleto passivo para membros superiores, utilizando a modelagem tridimensional e impressão 3D das peças do protótipo inicial. Este projeto foi modelado através do software Fusion 360, da Autodesk, para impressão utilizou-se filamento de ABS branco, material conhecido pela sua boa estabilidade dimensional e resistência mecânica. Com isso, o uso da impressão 3D, com o objetivo de produzir dispositivos assistivos, se torna uma fonte de diversos benefícios aos usuários, proporcionando dispositivos com maior resistência, acabamento e ajustes de acordo com a necessidade do indivíduo, melhorando a autonomia, independência e o bem estar dos usuários (Silva et al. 2020) .

Neste contexto, o atual trabalho propõe o desenvolvimento de um exoesqueleto passivo para membros superiores com foco em crianças. Com o objetivo em auxiliar a reabilitação de mobilidade e amplitude dos membros

superiores.

1.1 Problemática

A coordenação motora é uma ação fundamental para o desenvolvimento de diversas habilidades motoras como a execução de atividades diárias, sendo a capacidade de realizar movimentos articulados e de forma complexa e exata, em diferentes situações (Grego; Silvia, 2013), fazendo interação entre os sistema muscular, esquelético, nervoso e sensorial. As habilidades motoras são divididas em dois grupos de desenvolvimento, fina e grosso. A coordenação motora fina é um grupo de movimentos precisos dos músculos para a realização de atividades diárias, como mover ou pegar objetos pequenos, já a coordenação motora grossa está relacionada a movimentos de maior amplitude e força, como andar e pular.

As doenças neuromusculares podem comprometer o sistema nervoso periférico onde fica conectando a medula espinhal ao restante do corpo, sendo responsável por transportar informações de movimento, podendo ter origem genética ou adquirida, classificada de acordo com a localização da lesão (Diniz, et al. 2010). Em média, aproximadamente, cerca de um a cada 895 pessoas apresentam uma condição neuromuscular hereditária (Müller et al., 2020), e muitas são afetadas diretamente pela capacidade de movimentar membros superiores e inferiores, interferindo na autonomia, independência e bem estar desses indivíduos. A falta de movimentos pode ser causada por diversos fatores neuromusculares, como a Atrofia Muscular (AME), Distrofia Muscular Duchenne (DMD), entre outras condições. Considerando os recursos utilizados para melhoria dessas condições, como o auxílio de dispositivos assistivos para o processo de reabilitação ou a aplicação dessa tecnologia para contribuir com o dia a dia dos usuários.

1.2 Objetivos

Este trabalho visa o desenvolvimento de um protótipo de exoesqueleto para membros superiores com foco em crianças com condições neuromusculares. Os objetivos são divididos em Geral e Específicos, apresentados a seguir.

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho terá como objetivo o desenvolvimento de protótipo de exoesqueleto passivo para crianças com doenças neuromusculares na faixa etária de 2 e 6 anos, utilizando manufatura aditiva para concepção, modelagem e fabricação do dispositivo.

1.2.2 Objetivo Específico

- Desenvolver um exoesqueleto para auxiliar na mobilidade de crianças, visando a melhoria de sua qualidade de vida e autonomia;
- Desenvolver modelos digitais tridimensionais de um exoesqueleto passivo utilizando softwares de modelagem;
- Produzir um protótipo de exoesqueleto por meio de impressão 3D para menores gastos de tempo e processos.
- Desenvolver um protótipo de exoesqueleto passivo para membros superiores, para crianças com doenças neuromusculares na faixa etária de 2 e 6 anos, utilizando manufatura aditiva para concepção, modelagem e fabricação do dispositivo.

1.3 Justificativa

O desenvolvimento de um exoesqueleto produzido por meio de prototipagem rápida, traz como possibilidade um método mais acessível de reabilitação, levando em consideração o custo e o tempo de fabricação. Atualmente, existem diferentes modelos de exoesqueletos tanto para a prevenção de lesões quanto para a reabilitação de movimentos nos membros superiores ou inferiores, sendo produzido modelos biomecânicos, ou seja, estrutura é projetada para fornecer suporte mecânico e alinhar as articulações, aliviando a carga sobre os músculos e tendões do paciente através de mecanismos como molas e amortecedores.

No entanto, o movimento e o esforço primário estão sendo gerados pelo próprio corpo do usuário (Jayasinghe, D. P. M. et al., 2024) - esse tipo de modelo pode utilizar vários materiais, como molas, articulações personalizadas, chapas de

metal, sistema de controle, entre outros. Um exemplo muito encontrado é o Wilmington Robotic Exoskeleton (T-WREX), desenvolvido para crianças com dificuldades musculares e com limitações de movimento em membros superiores, oferecendo suporte ao braço, permitindo maior amplitude e funcionalidade em atividades como alimentar-se, brincar ou escrever (RAHMAN et al., 2007). Esse projeto tem como intuito desenvolver de um dispositivo assistivo, fazendo uso de tecnologia assistiva para proporcionar maior bem estar e autonomia aos usuários.

A tecnologia assistiva abrange recursos, equipamentos, dispositivos, metodologias e outros serviços que têm como finalidade oferecer mais sasaki independência e integração social a indivíduos com deficiências, sejam elas intelectuais ou físicas (Sasaki, 2005). Surgindo com o objetivo de ajudar pessoas com deficiência a terem uma vida com maior independência e bem-estar (Corde, 2009), atualmente é muito utilizado o auxílio da modelagem tridimensional e da prototipagem rápida, sendo possível a criação de diversos produtos assistivos, tendo uma fabricação de menor custo, mais rápida, além de gerar menos resíduos, melhorando a qualidade de vida das pessoas com deficiência (Miranda & Zaro, 2009). Dentro das tecnologia assistivas há como objetivo desenvolver soluções acessíveis para pessoas com dificuldades motoras, cognitivas e entre outras condições. É comum encontrar produtos já existentes adaptados que possuem uso recorrente, como engrossadores para colheres. A área de Tecnologias Assistivas (TA) é extensa, partindo da criação e customização de roupas, locomoção, mobilidade, escrita e lazer, fazendo o uso de várias tecnologias durante o processo de criação (Bersch, 2017). A reabilitação dos membros superiores associado ao uso de dispositivos assistivos é fundamental para possibilitar maior fortalecimento muscular, além de independência e melhor qualidade de vida ao usuário. As órteses, exoesqueletos, disponíveis para o auxílio dos membros superiores, fazendo a simulação da junção das articulações, ossos, músculos e tendões, e proporcionando maior estabilidade na execução dos movimentos (Balasubramanian et al., 2020).

1.4 Metodologia

A metodologia utilizada neste trabalho será uma associação entre o *Design Thinking* e o processo proposto por Walter Shewhart, ciclo de PDCA (*Plan* - Planejar, *Do* - Fazer, *Check* - Checar, *Act* - Agir).

De acordo com Razzouk e Shute (2012), o *Design Thinking* é um processo que estimula a criatividade e o pensamento crítico por meio de experimentação e reformulação constante, com base no retorno dos usuários. O processo de metodologia *Design Thinking* divide-se em cinco etapas: Empatia, Definir, Idear, Prototipar, Testar e Implementar, sendo processos com o desenvolvimento com o foco nas necessidades e experiências dos usuários. As etapas se resumem na compreensão do problema, definição de soluções e formação de alternativas, e finalizando com a produção.

O processo de PDCA (*Plan* - Planejar, *Do* - Fazer, *Check* - Checar, *Act* - Agir) foi elaborado como uma ferramenta de melhoramento contínuo e garantindo que cada fase do seu desenvolvimento fosse planejada, executada e ajustada de acordo com os resultados de cada etapa até atingir o resultado desejado. Esse processo está fundamentado em um ciclo contínuo de atividades planejadas e melhoramento de acordo com os resultados. De acordo com Werkema (1995), o método gerencial de tomada de decisões para garantir o alcance de metas necessárias à sobrevivência de uma organização, ou seja, é um método aplicado para coordenar seus processos e sistemas, assegurando uma melhoria constante em relação às metas estabelecidas na primeira etapa, *Plan* - Planejar.

Com a associação desses métodos foi possível organizar as estruturas de etapas realizadas neste trabalho. Durante o início do projeto, foram estabelecidas etapas de desenvolvimento do projeto, organizado por processos de análises, produção e ajustes, seguindo os ciclos de elaboração das metodologias, *Design Thinking* e PDCA.

Referencial Teórico

Essa pesquisa foi desenvolvida para a contribuição deste projeto, as quais abrange estudos sobre biomecânica, órteses, dispositivos assistivo desenvolvidos por meio de impressão 3D, exoesqueletos e suas inovações.

2.1 Análise dos Membros Superiores

A cinesiologia é o movimento do corpo humano e animal, é um ramo importante pelo fato de conhecer os efeitos e as mudanças desencadeadas pelo movimento, além da análise de força e componentes do movimento do corpo humano, sendo assim a cinesiologia se refere ao estudo científico do movimento humano de modo abrangente para descrever as formas da mecânica do movimento, fisiologia, entre outros pontos.

Dentro dos estudos cinesiológicos, o corpo humano é dividido em séries de acordo com a posição anatômica. Essa posição se refere ao estudo do movimento sendo dividido em três planos anatômicos: frontal, sagital e transversal. No caso, um plano determina a direção e o eixo espacial na qual o movimento do corpo humano acontece. Os planos de ação são linhas de referência ao longo do corpo que se divide como é demonstrado na figura 1.

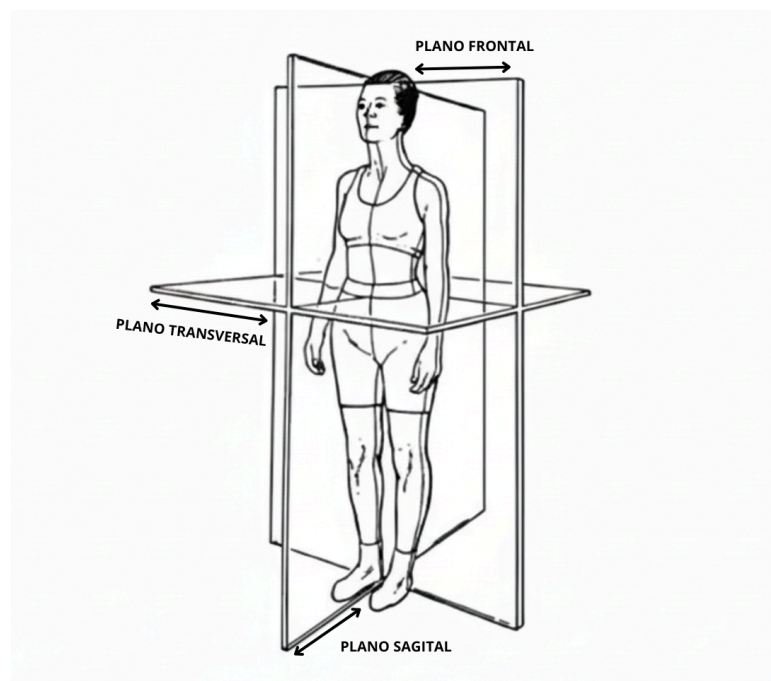


Figura 1: Planos do corpo humano. **Fonte:** Adaptado de Rodrigues e Santos (2018).

- No plano frontal divide o corpo humano da parte da frente e costas, ocorrem os movimentos: abdução e adução, flexão lateral, desvio ulnar e radial, eversão e inversão.

- No plano sagital passa através do corpo, dividindo da direita para a esquerda. Acontecem os movimentos: flexão, extensão, dorsiflexão e flexão plantar.
- No plano transversal ocorre da horizontal e divide o corpo em parte superior e inferior. Acontecem os movimentos: rotação interna e externa.

Segundo a figura 2, os eixos são os pontos que atravessam o centro de uma articulação. O eixo sagital é um ponto que a articulação se move de frente para trás; o eixo frontal percorre de lado a lado, e o eixo vertical se move da parte superior à inferior.

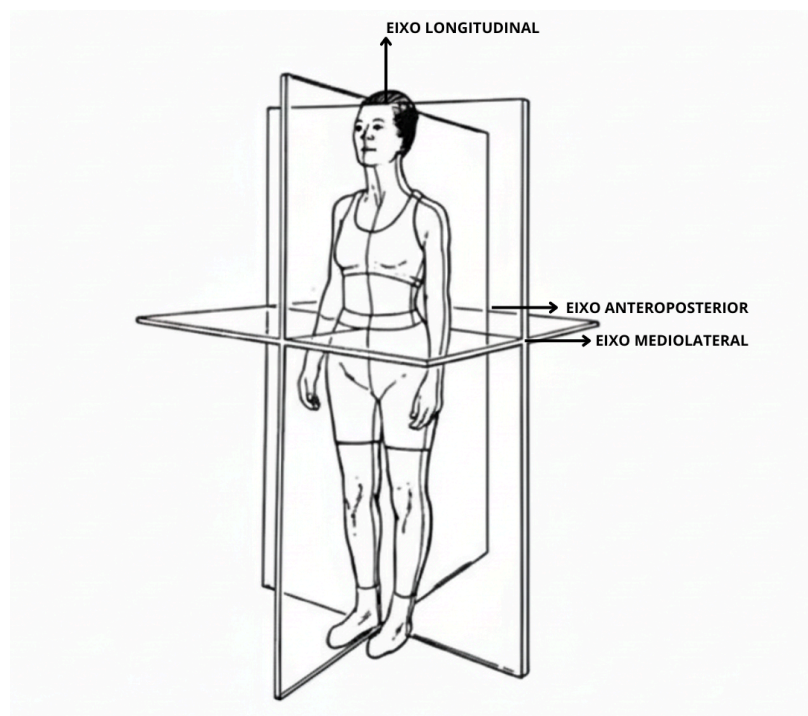


Figura 2: Eixos do corpo humano. **Fonte:** Adaptado de Rodrigues e Santos (2018).

Os movimentos articulares ocorrem em torno de um eixo que se encontra perpendicular a um dos três planos de ação, ou seja, sempre ocorre no mesmo plano em torno do mesmo eixo. As articulações podem se mover em direções diferentes, principalmente na articulação sinovial, ou seja, sendo uma articulação móvel possuindo uma grande mobilidade e uma cápsula articular que contém líquido sinovial. Nos tópicos seguintes será descrito alguns movimentos articulares, na figura 2 é exemplificado os movimentos realizados pelos membros superiores.

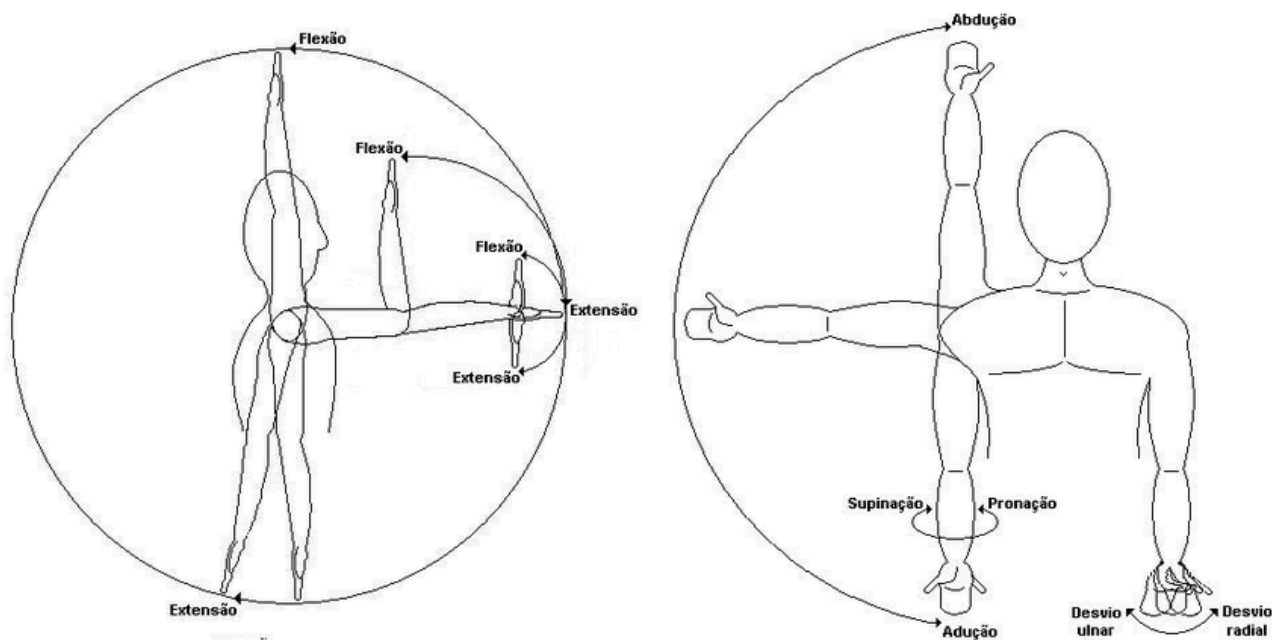


Figura 3 – Representação dos movimentos dos membros superiores. Fonte: COELHO, et al, 2008.

- Flexão: é um movimento de dobra de um osso sobre o outro causando uma diminuição de ângulo entre dois ossos de uma articulação, ocorrendo geralmente no plano sagital. Extensão: é um movimento que aumenta o ângulo da articulação, endireitando um osso sobre o outro.
- Abdução: é um movimento que um membro ou parte do corpo da linha média, ou seja, do eixo central do corpo humano. Adução: aproxima um membro ou em relação a linha central.
- Rotação: movimento de um membro do corpo em torno do seu eixo longitudinal, em torno do seu próprio eixo.
- Pronação: movimento ao longo do plano paralelo a base e longe da linha média. Supinação: movimento responsável pela rotação do antebraço girando sobre a articulação ulna.

2.1.1 Articulação do Ombro

O ombro inclui cinco articulações diferentes - glenoumeral, esternoclavicular, acromioclavicular, coracoclavicular e escapulotorácica, que trabalham juntas para permitir movimentos amplos dos membros superiores. Essas articulações são estabilizadas por ligamentos, cápsulas e músculos.

A glenoumeral é a principal articulação do ombro, localizada entre a cabeça do úmero e a cavidade glenoidal da escápula, sendo uma articulação esferoide, considerada principal articulação do ombro. A articulação esternoclavicular se localiza próxima à clavícula, proporcionando o eixo principal de rotação para os movimentos da clavícula e da escápula, permitindo movimentos como flexão, extensão, abdução e rotação. O movimento completo do ombro depende da coordenação com a escápula e a clavícula, em um ritmo chamado escapulotorácico. A articulação acromioclavicular é classificada como uma articulação sinovial irregular, permitindo movimentos limitados nos três planos de ação.

O movimento da articulação do ombro é coordenada entre o úmero, escápula e a clavícula - é comum que os movimentos do braço envolvam simultaneamente todas as articulações do ombro. Esse conjunto de movimentos é descrito como ritmo de escapuloumeral, permitindo uma amplitude de movimentos maior do que a escápula estivesse fixa. Quando os braços sustentam cargas, o ritmo escapuloumeral é alterado, sendo assim, os músculos de estabilização da escápula reduzem o movimento, auxiliando em uma base sólida para a atuação dos membros superiores. Essa estabilização melhora a eficiência e a segurança dos movimentos, sendo mais evidente em atividades que exigem força. Por exemplo, a movimentação da escápula apresenta diferenças entre faixas etárias: crianças tendem a usar mais a articulação escapulotorácica na elevação do braço.

Os principais movimentos exercidos pela articulações do ombros, são a flexão, extensão, abdução, adução e rotação medial e lateral.

2.1.2 Articulação de Cotovelo

A articulação do cotovelo é normalmente comparada a uma dobradiça, sendo classificada como uma articulação trocoginglima englobando três articulações: umeroulnar, umerorradial e radioulnar proximal. Essas articulações estão contidas na cápsula articular que é reforçada por ligamentos ulnar e radial, essa cápsula é responsável por contribuir com a estabilidade do cotovelo.

A articulação umeroulnar é do tipo dobradiça e ocorre entre a tróclea do úmero e a incisura troclear da ulna. Permitindo os movimentos de flexão e extensão do cotovelo, a articulação umerorradial encontra-se na lateral da umeroulnar e é formada pelo úmero e a cabeça do rádio. Embora seja classificada como uma

articulação plana, ela funciona de forma semelhante a uma dobradiça por causa da articulação umeral. Já a articulação radial é formada entre a cabeça do rádio e a incisura radial da ulna, com o auxílio do ligamento anular. Essa articulação permite os movimentos de pronação e supinação do antebraço.

Os principais movimentos exercidos pela articulações do ombros, são a flexão, extensão, pronação e supinação.

2.1.3 Articulação do Punho

A articulação do punho é composta pelo radiocarpal e intercarpias. A maioria dos movimentos ocorrem na articulação radiocarpal, sendo uma articulação elipsóide separada da fileira proximal de carpais por um disco articular fibrocartilágíneo, permitindo movimentos no plano sagital - flexão, extensão, hiperextensão. As articulações intercárpicas são de deslizamento que contribuem com o movimento do punho, divididas em três categorias.

O punho realiza movimentos no plano sagital, frontal e rotacional, a articulação radiocárpica permite todos os movimentos, exceto a rotação em torno do seu eixo. No plano frontal inclui a abdução e adução, no plano sagital o punho faz os movimentos de flexão e extensão.

2.1.4 Condições Neuromusculares

Doenças neuromusculares são condições que atingem os nervos que controlam os músculos do corpo humano, causando fraqueza, atrofia, espasmos ou redução da amplitude e mobilidade dos movimentos. Segundo Reed (2002), nas crianças, a maior parte destas afecções é causada por uma denominação genérica que se agrupam de diferentes formas, acometendo a parte primária da unidade motora - são condições mais raras para adquirir em adultos.

Em relação ao descrito anteriormente, as doenças neuromusculares acometem a área motora. Dessa forma, estudos destacam se que o predomínio proximal da fraqueza muscular é força distal sugere envolvimento no nervo (Diniz, 2010). As DNMS são classificadas na categoria de doenças genéticas, um das condições mais comuns é a atrofia muscular espinhal (AME), por ser uma doença

neurodegenerativa progressiva, possui um tratamento incerto, contudo requer diversos cuidados que podem auxiliar no progresso ou estacionar a doenças (Baioni, 2010). A distrofia muscular é um grupo de doenças genéticas que causam fraquezas progressivas e perda de massa muscular.

Para essas condições os meios de reabilitação mais utilizados são: fisioterapia motora, que busca melhorar, principalmente, a força muscular; fisioterapia respiratória, que auxilia na prevenção de complicações pulmonares; terapia ocupacional: auxilia na reabilitação funcional com foco em atividades diárias, como alimentação, higiene pessoal, lazer, entre outras atividades.

2.2 Tecnologias Assistivas por meio de manufatura aditiva

A prototipagem rápida, ou manufatura aditiva, surgiu na década de 80, onde essa tecnologia foi muito utilizada por ser um meio de produção rápido e eficiente, podendo utilizar diversos termos, como impressão 3D, fabricação aditiva, manufatura aditiva ou prototipagem rápida. Além disso, essa tecnologia traz maior eficiência para a criação e auxílio na área da saúde, mas especificamente, na tecnologia assistiva. De acordo com o Censo 2010 do IBGE, no Brasil há mais de 45 milhões de cidadãos com alguma deficiência, que necessitam de algum auxílio da tecnologia assistiva, com isso uma das alternativas que mais eficiente seria a impressão 3D possibilitando maior personalização do e variações de dispositivos assistivos. A produção de produtos que atendam as necessidade na área de alimentação, higiene, mobilidade, entre outras condições, seriam de um custo alto, além de complexas demandando maior tempo (Silva, et al.; 2020).

O termo “Tecnologia Assistiva” surgiu também na década de 80, nos Estados Unidos, com o objetivo de promover a inclusão e acessibilidade para pessoas com deficiência, em um contexto de leis que regulamentavam os direitos dos cidadãos com alguma necessidade. (Bersch, 2008). Esse conceito está conectado à inovação e ao desenvolvimento tecnológico, pois os produtos desenvolvidos buscam proporcionar aos usuários maior autonomia e bem-estar (Cook & Polgar, 2015). A tecnologia assistiva abrange recursos, equipamentos, dispositivos, metodologias e outros serviços que têm como finalidade oferecer mais independência e integração

social a indivíduos com deficiências, sejam elas intelectuais ou físicas (Sasaki, 2005).

A tecnologia assistiva (TA) tem como objetivo solucionar dificuldades para pessoas com dificuldades motoras, cognitivas, entre outras condições trazendo maior autonomia, qualidade de vida, interação social e bem estar aos usuários. Na maioria é adaptado produtos existentes, e muito utilizados no dia a dia, de acordo com as necessidades apresentadas, sendo um óculos de grau, um suporte para garrafas de água, quanto engrossadores para talheres. A área de TA é muito ampla, indo da criação de roupas, alimentação, locomoção, escrita e lazer e podendo fazer uso de diversas tecnologias e processos de criações.

2.2.1 Órteses

A órtese é classificada como um dispositivo de correção ou complementação de algum membro do corpo. É utilizada em conjunto durante o processo de reabilitação favorecendo o tratamento. As órteses aplicadas externamente ao segmento do corpo humano, com a finalidade de proporcionar a melhora funcional por causa da disfunção ou a necessidade de um suporte, que auxilie na recuperação mais estável e eficiente (Carvalho, 2005).

As órteses atuam de acordo com o movimento das articulações facilitando no crescimento e reabilitação dos membros superiores. Os objetivos específicos deste dispositivo são ampliar a capacidade de movimentos da parte afetada, auxiliar na recuperação óssea, auxiliar na resistência muscular, desenvolver ou substituir os movimentos realizados por algum músculo (Ribeiro, 2023). Segundo Heer (2009), órteses, assim como exoesqueletos, são definidos como dispositivos mecânicos essencialmente antropomórficos, vestidos por um usuário ao redor do seu corpo e segue os seus movimentos.

2.2.2 Exoesqueleto

O exoesqueleto possui peças que simulam os movimentos de determinada área do corpo humano, tornando-se vestível externamente ao corpo atuando

paralelamente segmento, com os objetivos de estender, complementar, restaurar ou melhorar as funções e capacidades dos usuários (Forner; Pons; Wisser, 2008).

Segundo Dollar e Herr (2007) um dos primeiros trabalhos com exoesqueletos foi realizado por Miomir Vukobratovic em associação com o Instituto *Mihailo Pupin* em Belgrado entre os anos de 1960 e 1970 (Vukobratovic; Hristic; Stojiljkovic, 1974). O trabalho teve início com dispositivos passivos, ou seja, sem a utilização de mecanismos robóticos no processo de produção e execução. Em 1960, com o apoio da Universidade de Cornell, foi projetado e fabricado o primeiro protótipo de um exoesqueleto de corpo inteiro, nomeado como “Hardiman”, atribuído a utilização para arsenais militares como munições de aviação (Ali, 2014). Em 1970, foram produzidos os primeiros exoesqueletos para reabilitação, e anos depois foram desenvolvidos modelos robóticos para membros inferiores, tornando viável a criação de dispositivos para membros superiores (Plentz; Blauth, 2021).

Os exoesqueletos podem ser utilizados em diversas áreas, como por funcionários de indústrias para melhoria do desempenho e alívio das cargas recorrentes; os esportivos com foco na prevenção de lesões; militares para aumentar a força e o desempenho tático; na área médica para a reabilitação de lesões físicas; diários com o foco em melhorar o desempenho de atividades do dia a dia e auxiliar a reabilitação dos músculos com a simulação de movimentos semelhantes aos do corpo humano.

Exoesqueletos com objetivos dentro da área da saúde, visando o melhoramento e condicionamento do paciente com lesões, atrofia, entre outras condições, são divididos em duas classificações de performance de funcionamento do exoesqueleto como o foco na reabilitação, sendo divididos em ativos, passivos e semi ativos. Por exemplo:

O exoesqueleto semi-passivo representa uma categoria que une os dois tópicos, ativo e passivo - esses dispositivos utilizam primariamente mecanismos passivos, como molas ou elásticos para gerar a maior parte da força e reduzir o esforço físico do usuário. O diferencial é o uso de um sistema ativo, sensores ou controle de suporte que são acionados apenas para controlar e modular o ponto de engate do dispositivo (Tech Briefs, 2022).

Os exoesqueletos ativos, também classificados como motorizados, é uma estrutura que constitui de um motor que pode utilizar geradores de força, como

motores elétricos, hidráulicos para fornecer força ao usuário e simulação dos movimentos sem a intervenção direta do indivíduo (Forner; Pons; Wisser, 2008).

Os exoesqueletos passivos não possuem motor e servem para a sustentação e auxílio mecânico de movimentos que utilizam como força inicial o impulso do usuário, utilizando molas, elásticos ou outro meio de força de contrapeso para representar a contração que os músculos fazem quando o movimento está sendo executado. Sendo assim, os dispositivos passivos redistribuem as forças para regiões específicas do corpo humano, além de ter como vantagem o peso, por serem mais leves que um sistema ativo. Existem algumas contribuições da utilização do exoesqueleto, sendo elas:

- A reabilitação de pessoas com deficiência física.
- Aumento das capacidades físicas do usuário.
- Desenvolver uma tarefa específica.
- Acompanhar e auxiliar nos movimentos comandados pelo usuário.

Desenvolvimento do Projeto

Nesse tópico será descrito os processos do desenvolvimento de um protótipo de exoesqueleto para reabilitação de membros superiores com foco em crianças de 2 a 6 anos de idade.

3.1 Processos e Métodos

O dispositivo assistivo foi projetado por meio de modelagem tridimensional, utilizando o software Autodesk Fusion 360, e como é a produção de um protótipo, suas dimensões foram definidas com base em dados de medidas antropométricas foram fornecidos pela Instituição de Defesa ao Consumidor (Idec) disponíveis de forma virtual. Para a execução do projeto, realizou-se uma análise sincrônica a fim de compreender o processo de inovação tecnológica e a aplicabilidade do exoesqueleto no contexto da reabilitação motora infantil. O desenvolvimento do dispositivo foi estruturado em quatro etapas principais, visando à organização metodológica e à sistematização das fases do projeto, conforme apresentado na

Figura 4.

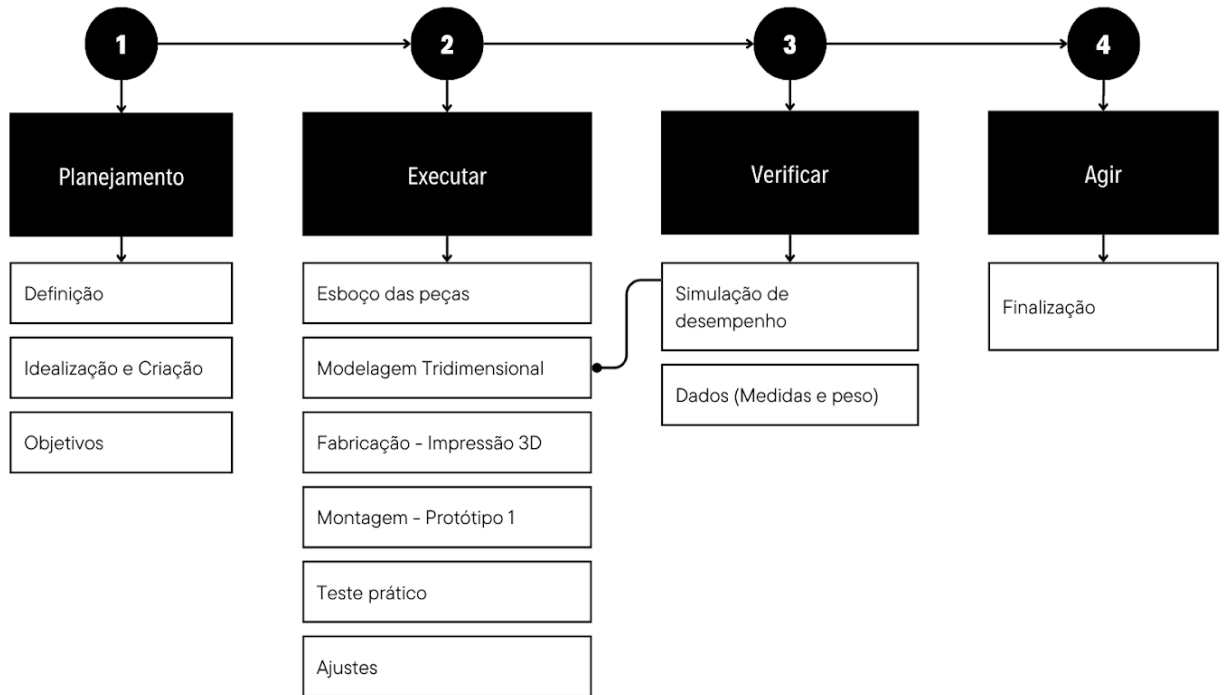


Figura 04 - Fluxograma. Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 Planejamento

Após a definição do projeto, tornou-se necessário a etapa 1, que auxilia na organização da ordem de contextualização e definição do dispositivo assistivo. Nessa primeira etapa foram realizados estudos sobre biomecânica, ergonomia e como existem diversos exoesqueletos no mercado, foi realizada uma análise sincrônica, com o objetivo de estudar o processo de evolução e inovação de um produto em questão. Nesse contexto, observou-se que a maioria dos exoesqueletos disponíveis tem aplicação voltada para o uso industrial, como foco em aliviar o excesso de carga e o esforço físico. Porém, existem exoesqueletos para reabilitação, principalmente de membros inferiores ou partes isoladas do corpo humano, contudo, não é de fácil acesso levando em consideração o custo financeiro principalmente devido ao alto custo, já que muitos exigem produção personalizada, de acordo com as necessidades específicas de cada indivíduo.

O estudo da biomecânica foi fundamental para a compreensão do funcionamento dos membros superiores, especialmente dos movimentos das articulações que vão do ombro ao punho. Com os conhecimentos adquiridos no início do processo, foi

possível o estabelecimento de requisitos e objetivos para a formação do exoesqueleto para membros superiores, enfatizando o conforto e funcionalidade do dispositivo.

Com base na pesquisa de dados antropométricos referentes às medidas dos membros superiores de crianças com idades entre 2 e 6 anos, foram definidos os valores máximos de ajuste apresentados na Tabela 1: 20cm do ombro ao cotovelo, 20cm do cotovelo ao punho e 13cm de circunferência do punho. Ressalta-se que tais medidas podem ser modificadas, uma vez que o protótipo foi desenvolvido em um software de modelagem tridimensional, o que facilita a realização de ajustes. Sendo um dos objetivos o protótipo ser ajustado de acordo com a ideia e o crescimento do usuário. Os valores mínimos de ajuste foram estabelecidos em 10 cm do ombro ao cotovelo, 10 cm do cotovelo ao punho e 12 cm de circunferência do punho.

Segmento do Membro	Medidas (cm)	Valores mínimos de ajuste (cm)	Observações
Ombro ao cotovelo	20	10	Sistema de regulação para acompanhar o crescimento
Cotovelo ao punho	20	10	
Circunferência do punho	13	12	Base de suporte

Tabela 02 - Requisitos do protótipo do exoesqueleto. Fonte: elaborado pelo autor.

3.3 Execução

3.3.1 - Esboços

Na etapa 2, o processo de desenvolvimento avançou para a criação de esboços de cada peça utilizada para todo o braço e a definição das dimensões de cada peça para a compreensão do funcionamento e a necessidade de cada parte. Foram divididas em três partes, a primeira sendo a fixação do exoesqueleto à cadeira indo até a articulação do ombro; a segunda parte é da extensão do ombro ao cotovelo, compreendendo as ações de acordo com os eixos e as conexões de uma articulação a outra sem que houvesse interferência na amplitude dessas ações. A terceira parte,

apresentada na sequência, diz respeito à conexão do cotovelo ao punho. De acordo com a figura 4, foram produzidos quatro esboços, que demonstram algumas peças em sua forma inicial.

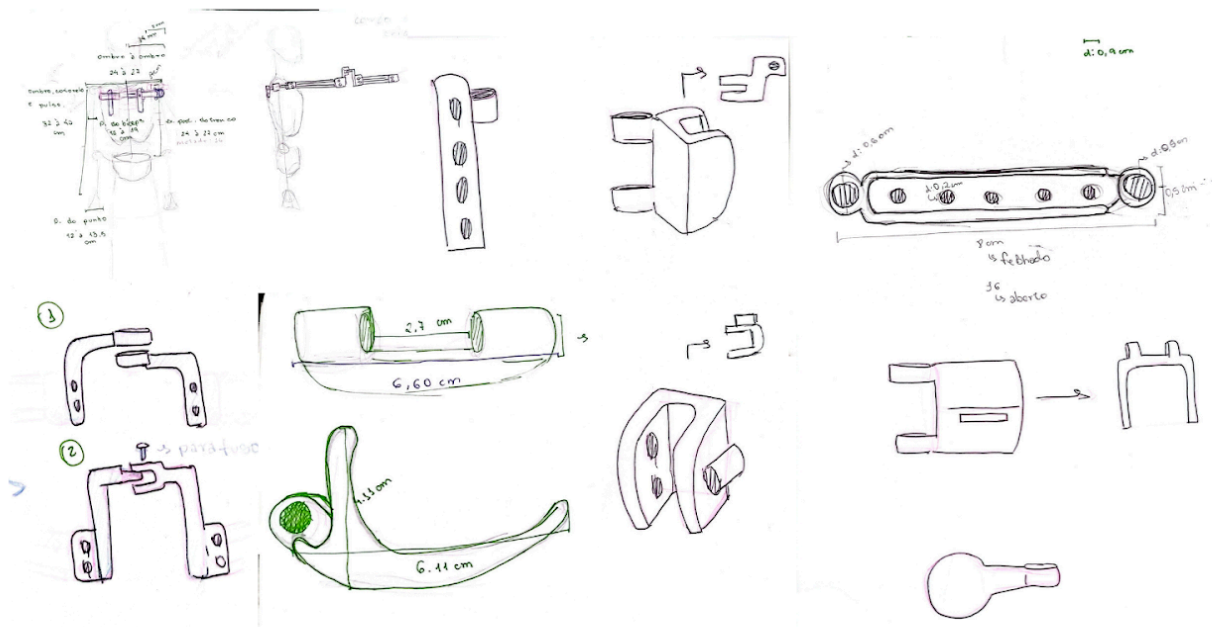


Figura 04 - Esboços das peças: Extensão do braço; Articulação do ombro, cotovelo e punho. Fonte: elaborado pelo autor.

3.3.2 - Modelagem Tridimensional

Por meio da criação dos esboços foram gerados os modelos digitais e foram feitas simulações de encaixe, onde foi necessário fazer alterações nos esboços iniciais, visto que um requisito para as peças seria a durabilidade e resistência do dispositivo. Todas as peças foram modeladas utilizando o software Fusion 360, com foco inicial na criação dos componentes destinados ao protótipo do exoesqueleto. Nessa fase preliminar, foi desenvolvido apenas um dos lados dos membros superiores, com o intuito de construir um protótipo experimental sujeito a sucessivas modificações até a obtenção do resultado final desejado.

3.3.2.1 Encaixes

A partir dos esboços desenvolvidos e ajustados nas etapas anteriores, foi possível gerar os modelos tridimensionais finais de cada componente do exoesqueleto para membros superiores. Dessa forma, os modelos tridimensionais

do protótipo foram renderizados para obter melhor visualização das peças, apresentado na Figura 5.

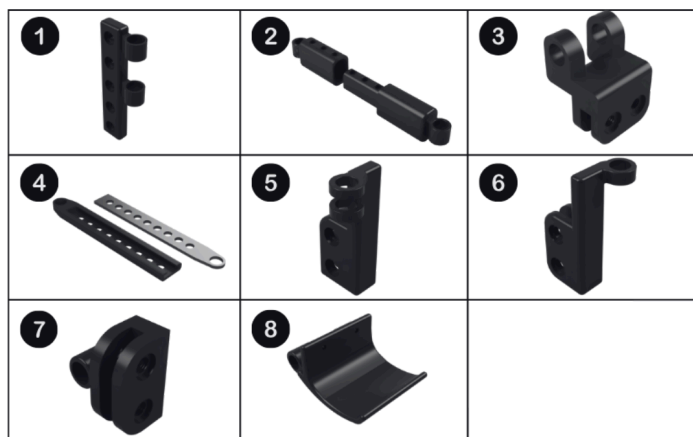


Figura 5 - Peças renderizadas. Fonte: elaborada pelo autor.

As peças se conectam por meio de pinos impressos em 3D e por parafusos. A peça 1 foi projetada para ser fixada no encosto de uma cadeira de rodas ou de alimentação, por meio de parafusos. Possui duas aberturas semelhantes a uma dobradiça, com a finalidade de simular e permitir a continuidade do movimento entre as escápulas e a articulação do ombro. A peça 2 teria como função o comprimento do encosto da cadeira até a articulação do ombro.

A peça 3 compõe, junto com outras duas peças, o conjunto responsável por simular os movimentos de adução e abdução horizontal do ombro. As peças 4 têm a função de conectar uma articulação à outra, possibilitando movimentos como flexão e extensão do braço. As peças 5 e 6, quando juntas, representam a articulação do cotovelo, sendo responsáveis por simular os movimentos de adução, abdução, supinação e pronação do antebraço. As peças 7 e 8 foram desenvolvidas como suporte do peso do braço, contribuindo para a estabilidade do membro. Para melhor fixação, será utilizado velcro, permitindo o ajuste de acordo com o punho do usuário.

Foram elaborados conjuntos de conexões entre as peças: os conjuntos 1, 2 e 3; 5 e 6; e 7 e 8 são interligados por pinos impressos em 3D, permitindo articulação e fácil montagem. Já as ligações entre as peças 3, 4 e 5; e entre 6 e 7 utilizam parafusos, devido à necessidade de maior resistência mecânica nessas junções, pois envolvem peças que sustentam a movimentação entre diferentes articulações. A peça 4 é dividida em duas partes, pois para manter a objetivo de regulação,

resistência e durabilidade seria necessário que as peças fossem divididas. Na tabela 5 é apresentado um esquema mais objetivo do protótipo e suas conexões.

Peças	Funções	Movimentos	Conexões
1°	Fixação no encosto da cadeira.	—	Parafusos
2°	Extensão até a articulação do ombro.	—	Parafusos
3°	Articulação do ombro.	Adução e abdução horizontal	Pino (Impresso em 3D)
4°	Conexão entre articulações - Ombro, Cotovelo e Punho.	Flexão e extensão do braço	Parafusos
5°	Articulação do cotovelo.	Adução, abdução, supinação, pronação	Pino (Impresso em 3D)
6°	Articulação do cotovelo.		
7°	Suporte do antebraço	Estabilizar	Pino (Impresso em 3D)
8°	Suporte para o punho.		

Tabela 05 - Esquematisação das conexões das peças. Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 6 apresenta uma simulação do exoesqueleto montado utilizando os modelos tridimensionais das peças.

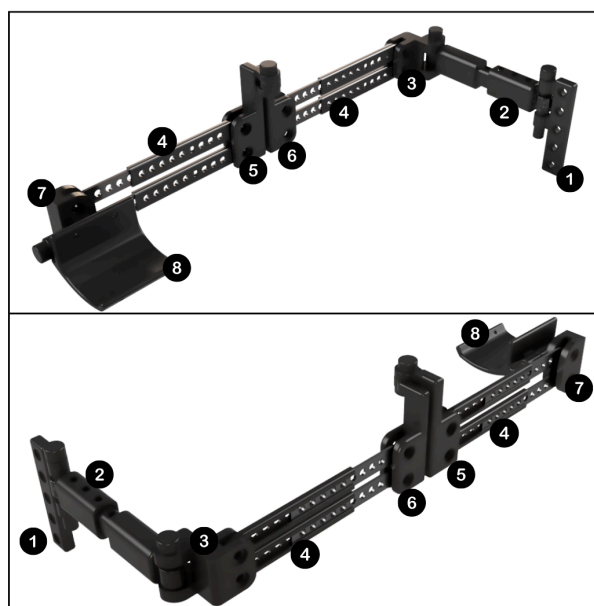


Figura 06 - Modelagem tridimensional do protótipo do exoesqueleto. Fonte: elaborado pelo autor.

Concluído o processo de modelagem digital, os arquivos foram exportados no formato STL, adequado para manufatura aditiva. A impressão 3D foi realizada utilizando a impressora K1 Creality, empregando filamento de ABS como material de fabricação.

3.3.3 Prototipagem

O ABS - Acrilonitrila Butadieno Estireno - é um dos filamentos mais utilizados na impressão 3D, sendo superior ao PLA em relação às propriedades mecânicas, durável, resistente e leve. Na tabela 3, é apresentado as propriedades do material com relação a impressão 3D.

Propriedades do ABS	Níveis
Rigidez	Alto
Resistência Impactos	Médio
Flexibilidade	Médio
Resistência a Atritos	Médio
Densidade	Médio
Tempo de impressão	Alto

Tabela 03 - Principais propriedades do filamento do ABS. Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as articulações do ombro, cotovelo e punho foram necessário o desenvolvimento de peças que repetissem os mesmos movimentos (flexão, extensão, abdução, adução, e entre outros), uma vez que essas peças desempenham um papel importante na amplitude e coordenação dos movimentos dos membros superiores. A articulação do ombro, permite movimentos amplos em múltiplos planos, como flexão, extensão, abdução e rotação, contudo, foi necessário a ênfase em movimentos como adução e abdução horizontal e com a junção de mais peças é possível obter os movimentos de extensão e flexão, que auxiliam nas ações que envolvem alimentação, higiene e lazer. O cotovelo é responsável por realizar movimentos de supinação e pronação. O punho consegue se movimentar

em vários eixos, com isso, foi idealizado que a peça responsável por essa articulação não restrinja se esses movimentos, mas desse apoio para o usuário conseguisse concluir os processos de forma independente.

Após a modelagem digital, os arquivos foram exportados para o software Ultimaker Cura, no qual foram realizados os procedimentos de fatiamento para viabilizar a fabricação por prototipagem rápida. A primeira versão do protótipo foi impressa em 3D utilizando filamento de PLA reforçado com fibra de carbono, com a produção de uma unidade de cada componente do modelo inicial. Contudo, esse protótipo apresentou diversas não conformidades relacionadas à integridade estrutural devido à falhas na modelagem digital, gerando problemas nas dimensões das peças.

Durante os testes preliminares, observou-se que as regiões de conexão por meio de pinos possuíam espessura insuficiente, o que resultou em fraturas após repetidos ciclos de movimentação. Dessa forma, o modelo foi considerado inviável, pois não atendeu aos requisitos técnicos estabelecidos na fase de planejamento, especialmente em relação à resistência, durabilidade e liberdade de movimento nas articulações. Essas falhas comprometem o desempenho funcional das peças em conjunto, levando ao descarte da primeira versão do protótipo.

Em seguida, os modelos digitais voltaram para o processo de desenvolvimento para a reorganização dos pontos que interferiram na execução correta do protótipo. Foram alterados as dimensões e feito uma reavaliação dos encaixes de cada peça para evitar que durante a rotação das peças de articulação não travasse, e avaliado as possíveis alternativas em relação ao material. Após as alterações, os modelos digitais foram enviados para o processo de impressão. Na tabela 4 é apresentada a comparação entre os dois protótipos impressos, é marcado com 'X' no qual o protótipo cumpriu com o resultado.

Protótipo	Peso	Funcionalidade	Resistência	Durabilidade
1	x			
2		x	x	x

Tabela 04 - Comparativo entre os dois protótipos produzidos. Fonte: elaborado pelo autor.

3.3.3.1 Processo de impressão

O exoesqueleto foi produzido para que funcione de forma passiva, com o auxílio de peças articuladas e ligas elásticas de tubo de látex para simular as múltiplas articulações encontradas nos membros superiores. A maioria das peças foram fabricadas por meio de impressão 3D, permitindo maior personalização e alteração de cada peça de forma individual. Com o uso de filamento de ABS foi possível manter o produto leve de modo que não houvesse interferência na execução do dispositivo, pesando no final 334g.

Com a finalização e impressão dos modelos referentes à segunda versão do projeto, foi possível proceder à montagem da estrutura do protótipo do exoesqueleto voltado aos membros superiores. A Figura 7 apresenta as peças que compõem o dispositivo assistivo, produzidas por meio de manufatura aditiva. Todos os modelos digitais foram impressos utilizando filamento de ABS na impressora K1 Creality. Para a montagem do sistema mecânico, foram empregados oito parafusos tipo lentilha com fenda reta, acoplados a porcas correspondentes, além de três rolamentos do tipo 604ZZ e quatro parafusos Allen com cabeça cilíndrica.

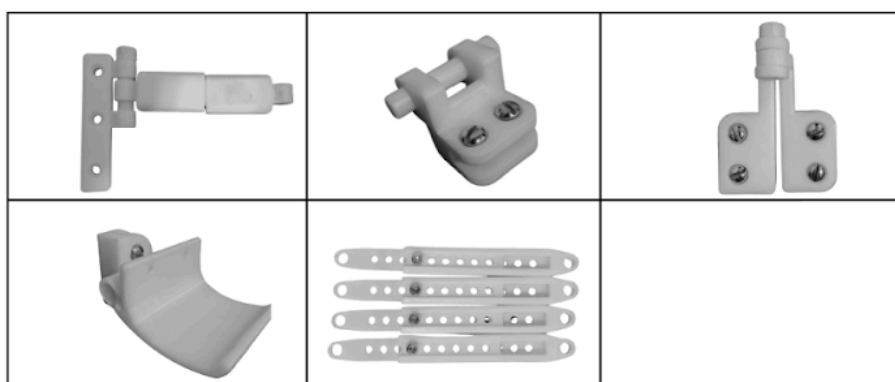


Figura 07 - Peças impressas em 3D de ABS. Fonte: elaborado pelo autor.

Para a finalização do dispositivo, foi necessário integrar tubos de látex e fitas elásticas ao conjunto, com a função de auxiliar nos movimentos de tração e contribuir para o aumento da amplitude articular sendo uma característica essencial no processo de reabilitação. As ligas elásticas foram posicionadas entre as articulações do ombro e do cotovelo, simulando a função dos músculos ao exercer resistência contrária aos movimentos, promovendo estímulo mecânico durante o uso. Do ponto de vista estético, o projeto não teve como prioridade a aparência visual do dispositivo, uma vez que o principal critério de design adotado foi a

redução de peso. Considerando-se que o produto é destinado ao uso por crianças, a leveza da estrutura mostrou-se essencial para assegurar conforto durante o uso e preservar a funcionalidade, sem comprometer a autonomia e a amplitude dos movimentos do usuário.

A Figura 8 ilustra o exoesqueleto montado e encaixado em uma cadeira de alimentação. Apesar do avanço no desenvolvimento, o protótipo ainda requer alterações, especialmente quanto à estabilidade das peças 5 e 6, responsáveis por simular a articulação do cotovelo. Por suportarem uma parte significativa dos movimentos do braço, essas peças ainda se mostram sensíveis a esforços repetitivos e a maiores cargas, sendo necessário reforçar sua estrutura ou repensar a forma de encaixe e sustentação.

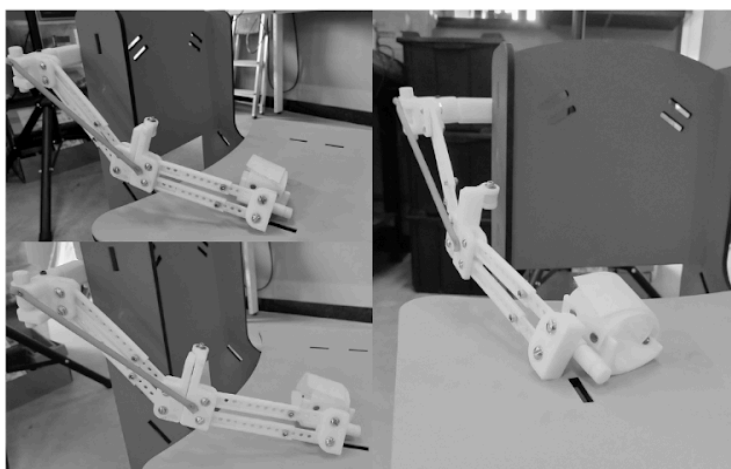


Figura 08 - Protótipo 1 do exoesqueleto impresso em ABS. Fonte: Elaborado pelo autor.

Em última análise, foi identificado no movimento de rotação, atrito entre as peças a execução e durabilidade. Diante disso, será necessário criar uma nova estrutura na qual a carga seja inteiramente distribuída nessas peças.

3.3.4 Ajustes

Com a impressão do primeiro protótipo e montagem, foi concluído que suas articulações estavam instáveis e sensíveis, causando atrito entre as peças, principalmente a articulação do cotovelo e ombro. Com esses novos dados, foi necessário a reorganização dos processos e retornar novamente a etapa de Execução. As peças trocadas foram as peças 1 e 2; as peças 5 e 6 só foram reajustadas para não causar mais atrito entre si. Na figura 9 apresenta as novas

peças.

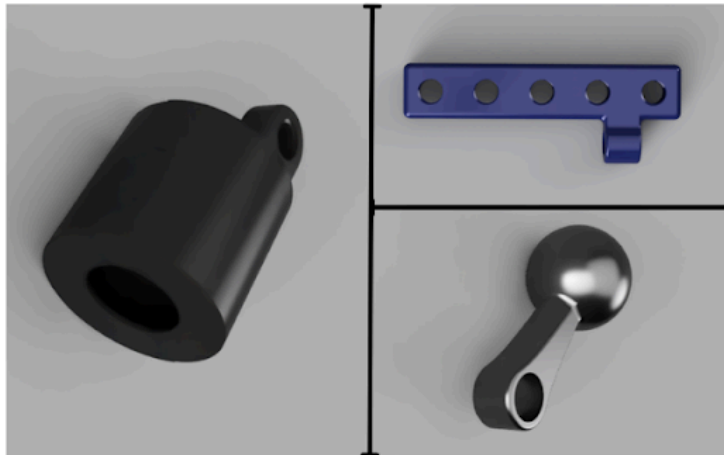


Figura 09 - Peças renderizadas. Fonte: elaborado pelo autor.

Segundo a figura 09 as peças foram modeladas para fixar no encosto lateral de uma cadeira e possuir os movimentos mais amplos e sem atritos durante a execução. Na figura 10, é apresentada uma das partes que complementam as articulações do ombro.

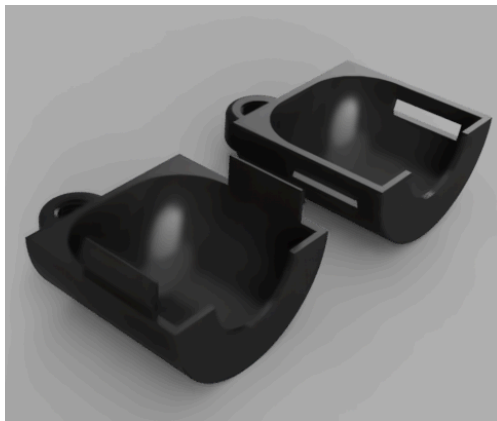


Figura 10 - Peça da articulação do ombro renderizada. Fonte: elaborado pelo autor.

A peça da figura 10 foi modelada para ter abertura de encaixe com o objetivo de encaixar uma esfera - que se conecta ao restante do exoesqueleto, com função de movimento do osso do ombro, permitindo maior amplitude de movimentos. Na figura 11 é apresentado o segundo protótipo renderizado do esqueleto com as peças de articulações montadas.



Figura 11 - Modelagem tridimensional do protótipo do exoesqueleto. Fonte: elaborado pelo autor.

Com as alterações das peças, os encaixes e onde encontrava os elásticos de tensão também foram alterados. Portanto, o processo de impressão 3D foi realizado nessas novas peças utilizando o filamento de ABS e as mesmas peças anteriores. Na tabela 5 é apresentada a comparação entre o segundo protótipo impresso em 3D e apresentado na figura 08 e o terceiro protótipo com as peças ajustadas, é marcado com 'X' no qual o protótipo cumpriu com o resultado.

Protótipo	Peso	Funcionalidade	Resistência	Durabilidade
2	x	x		x
3		x	x	x

Tabela 05 - Comparativo entre os dois protótipos produzidos. Fonte: elaborado pelo autor.

De acordo com a figura 12, o exoesqueleto alcançou alguns dos objetivos propostos, mas ainda requer alterações para uso efetivo no processo de reabilitação.

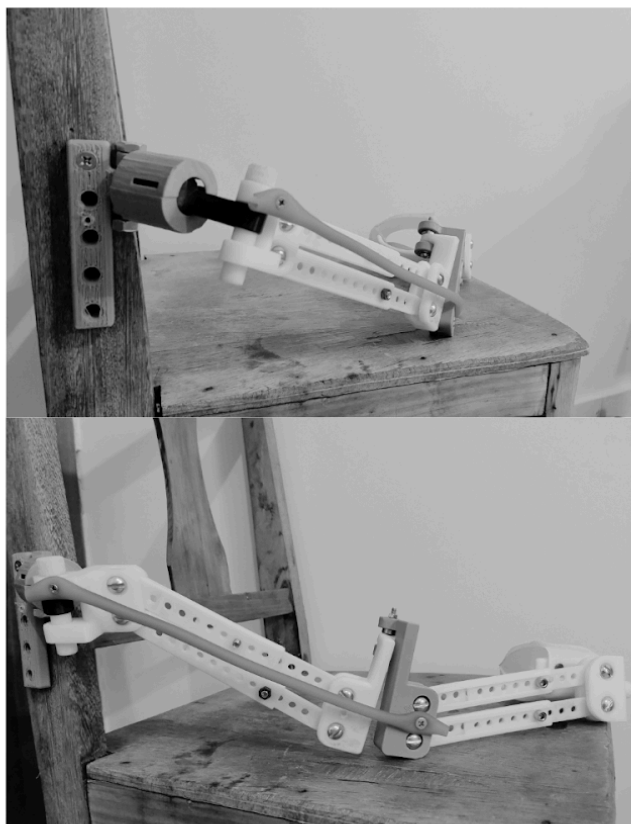


Figura 12 - Protótipo 1 do exoesqueleto impresso em ABS. Fonte: Elaborado pelo autor.

Para melhor compreensão do terceiro protótipo, a tabela 06 informa os dados necessários sobre a composição e detalhamento técnico do projeto.

Características	Especificações
Peso	344 g
Dimensão fechada	40cm
Dimensão aberta	50cm
Material	ABS
Junção	2 pinos (ABS) e parafusos com porcas
Componente de Articulação	Liga de borracha

Tabela 05 - Ficha técnico do protótipo do exoesqueleto. Fonte: elaborado pelo autor.

Em suma, em comparação aos protótipos anteriores, o exoesqueleto atual possui um maior peso. Contudo peças mais resistentes e ajustáveis ao uso, apesar de não serem mais leves considerando o segundo protótipo, ainda estão dentro das estimativas em relação ao peso durante a realização dos movimentos. A utilização

da liga de borracha seria para a simulação do tendão, fazendo a função de tração e ligação das articulações.

3.5 Verificação

A fase de verificação do projeto incluiu a execução de uma simulação de desempenho, essencial para validar o comportamento estrutural dos componentes. Para isso, foi utilizado o software Autodesk Fusion 360 para construir um modelo virtual detalhado, representando as cargas de força, otimização, restrições e conexão das peças . O processo utilizou como simulação a função de Otimização de Forma para verificar o comportamento das peças com a carga aproximada de 5kg, garantindo assim que o projeto final não só cumpre os requisitos de desempenho, mas também apresenta maior eficiência de material e peso. Adicionalmente, foi realizada a função de Análise de Tensão Estática para verificar se o protótipo suporta as cargas operacionais sem falha e se as tensões máximas permanecem dentro do limite de escoamento do material.

3.5.1 Simulação de desempenho

As Figuras 13, 14 e 15 mostram a simulação de otimização de forma. Para melhor compreensão do estudo de desempenho, as cores principais utilizadas foram: azul, amarelo e vermelho. O degradê entre essas cores representa as possibilidades de tensão nessas formas. A cor azul representa baixa tensão de carga, ou seja, próximo a 0.0. A cor verde representa valores intermediários, indicando tensão média no material e na forma. Já a cor vermelha representa alta tensão do material, sendo as regiões que suportam maior carga em relação às demais.

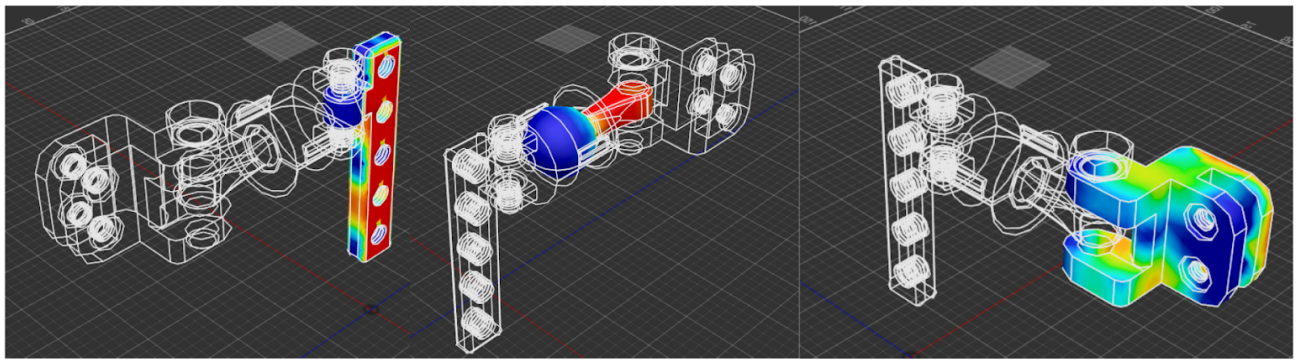


Figura 13 - Simulação de Otimização de forma; Fusion 360 - Articulação do Ombro. Fonte: Elaborado pelo autor.

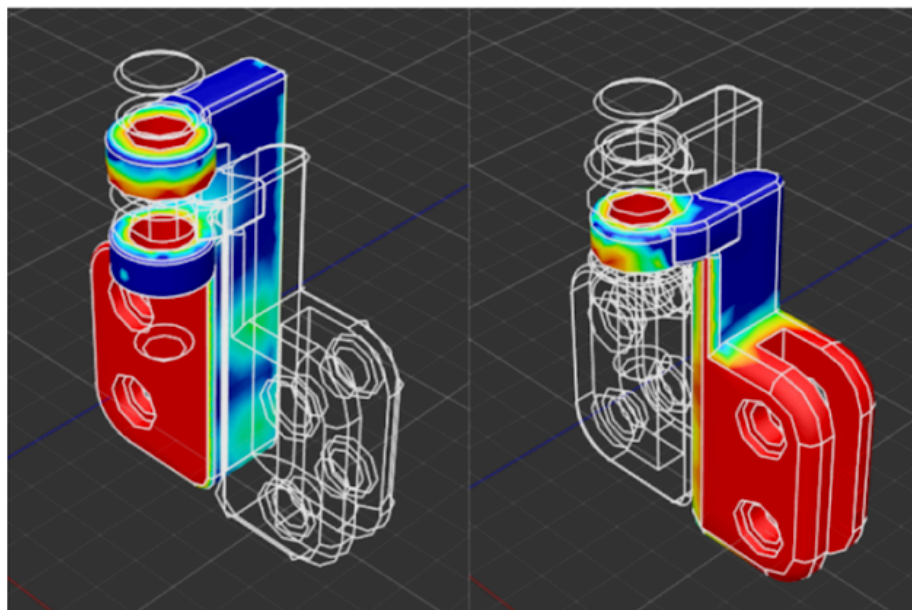


Figura 14 - Simulação de Otimização de forma; Fusion 360 - Articulação do Cotovelo. Fonte: Elaborado pelo autor.

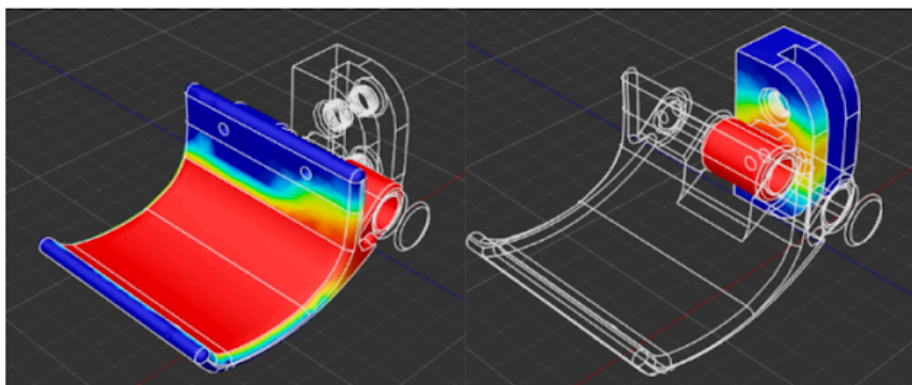


Figura 15 - Simulação de Otimização de forma; Fusion 360 - Articulação do Punho. Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 16 apresenta o estudo de simulação de tensão estática, sendo os valores similares ao estudo anterior. A escala de cores indica que o azul representa o menor valor de tensão; o verde representa um valor intermediário de tensão; e o vermelho representa o valor máximo de tensão. Além disso, nessa simulação é possível visualizar as partes que sofreram alguma deformação conforme a carga submetida ao longo do uso.

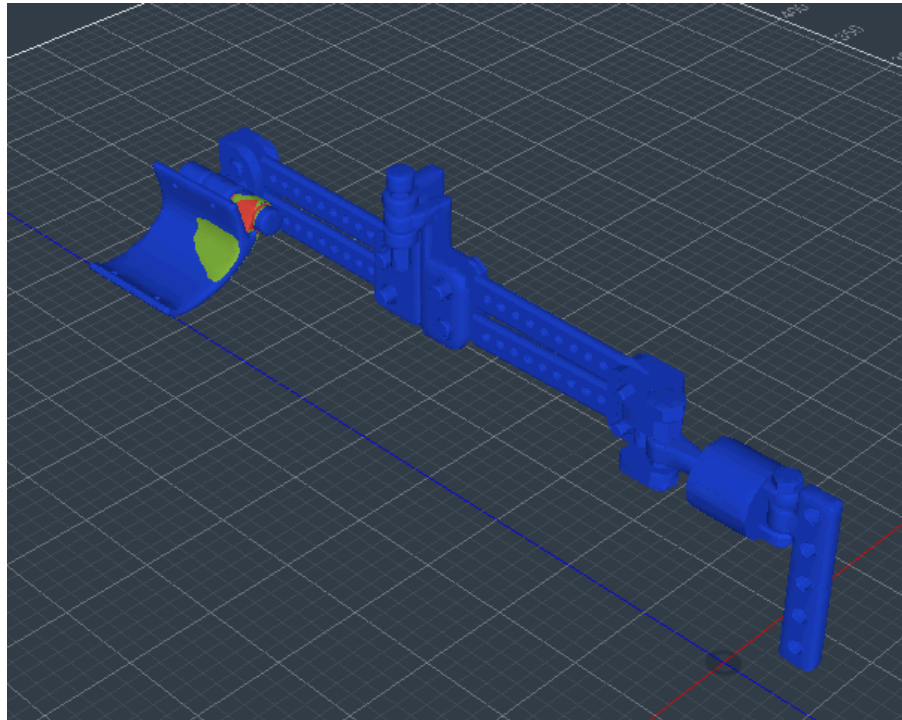


Figura 16 - Simulação de Tensão Estática; Fusion 360 - Protótipo do exoesqueleto para membros superiores. Fonte: Elaborado pelo autor.

Em suma, o estudo de verificação por simulação demonstrou que o projeto desenvolvido cumpre os objetivos no desempenho estrutural e eficiência. A Otimização de Forma permitiu uma redução significativa de material, confirmando a viabilidade de um componente mais leve e eficiente, enquanto a Análise de Tensão Estática validou que as tensões máximas permanecem dentro dos limites de segurança para a carga. As regiões com valores críticos, ou seja, apresentadas em vermelho nas figuras de 13 a 16, deixam evidente a deformação ao submeter a carga excessiva e ao uso prolongado do exoesqueleto.

Considerações Finais

O exoesqueleto é uma estrutura que se conecta em volta do corpo humano

imitando os movimentos de acordo com o usuário. Essa estrutura foi projetada para auxiliar a membros superiores com o objetivo de reabilitação de crianças entre 2 a 6 anos auxiliando no movimento e na reabilitação de pacientes com dificuldades motoras. O exoesqueleto passivo é uma ferramenta para a reabilitação, pois permite a assistência nos movimentos, fortalecendo a musculatura e promovendo a neuroplasticidade em pacientes com limitações motoras (Silva et al., 2019, p. 45).

Os custos da criação de um exoesqueleto personalizado são altos e se tornam inacessíveis para muitos indivíduos, prejudicando a aplicação necessária. Com isso, foi idealizado um sistema com uma estrutura ajustável para o dispositivo e que fosse acessível em diversos tamanhos, ou seja, para crescer junto com o usuário possibilitando maior tempo de uso do dispositivo. O objetivo principal é melhorar a execução de movimentos funcionais repetitivos, enfatizando o fortalecimento muscular e a coordenação motora. Além disso, o uso de exoesqueletos contribui para o aumento da autonomia, melhora da interação social e bem-estar psicológico, promovendo uma melhor qualidade de vida (Pereira & Almeida, 2020, p. 85).

O presente trabalho teve como foco o desenvolvimento de um protótipo de exoesqueleto passivo para membros superiores, tendo como foco crianças entre 2 e 6 anos com dificuldades motoras nos membros superiores. O projeto faz uso de manufatura aditiva para criar um dispositivo que promovesse a ampliação da amplitude de movimento e o fortalecimento muscular de forma acessível e também tivesse um sistema ajustável para diversas idades. Os resultados demonstram que foi possível construir uma estrutura funcional, que atende às demandas de mobilidade e conforto dos objetivos gerais.

Para além foram identificados pontos importantes para alterações futuras, principalmente relacionados à estabilidade e resistência das peças das articulações. A utilização da impressão 3D com filamento ABS permitiu a criação de peças leves, facilitando futuras modificações por meio dos modelos digitais.

Este estudo apresenta uma proposta inovadora para o campo da tecnologia assistiva, unindo conhecimentos das áreas de design e fisioterapia para a criação de um dispositivo acessível e adaptável para crianças com condições neuromusculares. O protótipo serve como base para futuros aprimoramentos e funcionamentos, com isso, espera-se que o desenvolvimento contínuo dessa tecnologia contribua com a autonomia e bem estar desses indivíduos.

Referências Bibliográficas

ALVES, A. C. J.; LOURENÇO, G. F.; DE LIMA, K. C. R. Efeitos do Uso de Recursos de Tecnologia Assistiva para Promover Independência em Atividades de Vida Diária para uma Criança com Paralisia Cerebral. *Revista Brasileira de Educação Especial*, Bauru, v. 26, n. 1, p. 119-134, jan./mar. 2020.

ALI, Habib. Bionic Exoskeleton: History, Development and the Future. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, Hyderabad, p. 58-62, 2014. Disponível em: www.iosrjournals.org.

BALASUBRAMANIAN, S. et al. The Effectiveness of Wearable Upper Limb Assistive Devices in Degenerative Neuromuscular Diseases: A Systematic Review and Meta-Analysis. *PMC (PubMed Central)*, [S. I.], v. 10, n. 1, p. 1-13, 2020. Disponível em: [Inserir URL, se houver].

BAIONI, M. T.; AMBIEL, C. R. Spinal muscular atrophy: diagnosis, treatment and future prospects. *Jornal de Pediatria (Rio J)*, Rio de Janeiro, v. 86, n. 4, p. 261-270, 2010. DOI: 10.2223/JPED.1988.

DINIZ, G. P. C.; LASMAR, L. M. L. B. F.; GIANNETTI, J. G. Doenças neuromusculares e instrumentos úteis na avaliação motora em crianças e adolescentes. *Revista Médica de Minas Gerais (RMMG)*, Belo Horizonte, v. 20, n. 4, supl. 3, p. 12-19, out./dez. 2010.

GRECO, P. J.; SILVA, S. A. O treinamento da coordenação motora. In: SAMULSKI, D.; MENZEL, H. J.; SALES, L. (org.). *Treinamento Esportivo*. São Paulo: Manole, 2013. v. 1, cap. 8, p. 359.

HALL, S. J. Biomecânica da extremidade superior. In: HALL, S. J. *Biomecânica básica*. 4. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2005. p. 179–219.

HERR, H. Exoskeleton and Orthoses: classification, design challenges and future direction. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, [S.I.], p. 6-21, 2009.

JAYASINGHE, D. P. M. et al. Passive and Active Exoskeleton Solutions: Sensors, Actuators, Applications, and Recent Trends. *PMC (PubMed Central)*, [S. I.], v. 11, n. 1, p. 1-28, 2024.

MIRANDA, A.; ZARO, M. A tecnologia assistiva e a qualidade de vida das pessoas com deficiência. *Revista Brasileira de Inclusão*, v. 5, n. 2, p. 32-45, 2009.

MÜLLER, K. I. et al. The prevalence of hereditary neuromuscular disorders in Northern Norway. *Brain and Behavior*, [S.I.], v. 10, n. 11, e01948, 2020. DOI: 10.1002/brb3.1948.

PEREIRA, M. L.; ALMEIDA, T. R. Avaliação da qualidade de vida de crianças com deficiências motoras assistidas por dispositivos robóticos. *Revista de Saúde Pública*, [S.I.], 2020.

PLENTZ, R. D. M.; BLAETH, A. G. Reabilitação robótica em fisioterapia no Brasil: da ficção para a realidade. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FISIOTERAPIA CARDIORRESPIRATÓRIA E FISIOTERAPIA. MARTINS et al. (Org.). PROFISIO Programa de Atualização em Fisioterapia Cardiovascular e Respiratória: Ciclo 7. Porto Alegre: Artmed Panamericana, 2021. v. 3, p. 9–35. (Sistema de Educação Continuada a Distância).

RAHMAN, T. et al. Design and testing of a functional arm orthosis in patients with neuromuscular diseases. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, [S.I.], v. 15, n. 2, p. 244–251, 2007.

RAZZOUK, R.; SHUTE, V. What is design thinking and why is it important? *Review of Educational Research*, [S.I.], v. 82, n. 3, p. 330–348, 2012.

REED, U. C. Doenças neuromusculares. *Jornal de Pediatria*, Rio de Janeiro, v. 78, supl. 1, p. S89–S103, 2002.

RIBEIRO, L. C. Principais órteses existentes para membros superiores. In: UNIVERSIDADE ABERTA DO SUS. UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO. Atenção à Pessoa com Deficiência I... Órteses, Próteses e Meios Auxiliares de Locomoção. Recurso Educativo n.º 4. São Luís: UNA-SUS; UFMA, 2023.

RODRIGUES, L. F.; SANTOS, G. P. Fatores humanos associados aos projetos de design: protocolo de coleta para a captura de movimentos. In: ANAIS DO 8º CONGRESSO INTERNACIONAL DE DESIGN DA INFORMAÇÃO – CIDI 2018. Belo Horizonte: UFMG, 2018. p. 1-10.

SANTOS, O. S. et al. Síndrome do impacto: resultados do tratamento cirúrgico. *Revista Brasileira de Ortopedia*, São Paulo, v. 30, n. 9, p. 655–659, 1995.

SASSAKI, R. K. Inclusão: Construindo uma sociedade para todos. 2. ed. Rio de Janeiro: WVA, 2005.

SILVA, R. C.; LIMA, F. S. Tecnologias assistivas e sua aplicação no contexto brasileiro: desafios e perspectivas. *Revista Brasileira de Tecnologia Assistiva*, [S.I.], 2019.

VUKOBRATOVIC, M.; HRISTIC, D.; STOJILJKOVIC, Z. Development of active anthropomorphic exoskeletons. *Medical and Biological Engineering*, v. 12, n. 1, p. 66-80, jan. 1974.

BERSCH, R. *Introdução à tecnologia assistiva*. Porto Alegre: Assistiva/Tecnologia da Educação, 2017.

BRASIL. Subsecretaria Nacional de Promoção dos Direitos da Pessoa com Deficiência. Comitê de Ajudas Técnicas. *Tecnologia Assistiva*. Brasília: CORDE, 2009.

CARVALHO, J. A. *Órteses: um recurso terapêutico complementar*. Barueri, SP: Manole, 2005.

COOK, A. M.; POLGAR, J. M. *Assistive Technologies: Principles and Practice*. 4. ed. St. Louis, MO: Elsevier/Mosby, 2015.

DINIZ, G. P. C. *Avaliação motora de pacientes portadores de doenças neuromusculares: um estudo longitudinal*. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências da Saúde) – Faculdade de Medicina, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

FORNER-CORDERO, A.; PONS, J.; WISSE, M. Basis for bioinspiration and biomimetism in wearable robots. In: *Wearable robots: biomechatronic exoskeletons*. [S.l.]: John Wiley Sons, 2008. cap. 2. ISBN 9780470512944.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Censo Demográfico 2010: Características da População e dos Domicílios*. Rio de Janeiro, 2010.

TECH BRIEFS. *Semi-active Exoskeleton Saves Energy, Lowers Cost*. [S.l.: s.n.], [2025]. Disponível em:

<https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/pub/briefs/robotics/43202>.

WERKEMA, M. C. C. *Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos*. Belo Horizonte: Werkema, 2006.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. *World report on disability*. Geneva: WHO, 2011.