

PROPOSTA DE ÓRTESE PARA ELETROESTIMULAÇÃO EM CRIANÇAS COM MARCHA DIGITÍGRADA E PORTADORAS DE TRANSTORNO DO ESPECTRO AUTISTA – (TEA)

Design Proposal for an Electrostimulation Orthosis for Children with Toe-Walking and Autism Spectrum Disorder (ASD)

Camilly Barbosa¹
Leandra M. M. Spinelli²
Manoela de O. Barbosa³
Rogério Thomazella⁴

RESUMO: A marcha digitigrada (MD) é um padrão motor que se apresenta durante o ciclo da marcha de desenvolvimento infantil. Essa característica é observada em aproximadamente 20% a 40% das crianças diagnosticadas com Transtorno do Espectro Autista (TEA), o que sugere ser uma situação neuromioesquelética com a possibilidade de reversão através do diagnóstico e tratamento precoce. O presente trabalho propõe o desenvolvimento de uma órtese para suporte do dispositivo de Estimulação Elétrica Funcional (FES) junto ao cristal Piezelétrico (PZT) componente de ultrassom, uma técnica reconhecida em relaxamento muscular, provando-se eficaz para tratamento da rigidez no Tendão de Aquiles associada à marcha. O principal critério no desenvolvimento foi a adaptabilidade e a acessibilidade no tratamento precoce dos pacientes dentro do TEA, envolvendo adequação do projeto de acordo a princípios das tecnologias assistivas (TA), com atenção especial na escolha de materias, formatos e custos da órtese. O protótipo final, denominado Neuropasso, foi desenvolvido sob princípios de TA. A órtese foi construída com filamento de Termoplástico de Poliuretano (TPU), demonstrando ser flexível e resistente, superando as limitações sensoriais de dispositivos existentes. O projeto integra os tratamento FES e Ultrassom (PZT), e os testes de validação técnica apontando a funcionalidade e desenvolvimento do protótipo com a estimativa de baixo custo oferecendo ao paciente conforto, autonomia e tratamento. Conclui-se que o Neuropasso valida sua proposta inicial, estabelecendo-se como uma Tecnologia Assistiva acessível e ergonômica para o tratamento da MD em crianças com TEA. Sugerem a eficácia da intervenção precoce de tecidos mais profundos, como o Tendão de Aquiles, evitando procedimentos cirurgicos tardios.

Palavras Chaves: Transtorno do Espectro Autista – (TEA), Marcha Digitígrada, Eletroestimulação, Cristal Piezelétrico, Tecnologia Assistiva.

ABSTRACT: Toe-walking (TW) is a motor pattern that appears during the child's developmental gait cycle. This characteristic is observed in approximately 20% to 40% of children diagnosed with Autism Spectrum Disorder (ASD), suggesting a neuromusculoskeletal condition with the possibility of reversal through early diagnosis and treatment.

This work proposes the development of an orthosis to support a Functional Electrical Stimulation (FES) device along with a Piezoelectric Crystal (PZT) ultrasound component a technique recognized for promoting muscle relaxation and proven effective in treating

¹ Graduanda em Sistemas Biomédicos. E-mail: camilly.barbosa@fatec.sp.gov.br

² Graduanda em Sistemas Biomédicos. E-mail: leandra.martins@fatec.sp.gov.br

³ Graduanda em Sistemas Biomédicos. E-mail: manoela.barbosa@fatec.sp.gov.br

⁴ Docente da Faculdade de Tecnologia de Bauru. E-mail: rogerio.thomazella@fatec.sp.gov.br

Achilles tendon stiffness associated with gait. The main development criterion was adaptability and accessibility for early treatment of patients with ASD, involving project compliance with Assistive Technology (AT) principles, with special attention to the choice of materials, shapes, and costs of the orthosis.

The project integrates Functional Electrical Stimulation (FES) and Ultrasound (PZT) treatments, with technical validation tests confirming its functionality. The prototype was developed with a low-cost estimate, offering patients treatment, comfort, and autonomy. It is concluded that Neuropasso fulfills its initial proposal, establishing itself as an accessible and ergonomic Assistive Technology for the treatment of TW in children with ASD. These results reinforce the effectiveness of early intervention in deeper tissues, such as the Achilles tendon, preventing late surgical procedures.

Keywords: Autism Spectrum Disorder – ASD, Toe Walking, Electrical Stimulation, Piezoelectric Crystal, Assistive Technology.

1 INTRODUÇÃO

A aquisição do ciclo da marcha representa um marco fundamental no desenvolvimento neuromotor infantil, sendo qualquer variação persistente um indicador potencial de disfunção. O foco deste trabalho reside na Marcha Digitigrada (MD), um padrão motor atípico caracterizado pela ausência de contato inicial do calcâneo com o solo, resultando em caminhada sobre o antepé. Esta condição demonstra uma alta prevalência, afetando significativamente a população de crianças com Transtorno do Espectro Autista (TEA), com taxas que podem atingir 20% a 40% enquanto 7% a 24% de indivíduos que não estão dentro o TEA de acordo com Alves et al. (2024) A persistência da MD está clinicamente associada a disfunções neuromotoras, incluindo limitação da participação social e o risco de alterações estruturais crônicas, notadamente o encurtamento do Tendão de Aquiles e a rigidez do tríceps sural, sublinhando a necessidade de intervenção precoce, idealmente na faixa etária pré-escolar, como medida preventiva à evolução para quadros que exijam correção cirúrgica (Zoboli, 2024).

Diante desse cenário, esta pesquisa propõe o desenvolvimento de um dispositivo ortopédico inovador, concebido sob os critérios de Tecnologia Assistiva (TA), com o objetivo primário de oferecer suporte para a aplicação da Estimulação Elétrica Funcional (FES). A FES constitui uma técnica de eletroestimulação reconhecida pela sua eficácia no relaxamento muscular e na reabilitação neuromotora. O critério metodológico adotado neste projeto foi rigoroso, priorizando a seleção de materiais flexíveis, como o Filamento Termoplástico de Poliuretano (TPU), e a integração de componentes como o FES e um componente PZT (Ultrassom), visando o máximo de conforto, segurança e adaptabilidade sensorial ao usuário com TEA (Carci, 2021).

O presente estudo está estruturado para atingir três objetivos centrais: i) revisar a literatura sobre MD, TEA e as abordagens terapêuticas (FES e US); ii) desenvolver o projeto da órtese, efetuando a modelagem 3D e o projeto do circuito elétrico; iii) validar a construção, apresentando os resultados da montagem do protótipo e sua viabilidade técnica e financeira. O trabalho se desenvolve em seções que detalham o Referencial Teórico, os Procedimentos Metodológicos empregados no design e na construção, os Resultados obtidos e, por fim, a Conclusão com as contribuições e sugestões para pesquisas futuras.

O projeto também corrobora em estudo que alia inovação tecnológica, aplicabilidade prática e impacto social, delimitando-se no desenvolvimento do dispositivo

protótipo portátil, denominado como Neuropasso, a órtese para estimular de forma controlada, a região do Tendão de Aquiles.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Marcha Digitígrada

A marcha digitígrada, também conhecida como marcha em equino é um padrão de caminhada caracterizado por andar na ponta dos pés, sem que o calcanhar toque o chão. Esse padrão pode ser temporariamente apresentado em crianças que iniciaram recentemente a marcha para se adequar ao equilíbrio, porém ao persistir determinado tempo, deve ser avaliado o caso para relacionar a uma condição de distúrbios neurológicos, como paralisia cerebral, ou ao TEA (Alves et al., 2024; Silva et al, 2024).

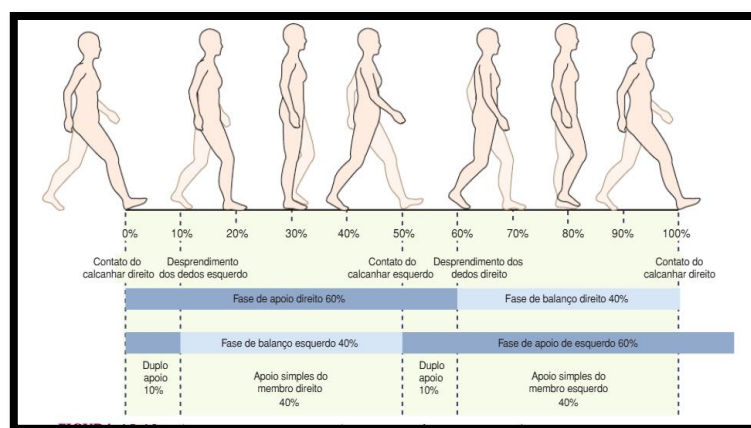
Segundo estudos de Alves et al. (2024) a MD pode ser observada em cerca de 20% a 40% de indivíduos dentro do TEA, e 7% a 24% de indivíduos que não estão dentro o TEA. Evidenciando a conexão neurológica com o padrão de caminhada dito.

Sendo uma condição que atinge grande parte de crianças em desenvolvimento, é de grande importância que o padrão de marcha seja identificado precocemente por um profissional da área, assim iniciando um tratamento personalizado para o paciente, a intervenção na marcha é importante para evitar complicações, futuros problemas de postura e enrijecimento do tendão de Aquiles que faz parte da anatomia. Idade ideal pra iniciar o tratamento da MD pode variar entre os 2 a 6 anos (Zoboli, 2023).

2.2 Fisiologia da Marcha Normal e Digitígrada

Segundo Neumann (2018) no ciclo da marcha a distinção fundamental dos padrões de caminhada está no contato inicial entre o pé e o solo. A marcha normal é iniciada com o contato do calcanhar no chão, seguindo para o apoio médio, que terá o contato total do membro que garantira a estabilidade e amortecimento do peso corporal. A movimentação biomecânica desse padrão coordenado no tornozelo, joelho, e quadril, como demonstrado na Figura 1, que representa o ciclo da marcha humana.

Figura 1 – Ciclo da marcha normal



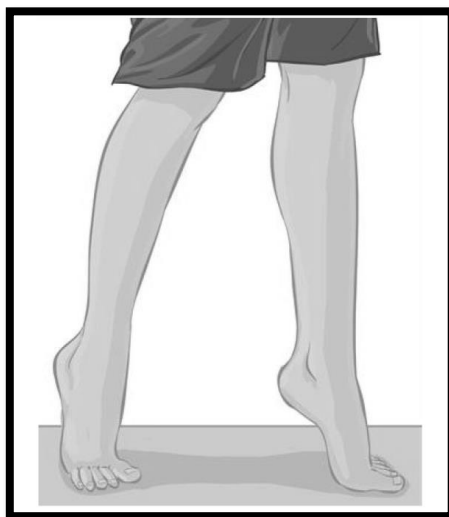
Fonte: (Neumann, 2018)

Diante do exposto, ao iniciar o contato diretamente pelo antepé, perdemos o apoio médio, comprometendo a sustentação e afetando a área total de contato podendo gerar instabilidade. Com o tempo, essa movimentação biomecânica resultará em problemáticas fisiológicas graves, sendo elas lesões no Tendão de Aquiles,

encurtamento muscular crônico na panturrilha (tríceps sural) comprometendo a postura, exigindo compensações de outras articulações para manter o equilíbrio (Neumann, 2018).

Comprovada a possibilidade do comprometimento fisiológico de pacientes que apresentam alterações motoras, torna-se de suma importância o diagnóstico e o tratamento individualizado, tratamentos por meios fisioterápicos e cirúrgicos nos casos de irreversibilidade (Silva et al, 2024). Assim, a marcha digitigrada ou marcha na pontas dos pés é representada na Figura 2.

Figura 2 – Marcha Digitigrada



Fonte: (Dinpot, 2024)

2.3 Tecnologia Assistiva

Indivíduos com Transtorno do Espectro Autista frequentemente apresentam alterações motoras que afetam seu desenvolvimento ao longo da vida. Desafios comuns incluem dificuldades de postura, equilíbrio e incoordenação motora global e fina. A MD, caracterizada por andar na ponta dos pés, é um exemplo proeminente dessas alterações, comprometendo a estabilidade e o impulso para frente do indivíduo. Nesse contexto, a fisioterapia motora age como uma ferramenta de extrema importância para o acompanhamento de crianças com o padrão de caminhada marcha de equino, atuando diretamente nas disfunções motoras e promovendo melhorias no desenvolvimento global. Enfatizando que a fisioterapia motora proporcionará melhor qualidade de vida e interação na sociedade, beneficiando positivamente o progresso motor dessas crianças. Essa necessidade de intervenção é um meio para evitar que os pacientes sejam submetidos a cirurgias no tendão quando não for mais possível reparar fisioterapicamente. As dificuldades motoras, quando não abordadas, limitam a participação da criança em atividades diárias, afetando sua autoestima e integração social, o que justifica a busca por abordagens eficazes e personalizadas (Rodrigues et al., 2024; Silva et al., 2024; Zoboli, 2024).

A TA, definida como um recurso e dispositivos adaptados, é feito para limitações sensoriais e motoras de indivíduos com TEA. Seu conceito vai além do equipamento simples, objetivando fornecer soluções acessíveis, seguras e personalizadas, como a órtese desenvolvida neste trabalho, que se integra à fisioterapia para transformar o treinamento em uma experiência mais lúdica (Ministério da Saúde, 2025).

A TA tem como propósito fundamental a promoção da autonomia, inclusão social e melhoria da qualidade de vida de crianças com TEA que apresentam alterações como a marcha digitígrada. Ao integrar recursos avançados como a órtese com FES e Ultrassom (PZT), a TA potencializa a eficácia da fisioterapia motora, tornando a intervenção mais confortável e lúdica. Isso justifica a busca por essas abordagens eficazes e personalizadas, visando prevenir a necessidade de procedimentos cirúrgicos no tendão (Ministério da Saúde, 2025).

Na prática, a TA é aplicada de forma complementar e integrativa à fisioterapia, com o desenvolvimento de dispositivos customizados que consideram adaptabilidade, conforto e baixo custo. A aplicação se materializa na escolha de materiais flexíveis (como o Filamento de TPU) e no design customizado, garantindo que as intervenções sejam eficazes no progresso motor e na melhoria contínua da qualidade de vida. O objetivo final é aumentar a autonomia e a participação social da criança, reforçando a relevância da TA no plano de tratamento. (Medeiros et al., 2007; Salvini et al., 2012).

Em relação aos recursos, a TA abrange uma vasta gama de dispositivos, como demonstrado pela análise de similares. A proposta de dispositivos integrados, como a órtese que combina FES e PZT, busca superar as limitações de equipamentos separados, oferecendo uma solução de baixo custo e alta adaptabilidade. Essa abordagem transforma a tecnologia existente em ferramentas acessíveis e focadas na necessidade específica do usuário, potencializando os resultados da intervenção motora e sendo defendida como uma abordagem essencial no tratamento global do TEA, ao lado das intervenções tradicionais. (Silva et al., 2024).

Para potencializar os resultados da intervenção motora, o uso de Tecnologia Assistiva (TA) é defendido como uma abordagem complementar e integrativa no tratamento global do TEA. Silva et al. (2024) destacam que a incorporação de tecnologias, como dispositivos e jogos interativos, A relevância da TA se manifesta na capacidade de fornecer soluções acessíveis, seguras e adaptadas às necessidades sensoriais e motoras de indivíduos autistas, oferecendo intervenções tradicionais que focam, por exemplo, apenas na estimulação elétrica. Essas tecnologias criam um ambiente controlado e motivador, transformando o treinamento motor em uma experiência lúdica e acessível ou na fisiologia muscular (Medeiros et al., 2007; Salvini et al., 2012).

2.4 Eletroestimulação

A eletroestimulação (EE) constitui um recurso essencial da eletroterapia, atuando por meio da aplicação de correntes elétricas para induzir respostas biológicas controladas nos tecidos e músculos. Contendo duas modalidades com focos distintos: FES e a Neuroestimulação Elétrica Transcutânea (TENS) (Carci, 2021).

A EE é considerada um meio terapêutico complementar, atuando diretamente para melhorar a capacidade de caminhar e adaptar músculos em processo de atrofia. Seu mecanismo de ação ajuda a intervir em situações onde o músculo perde sua conexão neural (desnervação), o que ameniza a atrofia muscular ao evitar a diminuição do diâmetro da fibra e do seu conteúdo interno. Além disso, a EE provoca mudanças significativas nas fibras musculares, transformando contrações rápidas e de fadiga rápida em contração lenta e resistente à fadiga, o que melhora a oxigenação, o desempenho na marcha e a movimentação motora geral. (Medeiros et al., 2007; Salvini, 2012). Mostrando a EE como uma técnica alternativa terapêutica viável em diversas situações musculares com resultados positivos em pacientes que passaram por tratamento terapêutico utilizando eletroterapia como meio paliativo reduzindo necessidade de pacientes passarem por cirurgias complexas (Carci, 2021; Medeiros et al., 2007).

2.5 Ultrassom

A terapia por ultrassom (US) é um recurso fundamental na prática clínica da fisioterapia para o tratamento de disfunções musculoesqueléticas. O ultrassom é um estímulo mecânico gerado por um cristal piezoelétrico dentro do transdutor (cabeçote) e transmitido aos tecidos através de um gel condutor. O princípio de funcionamento reside na absorção seletiva dessa energia pelos tecidos, onde ela é transformada em calor. Este aumento de temperatura (efeito térmico) e a micromassagem celular (efeito não térmico) induzem importantes alterações biológicas (Carci, 2018). A eficácia do tratamento com o ultrassom é determinada pela frequência utilizada, o que dita a profundidade de penetração, permitindo o tratamento de diferentes condições:

- Condições Crônicas: O US é eficaz em quadros crônicos ao utilizar seu efeito térmico. O calor em profundidade é importante para aumentar a extensibilidade dos tecidos e reduzir a rigidez articular (Carci, 2018);
- Condições Agudas: Em patologias de membranas sinoviais (como bursites), o US, aplicado com intensidade adequada, contribui para reduzir a atividade inflamatória, acelerando a taxa de restabelecimento tecidual (Carci, 2018).

Para tratamento do tecido biológico a partir do uso seguro de equipamentos de ultrassonoterapia, é baseado numa tabela sobre as especificações da onda emitida. Dita assim, é mostrados os valores utilizados por fisioterapeutas na Figura 3, ao utilizar maneiras diferentes para atender cada caso clínico dos pacientes, determinado por esses profissionais da saúde, a média de tratamento deverá ser menor que $0,2 \text{ W/cm}^2$ em certas áreas cutâneas, no modo de intensidade instantânea seguindo a regra de profundidade, a cada 1 cm ter uma atenuação da onda sonora em torno de 50% da intensidade penetrada (Carelli, 2011).

Figura 3 – Parâmetros de Intensidade do Ultrassom Terapêutico em Diferentes Profundidades e Modos de Emissão

Modo	Saída do aparelho		1cm de profundidade		2cm de profundidade	
	Intensidade Instantânea	Intensidade Média	Intensidade Instantânea	Intensidade Média	Intensidade Instantânea	Intensidade Média
Contínuo	1 W/cm^2	1 W/cm^2	$0,5 \text{ W/cm}^2$	$0,5 \text{ W/cm}^2$	$0,25 \text{ W/cm}^2$	$0,25 \text{ W/cm}^2$
Pulsado 10%	1 W/cm^2	$0,1 \text{ W/cm}^2$	$0,5 \text{ W/cm}^2$	$0,05 \text{ W/cm}^2$	$0,25 \text{ W/cm}^2$	$0,025 \text{ W/cm}^2$
Pulsado 20%	1 W/cm^2	$0,2 \text{ W/cm}^2$	$0,5 \text{ W/cm}^2$	$0,1 \text{ W/cm}^2$	$0,25 \text{ W/cm}^2$	$0,05 \text{ W/cm}^2$
Pulsado 50%	1 W/cm^2	$0,5 \text{ W/cm}^2$	$0,5 \text{ W/cm}^2$	$0,25 \text{ W/cm}^2$	$0,25 \text{ W/cm}^2$	$0,125 \text{ W/cm}^2$

Tecidos a 1cm de profundidade (fase inflamatória): prescrição em vermelho

- Pulsado 10% (1 W/cm^2) – frequência 3 MHz
- Pulsado 20% (1 W/cm^2) - frequência 3 MHz

Tecidos a 2cm de profundidade (fase inflamatória): prescrição em azul

- Pulsado 10% (1 W/cm^2) – frequência 1 MHz
- Pulsado 20% (1 W/cm^2) – frequência 1 MHz
- Pulsado 50% (1 W/cm^2) – frequência 1 MHz

Fonte: Carelli (2011).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia deste trabalho concentra-se no desenvolvimento de um protótipo de órtese para o suporte de um dispositivo de FES e um componente de ultrassom. Inicialmente, foi realizada uma pesquisa de similares para analisar equipamentos existentes na região do tornozelo, como órteses e eletroestimuladores, a fim de justificar a necessidade de um dispositivo mais adequado e confortável para crianças com TEA e MD. O projeto (modelagem) do protótipo foi criado em um aplicativo de modelagem 3D

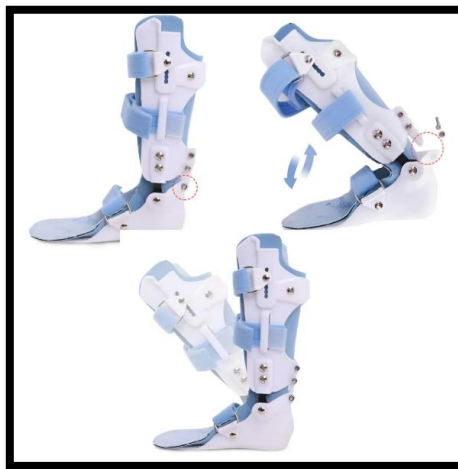
(Autodesk Fusion), dimensionado para um pé que calça número 28 (20cm de comprimento e 23,5cm de altura) e incorpora um componente PZT (para ultrassom), um massageador tipo FES, e velcro para fixação. O levantamento de materiais detalhou os componentes, incluindo Filamento de TPU (material flexível para impressão 3D), com uma descrição de suas funções e custos. Por fim, foram definidos os testes funcionais básicos (como liga/desliga, tempo de funcionamento e medições elétricas e físicas) para validar o protótipo.

3.1 Pesquisa de similares

A pesquisa de similares foi desenvolvida para identificar os equipamentos que apresentam proximidade com objetivo do presente trabalho, focando em produtos com similaridade física e serviço terapêutico na região do tornozelo. Foram analisados três equipamentos: i) Órtese Suropodálica Articulada Infantil Tala Equino Pé Caído (Figura 4); ii) Bota Imobilizadora Ortopédica Curta Bilateral Take Care (Figura 5); iii) Eletroestimulador Tens Para Tornozelo Em27- BEURER (Figura 6).

- i) A Órtese Suropodálica Articulada Infantil é um suporte projetado em polietileno leve e respirável para disfunções no tornozelo e pé, incluindo pés equinos, varos/valgos, pé caído e recuperação pós-cirúrgica. Sua função principal é corrigir a marcha idiopática e prevenir quedas e entorses, oferecendo conforto com espuma macia e durabilidade para uso de 24 horas (Dellas Mundo On, 2025).

Figura 4 – Órtese Suropodálica Articulada Infantil Tala Equino Pé Caído



Fonte: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-5061051374-ortese-suropodolica-articulada-infantil-tala-equino-pe-caido- JM>

- ii) A Bota Imobilizadora Anatômica Take Care é um dispositivo de suporte para pé e tornozelo, indicado para alinhamento articular, entorses graves e fraturas estáveis. Feita com estrutura leve e talas de alumínio, possui revestimento acolchoado de Poliéster/Poliuretano, solado de borracha termoplástica e design bilateral (curto ou longo) para facilitar a locomoção e garantir o alinhamento articular (Take Care, 2025).

Figura 5 – Bota Imobilizadora Ortopédica Curta Bilateral Take Care



Fonte: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-5287753796-bota-imobilizadora-ortopedica-curta-bilateral-take-care- JM>

- iii) A Tornozeleira Eletroestimuladora TENS é um dispositivo portátil projetado para alívio de dores no tornozelo, atuando no foco da dor através de 4 modos pré-programados de estímulos elétricos. Contém eletrodos de contato é indicada para dor muscular, tendinites e osteoartrites (Beurer, 2025).

Figura 6 – Eletroestimulador Tens Para Tornozelo Em27- BEURER



Fonte: <https://www.mercadolivre.com.br/up/MLBU1941787724>

O levantamento baseou-se em características como, uso, qualidade do material e adaptabilidade para o paciente infantil com TEA, por exemplo os equipamentos da Figura 4 e Figura 5 não oferecem conforto para o público citado, podendo gerar aversão ao tratamento. O equipamento da Figura 6, foi o único encontrado online que, igualmente ao projeto une o tratamento com eletroestimulação ao suporte, sua composição ainda é bruta, porém tem melhor aceitação em comparação aos dois primeiros equipamentos. Essa análise justifica o desenvolvimento do protótipo, pois ele se adequa melhor às necessidades do público-alvo

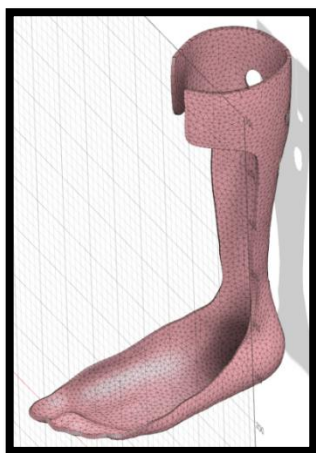
3.2 Projeto (modelagem)

O protótipo da órtese foi desenvolvido a partir da modelagem 3D no software

Autodesk Fusion, adaptando um molde existente para um pé que calça número 28, com 20cm de comprimento e 23,5cm de altura. Para a estrutura da órtese, foi selecionado o Filamento de TPU (Termoplástico de Poliuretano), um material flexível e resistente que garante o conforto e a adaptabilidade sensorial ao público com TEA.

O projeto integra os componentes terapêuticos por meio do suporte denominado Neuropasso. Conforme ilustrado na Figura 7, Figura 8 e Figura 9 a adaptação feita a partir destes modelos.

Figura 7 – Perspectiva isométrica



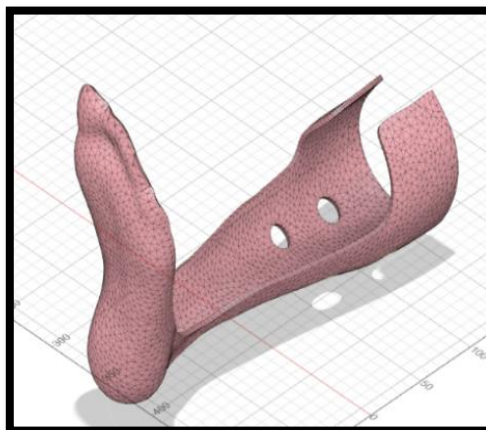
Fonte: 3Devrn, (2025).

Figura 8 – Vista lateral esquerda



Fonte: 3Devrn, (2025).

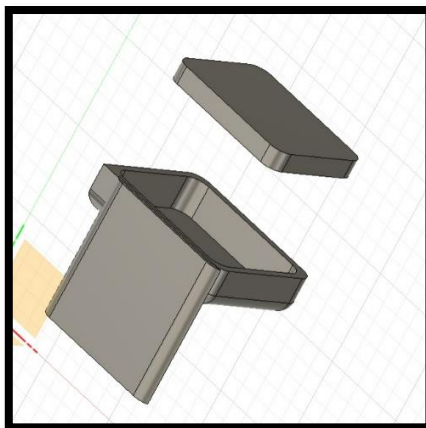
Figura 9 – Perspectiva Isométrica



Fonte: 3Devrn, (2025).

Este suporte principal acomoda o Massageador tipo FES para estímulo elétrico controlável e, junto com o uso de Velcro e uma Meia Neurocompressora, assegura a fixação e a confortoabilidade do usuário. Adicionalmente, o Componente PZT (Cristal Piezelétrico), para a terapia por ultrassom, é acoplado ao conjunto através de um suporte lateral anexo, conforme ilustrado na Figura 10. A integração do FES, PZT e da base Neuropasso, cumpre os critérios de Tecnologia Assistiva e otimiza a eficácia do tratamento motor.

Figura 10 – Suporte componente PZT



Fonte: Autores

3.3 Projeto do circuito elétrico

O projeto elétrico da órtese integra um massagador elétrico como base e o componente PZT como auxiliador. Equipamentos prontos para uso que utilizam de Estimulação Elétrica Funcional (FES), e terapia ultrassônica.

O FES, usa corrente elétrica, nos parâmetros 35mA e 3,7V para induzir contrações musculares rítmicas (massagem), é a funcionalidade principal, destacando-se no relaxamento muscular para tratar a rigidez no tendão de Aquiles associada à marcha digitígrada.

O componente PZT (Cristal Piezelétrico) transforma energia elétrica em vibrações ultrassônicas, de 3 MHz proporcionando micromassagem celular e calor, o que aumenta a extensibilidade dos tecidos e reduz a rigidez articular.

Quanto à regulamentação, os dispositivos se enquadram nos princípios das tecnologias assistivas, e, como equipamento eletro terapêutico, seguem as normas e regulamentações específicas para dispositivos médicos no Brasil, como as estabelecidas pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), conforme especificado nos equipamentos utilizados.

3.4 Levantamento de materiais

Os materiais utilizados na formulação do protótipo foram previamente selecionados com base em suas propriedades e funcionalidades. O Quadro 1 Descrição de função dos materiais do protótipo apresenta os materiais escolhidos, juntamente com suas respectivas funções, enquanto a Tabela 1 – Tabela descrição de custos descreve os custos envolvidos na aquisição desses materiais.

Quadro 1 – Descrição de função dos materiais do protótipo

Materiais	Descrição
Componente PZT	O componente PZT é denominado como Cristal piezelétrico, elemento presente no transdutor em aparelhos de ultrassom. Sua função principal é transformar a energia elétrica recebida da máquina em energia mecânica (vibrações ultrassônicas) de alta frequência gerando as ondas sonoras que são transmitidas aos tecidos permitindo micromassagem celular com finalidade terapêutica.
Massageador do tipo FES	Os massageadores tipo FES (Estimulação Elétrica Funcional) usam corrente elétrica para contrações musculares rítmicas (FES) visando fortalecimento/reabilitação e também para aliviar a dor (TENS).
Meia neurocompressora	A meia para neurocompressão é um acessório de compressão suave graduada que visa reduzir o inchaço, dar suporte ao pé/tornozelo e aliviar a dor associada à neuropatia.
Filamentos de TPU (Termoplástico de Poliuretano)	O filamento TPU é um material de impressão 3D flexível e elástico, altamente resistente a impactos e ao desgaste, mas exige baixas velocidades e atenção à umidade durante a impressão
Velcro	O velcro servirá como regulador para fixação protótipo e usuário, escolhido por sua qualidade, resistência e confortabilidade

Fonte: Autores

Tabela 1 – Tabela descrição de custos

Itens	Custos
Componente PZT – 1 unidade	R\$45,00
Massageador do tipo FES – 1 unidade	R\$10,00
Meia neurocompressora – 1 par	R\$21,00
Filamentos de TPU (Termoplástico de Poliuretano) – 1kg	R\$189,00
Velcro – 10 unidades circulares	R\$12,00
Total	R\$277,00

Fonte: Autores

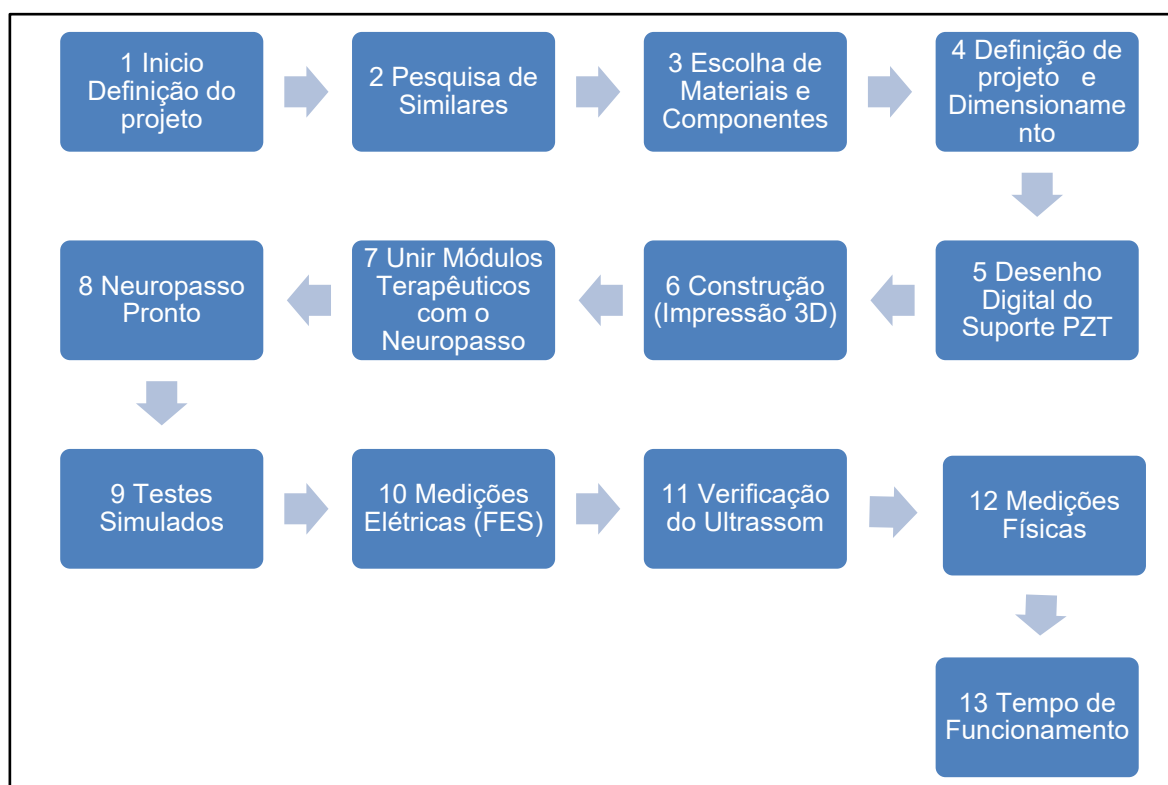
3.5 Desenvolvimento do protótipo

O desenvolvimento do protótipo Neuropasso seguiu um processo metodológico estruturado em treze etapas sequenciais, conforme detalhado na Figura 11 (Fluxograma do Desenvolvimento do Protótipo):

1. Definição do Projeto (1);
2. Pesquisa de Similares (2) para justificar a necessidade do dispositivo;
3. Escolha de Materiais e Componentes (3) que são: componente PZT (Cristal Piezelétrico); Massageador do tipo FES; Filamentos de TPU (Termoplástico de Poliuretano); Meia neurocompressora; Velcro;
4. Definição de Projeto e Dimensionamento (4), que foi a busca por um modelo de órtese mostrado nas Figura 7 e Figura 8;
5. Desenho Digital do Suporte PZT (5) Figura 10;

6. Construção (Impressão 3D) (6) da órtese, feita na impressora Ender 3 V3KE;
7. Com a órtese pronta Neuropasso Pronto (8);
8. Unir Módulos Terapêuticos com o Neuropasso (7) a montagem do protótipo é feita a partir da integração dos módulos terapêuticos;
9. Testes Simulados (9);
10. Medições Elétricas (FES) (10);
11. Verificação do Ultrassom (11);
12. Medições Físicas (12);
13. Tempo de Funcionamento (13).

Figura 11 – Fluxograma do Desenvolvimento do Protótipo



Fonte: Autores

4 RESULTADO

4.1 Resultados

A apresentação dos resultados inicia-se com o protótipo final Neuropasso, o qual foi construído e montado de acordo com o projeto e a modelagem 3D. A órtese, impressa em material TPU, integra-se aos componentes terapêuticos e acessórios para garantir a confortabilidade do usuário, sendo apresentada na Figura 11. O resultado do projeto cumpre a ideia principal de oferecer uma solução vestível que melhora a experiência sensorial para o tratamento do Tendão de Aquiles em crianças com TEA. Desta forma, o Neuropasso consolida-se como um meio alternativo que une a intervenção precoce já recomendada para a condição com a praticidade de uso e a facilidade de adaptação ao processo terapêutico.

Figura 11- O Neuropasso



Fonte: Autores

4.2 Testes

Para validação do funcionamento do protótipo, foram escolhidos testes funcionais básicos, que incluíram avaliação da funcionalidade de liga/desliga, a determinação do tempo de funcionamento, a medição de características elétricas, e a verificação de medições físicas tais como tamanho, peso, resistência estrutural, mostrado no Quadro 2 a seguir.

Quadro 2 – Descrição de função dos materiais do protótipo

Testes aplicados no protótipo	
Liga/Desliga:	Resultado Neuropasso
Botões	Funcional
Tempo de funcionamento:	Resultado Neuropasso
Cronometrado	20min de Funcionamento
Tempo de carregamento	1h20 de Carregamento
Modo de funcionamento	Intensidade do estímulo elétrico aplicado controlável e ultrassom contínuo 3Mhz
Medidas elétricas:	Resultado Neuropasso
Corrente do estímulo elétrico	35mA max
Tensão do estímulo elétrico	3.7V
Resistência do estímulo elétrico	105,71 Ohms
Intensidade do ultrassom	3Mhz
Medidas físicas:	Resultado Neuropasso
Altura	23,5cm
Comprimento	20cm
Circunferência	8cm
Numeração do calçado	Nº 28
Peso em gramas	179g
Flexibilidade	Confortável
Resistência estrutural	Resistente a impacto e fadiga

Fonte: Autores

4.3 Discussão

O protótipo Neuropasso é uma Tecnologia Assistiva acessível e ergonômica, capaz de superar as limitações de conforto e aceitação dos dispositivos ortopédicos convencionais em crianças com TEA e MD, . A prevalência da MD nesta população reforça a relevância do nosso design. A escolha do filamento de Termoplástico de Poliuretano (TPU) para a estrutura em impressão 3D, aliada à meia neurocompressora e ao velcro, garante ao dispositivo uma flexibilidade confortável e resistência estrutural.

Em uma análise comparativa com similares, como o Eletroestimulador TENS Para Tornozelo EM27 (BEURER), reconhecemos a coincidência de princípio terapêutico e foco no tratamento. Porém, o Neuropasso apresenta diferenciais que o distinguem do equipamento BEURER, que atua apenas com eletroestimulação funcional para dor, inflamação e relaxamento geral. Os requisitos do Neuropasso, como a dupla atividade terapêutica, a disponibilidade e o foco no tratamento precoce da marcha digitígrada, formam o seu diferencial. O Neuropasso oferece intervenções eficazes para a MD, fundamentadas na literatura: Medeiros et al. (2007) explica a atividade da eletroestimulação em músculos localizados, e Carci (2018) demonstra o funcionamento do modo de terapia ultrassônica, que atua em conjunto com a órtese corretiva do padrão de marcha.

Dessa forma, afirmamos a relevância e o diferencial do equipamento desenvolvido para o mercado e para profissionais que utilizam eletroestimulação. Poucos dispositivos priorizam a acessibilidade sensorial e o conforto infantil em sua função. O Neuropasso integra a estimulação elétrica funcional do músculo, ultrassonoterapia para relaxamento do tendão rígido e a órtese para correção postural, conduzindo o padrão de marcha do paciente ao ideal.

Esta ferramenta foi concebida focando na intervenção precoce, visando o uso por profissionais da saúde em crianças na faixa etária de 5 a 6 anos. Ao auxiliar o relaxamento do músculo e do tendão, o Neuropasso permite que a marcha digitígrada diminua progressivamente e, por consequência, estimule o desenvolvimento da marcha padrão.

Ao permitir uma intervenção precoce, sensorialmente mais aceitável, o Neuropasso aborda o tratamento de forma lúdica e personalizada. Esta abordagem é defendida pela literatura sobre Tecnologia Assistiva (TA) como fundamental para a promoção da melhoria na qualidade de vida de crianças com TEA (Rodrigues et al., 2024; Silva et al., 2024).

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho atingiu seu objetivo ao desenvolver e validar o protótipo Neuropasso, estabelecendo-o como uma promissora Tecnologia Assistiva. O dispositivo apresenta uma solução acessível e ergonômica para o tratamento precoce da Marcha Digitígrada em crianças com Transtorno do Espectro Autista, superando as limitações de conforto e aceitação de órteses rígidas convencionais. A integração dos tratamentos de Estimulação Elétrica Funcional e Ultrassom, aliada à escolha do Filamento de TPU, resultou em um custo total de R\$ 277,00 e demonstrou viabilidade técnica com 20 minutos de funcionamento. Portanto, o Neuropasso atinge sua proposta inicial, quanto a progressão da condição e evitando a necessidade de procedimentos cirúrgicos.

REFERÊNCIAS

ALVES, Matheus Porto *et al.* **Tratamento da marcha na ponta dos pés em pacientes com transtorno do espectro autista: Uma revisão integrativa da literatura.** 2024.

Disponível em:

<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/download/45711/36383/475460>. Acesso em: 24 abr. 2025

BEURER. **Eletroestimulador Tens Para Tornozelo Em27- BEURER.** [s.d.]

Disponível em: <https://www.mercadolivre.com.br/up/MLBU1941787724>. Acesso em: 06 out. 2025.

CARCI. **FESMED II – Eletroestimulador FES + TENS 2 Canais: Manual do Usuário. Versão 3.2.** São Paulo, 2021. Disponível em:

https://carcioficial.com.br/manuais_carci/Fesmed_II_4052_manual.pdf. Acesso em: 27 set. 2025.

CARCI. **SONOMED IV 4144: manual do usuário.** 2018 Disponível em:

https://carcioficial.com.br/manuais_carci/Sonomed_IV_4144_manual.pdf. Acesso em: 11 out. 2025.

CARELLI, Núbia. **Fisioterapia - Recursos Terapêuticos - UFVJM:** exercício disciplina recursos terapêuticos I-ultrassom terapêutico. Exercício disciplina recursos terapêuticos I-ULTRASSOM TERAPÊUTICO. Disponível em:

<http://rtufvjm.blogspot.com/2011/10/exercicio-disciplina-recursos.html>. Acesso em: 09 out. 2025.

DELLAS MUNDO ON. **Órtese Suropodálica Articulada Infantil Tala Equino Pé**

Caído. [s.d.] Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-5061051374-ortese-suropodolica-articulada-infantil-tala-equino-pe-caido- JM>. Acesso em: 06 out. 2025.

MEDEIROS, Ana Helena de Oliveira; CHALEGRE, Sintya Tertuliano; CARVALHO, Celina Cordeiro de. **Eletroestimulação muscular: alternativa de tratamento coadjuvante para pacientes com doença arterial obstrutiva periférica.** 2007.

Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/jvb/a/MhXbn6yv7DqgZzVQk9THbhd/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 24 abr. 2025.

MERCADO LIVRE. **6 Pares De Meias De Neurocompressão Aliviam A Dor.** [s.d.]

Disponível em: <https://www.mercadolivre.com.br/6-pares-de-meias-de-neurocompresso-aliviam-a-dor/p/MLB2007416199>. Acesso em: 26 ago. 2025.

MERCADO LIVRE. **Filamento TPU 1.75 MM Filamento Para Impressora 3D.** [s.d.]

Disponível em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-5670092818-filamento-tpu-175-mmfilamento-para-impressora-3d- JM?searchVariation=185186428260#polycard_client=search-nordic&searchVariation=185186428260&search_layout=grid&position=5&type=item&tracking_id=672a0033-03e7-40b5-9334-1a0b7979faea. Acesso em: 26 ago. 2025.

MERCADO LIVRE. **Mini Massageador Elétrico Portátil**. Disponível em: https://www.mercadolivre.com.br/mini-massageador-eletrico-portatil/p/MLB25586246#polycard_client=search-nordic&search_layout=stack&position=7&type=product&tracking_id=4821dde3-8f45-44eb-8a56-bdbc5505778&wid=MLB5524386778&sid=search. Acesso em: 26 ago. 2025.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **O que é Tecnologia Assistiva?** Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-de-a-a-z/s/saude-da-pessoa-com-deficiencia/faq/o-que-e-tecnologia-assistiva>. Acesso em: 07 nov. 2025

NEUMANN, Donald A. **Cinesiologia do aparelho musculoesquelético: Fundamentos para reabilitação**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=DmRfZg5chjoC&printsec=copyright&hl=pt-BR#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 24 ago. 2025.

RODRIGUES, Lucimeire Martins *et al.* **A INTERVENÇÃO NEUROMOTORA NO TRATAMENTO FISIOTERAPÊUTICO NO DESENVOLVIMENTO MOTOR DE CRIANÇAS COM TRANSTORNO DO ESPECTRO AUTISTA**. 2024. Disponível em: <https://www.bioscienceshealth.com.br/index.php/jbh/article/view/43/16>. Acesso em: 24 abr. 2025.

SALVIN, Tania F. *et al.* **Efeitos da eletroestimulação e do alongamento muscular sobre a adaptação do músculo desnervado – implicações para a fisioterapia**. 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbfis/a/76d4DxDN7TffVJ9g9Kp4nND/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 24 abr. 2025.

SILVA, Elisabete Francisca da. *et al* **Intervenções fisioterapêuticas para melhoria da coordenação motora em crianças autistas**. 2024. Disponível em: <https://editoralicyri.com.br/index.php/ojs/article/view/537>. Acesso em: 24 abr. 2025

SOUSA, Edson Flavio de. **Efeitos da eletroestimulação neuromuscular em pacientes críticos: uma revisão de literatura**. São Paulo, 2017. Disponível em: https://ses.sp.bvs.br/wp-content/uploads/2017/07/PAP_Edson-Flavio-de-Sousa_2017.pdf. Acesso em: 25 ago. 2025.

TAKE CARE. **Bota Imobilizadora Ortopédica Curta Bilateral Take Care**. [s.d.] Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-5287753796-bota-imobilizadora-ortopedica-curta-bilateral-take-care- JM>. Acesso em: 06 out. 2025.

ZOBOLI, Dr. Alejandro. **Marcha na Ponta dos Pés**. 2023. Disponível em: <https://alejandrozoboli.com.br/post/marcha-na-ponta-dos-pes/>. Acesso em: 10 maio 2025.

3DEVRN. **AFO - Ankle Foot Orthosis • STL files**. [Modelo de impressão 3D]. Cults3D, [S.l.], [s.d.]. Disponível em: <https://cults3d.com/m/2010016>. Acesso em: 06 nov. 2025.