

Design ergonômico: aplicação da impressão 3D como ferramenta de prototipagem rápida de um apoio de pés

* Juliana Fernandes Pereira é professora Adjunta do Curso de Design da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Doutora e Mestra em Design pela UNESP, com ênfase em Ergonomia. Atua em pesquisas sobre desenvolvimento de produtos voltados à saúde, usabilidade e experiência do usuário, com foco em promover o bem-estar e a inclusão. Possui graduação em Design de Produto (UNESP) e experiência em projetos sobre brinquedos e desenvolvimento infantil no TEA. Na UNIFEI, integra o NDE e o Colegiado de Design, dedicando-se à inovação pedagógica, formação acadêmica e integração entre ensino, pesquisa e prática profissional.

<juliana@unifei.edu.br>

ORCID 0000-0001-8023-6811

Resumo A permanência prolongada na posição sentada, intensificada pelo avanço das tecnologias digitais e pelo crescimento do trabalho remoto, tem gerado impactos negativos à saúde, agravando casos da Doença Venosa Crônica. Como alternativa para minimizar o sedentarismo e seus efeitos, este artigo apresenta o desenvolvimento de um protótipo de apoio de pés ergonômico, com foco na aplicação da prototipagem rápida como ferramenta de experimentação funcional. Foram utilizadas técnicas de modelagem tridimensional e impressão 3D pelo método FDM, com materiais como PLA e nylon, que atenderam aos requisitos de resistência, acabamento e articulação. O processo criativo e iterativo em design permitiu ajustes estruturais e a exploração de mecanismos de regulagem voltados à ergonomia. Os resultados indicam que a prototipagem rápida por impressão 3D representa uma estratégia viável e eficiente para o desenvolvimento de produtos físicos e ergonômicos, promovendo abordagens ágeis e sustentáveis no design aplicado à saúde e ao conforto no ambiente de trabalho.

Palavras-chave Ergonomia, Projeto, Produto.

Rodolfo Nucci Porsani é Doutor, Mestre e Bacharel em Design de Produto pela UNESP. Pesquisador vinculado ao Laboratorio di Ergonomia e Design (LED), Dipartimento di Architettura

(DIDA), Università degli Studi di Firenze (UNIFI), Itália. Atua em Design de Produto, com ênfase em UX Design, Design Centrado no Usuário, Design Emocional, Tecnologia Assistiva e Cultura Maker. Foi professor no SENAI Firjan e é membro dos laboratórios LEI, LABSOL (UNESP), LEXUS (UFRN) e da Rede de Pesquisa em Tecnologia Assistiva (RPDTA), além da Red de Investigadores en Diseño da Universidad de Palermo (Argentina).

[<rodolfonporsani@gmail.com>](mailto:rodolfonporsani@gmail.com)

ORCID 0000-0003-3013-6665

Ergonomic Design: application of 3D printing as a Rapid Prototyping Tool for a footrest

Abstract *Prolonged sitting, intensified by the advancement of digital technologies and the growth of remote work, has negatively impacted health, contributing to the worsening of Chronic Venous Disease. As an alternative to reduce sedentary behavior and its effects, this article presents the development of an ergonomic footrest prototype, emphasizing the use of rapid prototyping as a tool for functional experimentation. Three-dimensional modeling and 3D printing using the FDM method were applied, with materials such as PLA and nylon meeting the requirements for strength, finish, and articulation. The iterative and creative design process enabled structural adjustments and the exploration of ergonomically focused adjustment mechanisms. The results indicate that rapid prototyping via 3D printing is a viable and efficient strategy for developing physical and ergonomic products, promoting agile and sustainable approaches in design aimed at health and workplace comfort.*

Keywords Ergonomics, Project, Product.

Diseño ergonómico: aplicación de la impresión 3D como herramienta de prototipado rápido de un apoyapiés

Resumen *La permanencia prolongada en la posición sentada, intensificada por el avance de las tecnologías digitales y el crecimiento del trabajo remoto, ha generado impactos negativos en la salud, contribuyendo al agravamiento de la Enfermedad Venosa Crónica. Como alternativa para reducir el sedentarismo y sus efectos, este artículo presenta el desarrollo de un prototipo de apoyo para pies ergonómico, destacando el uso de la prototipación rápida como herramienta de experimentación funcional. Se aplicaron técnicas de modelado tridimensional e impresión 3D mediante el método FDM, utilizando materiales como PLA y nailon, que cumplieron con los requisitos de resistencia, acabado y articulación. El proceso creativo e iterativo en diseño permitió realizar ajustes estructurales y explorar mecanismos de regulación orientados a la ergonomía. Los resultados indican que la prototipación rápida mediante impresión 3D constituye una estrategia viable y eficiente para el desarrollo de productos físicos y ergonómicos, promoviendo enfoques ágiles y sostenibles en el diseño aplicado a la salud y al confort en el entorno laboral.*

Palabras clave Ergonomía, Proyecto, Producto.

Introdução

Nos últimos anos, tem-se observado um aumento expressivo na permanência da postura sentada, impulsionada pelas novas dinâmicas laborais, pela incorporação de tecnologias digitais, pela adoção de sistemas mecânicos, informatizados e automatizados, além das atuais formas de lazer sedentário e da popularização do home office intensificado após a pandemia de SARS-CoV-2 (Losekann; Mourão, 2020; Jakobsson *et al.*, 2020; Coenen *et al.*, 2017).

Diversas pesquisas recentes têm evidenciado os efeitos nocivos desse comportamento sobre o corpo humano, como alterações musculares, articulares e circulatórias (Raiol, 2020). Entre os membros inferiores, destaca-se a Doença Venosa Crônica (DVC), condição recorrente cuja incidência cresce entre adultos jovens e profissionais submetidos a longos períodos na postura sentada (Silva *et al.*, 2008).

A DVC, de caráter progressivo, resulta da hipertensão venosa que compromete o retorno sanguíneo e gera manifestações clínicas de diferentes intensidades. Apesar de sua gravidade, há alternativas capazes de reduzir ou reverter o quadro (Silva; Procópio; Motta-Santos, 2020). Entre elas, a prática regular de exercício físico, sobretudo o ativo, mostra-se mais eficaz para a ativação da bomba sural e o retorno venoso quando comparado ao exercício passivo ou ao repouso (Campos; Albuquerque; Braga, 2008).

Nesse panorama, o design ergonômico assume papel essencial ao propor soluções projetuais que integrem aspectos funcionais, simbólicos e materiais. E a prototipagem rápida, especialmente pela impressão 3D, surge como estratégia eficiente para o desenvolvimento iterativo em design, viabilizando a experimentação de materiais como PLA, ABS e nylon, além de testes de funcionalidade, ajustes estruturais e avaliações preliminares de usabilidade, otimizando o desempenho do produto desde as fases iniciais (Alcade; Wiltgen, 2018).

Assim, este artigo apresenta o desenvolvimento de um protótipo de apoio de pés ergonômico com movimento ativo, enfatizando a prototipagem rápida como ferramenta projetual voltada à promoção da saúde vascular e do bem-estar em contextos de sedentarismo prolongado.

Referencial teórico – O sedentarismo e a Doença Venosa Crônica

Conforme a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2016), o sedentarismo figura entre os principais fatores que favorecem o surgimento de doenças relacionadas à circulação venosa, especialmente nos membros inferiores. Em um cotidiano cada vez mais marcado pela inatividade física e pela adoção de novas formas de trabalho na posição sentada, muitas pessoas desconhecem os impactos silenciosos que a falta de movimento pode provocar no organismo. Segundo Silva, Procópio e Motta-Santos (2020), o

sistema venoso tem a função de conduzir o sangue desoxigenado de volta ao coração após a circulação pelos músculos e pela pele. Quando essa função é comprometida, seja por falhas nas válvulas venosas ou pela diminuição da força muscular nas pernas, especialmente na panturrilha, ocorre o acúmulo de sangue nas veias, processo conhecido como estase venosa. Esse acúmulo reduz o fluxo sanguíneo e dilata as veias, favorecendo a hipertensão venosa, capaz de desencadear diversas alterações negativas, desde modificações anatômicas até impactos nos tecidos mais profundos.

De acordo com Lurie *et al.* (2020), a hipertensão venosa pode progredir devido ao refluxo sanguíneo, obstruções ou à falha da “bomba muscular” das pernas, permitindo que o sangue vaze para os tecidos circundantes, gerando inflamações cutâneas e, ao longo do tempo, complicações graves como úlceras ou perda da mobilidade. Esse conjunto de alterações caracteriza a Doença Venosa Crônica (DVC), cuja intensidade varia entre os indivíduos (Santos *et al.*, 2009), sendo uma das principais causas de incapacidade e desconforto, podendo manifestar sinais e sintomas desde leves até severos (Silva; Procópio; Motta-Santos, 2020).

A importância dos apoios de pés que garantem

Considerando que o sedentarismo ocupacional é um fator relevante para o agravamento da Doença Venosa Crônica (DVC) (Gloviczki *et al.*, 2011), implementar estratégias que incentivem a movimentação ativa dos membros inferiores torna-se essencial para prevenção e controle da condição. Nesse cenário, a ergonomia assume papel fundamental ao adequar o ambiente e os equipamentos às características anatômicas e fisiológicas do trabalhador, promovendo saúde e conforto (Silva; Procópio; Motta-Santos, 2020). Assim, o design ergonômico aplicado a soluções como o apoio de pés pode melhorar a postura e estimular movimentos que favoreçam a circulação sanguínea, minimizando os efeitos do sedentarismo (Cavalheri, 2010; Campos; Albuquerque; Braga, 2008; Sherman; Hedge, 2003; McKeown, 2007).

Sherman e Hedge (2003) e Scatolim (2017) demonstram que apoios de pés com movimentação passiva proporcionam melhores efeitos circulatórios nos membros inferiores do que apoios estáticos, refletindo em significativa redução da circunferência da panturrilha e possível diminuição de edema. Mohammadian *et al.* (2021) também analisam benefícios de apoios com movimentação ativa; seu protótipo, inspirado na parte inferior de uma bicicleta, aplicado a 20 funcionários de escritório, apresentou melhorias na saúde dos membros inferiores, embora tenha registrado baixa aceitação devido a interferências nas habilidades cognitivas durante o trabalho.

Diante desses achados, o desenvolvimento de protótipos com movimentos ativos surge como estratégia importante na prevenção da DVC em ambientes laborais, impondo desafios sobre o tipo de movimento a ser implementado. Por isso, o design ergonômico deve integrar soluções funcionais, estéticas e simbólicas, considerando a escolha consciente de materiais

e processos seguros, sustentáveis e passíveis de iteração. A prototipagem rápida, especialmente via impressão 3D, permite testar diferentes composições de materiais e configurações construtivas, favorecendo ajustes contínuos e aprimoramentos de forma e função (Alcade; Wiltgen, 2018).

Além disso, é fundamental incorporar aspectos de usabilidade, atendendo às necessidades reais dos usuários. Para tanto, recomenda-se a aplicação dos critérios da Norma ISO 9241-11 (2011), que define usabilidade a partir de eficácia, eficiência e satisfação (Da Silva Costa; Amaral, 2021). Quando bem aplicados, esses critérios, conforme Nielsen (1993), garantem facilidade de aprendizado, eficiência no uso, retenção da operação após períodos de inatividade, redução de erros e satisfação subjetiva. Caso a eficácia não seja alcançada, podem surgir riscos relacionados à segurança do produto.

Embora comumente avaliada por esses três parâmetros, a usabilidade é influenciada por elementos além da funcionalidade objetiva. Os aspectos funcionais, estéticos e simbólicos, destacados por Löbach (2001), interferem na percepção e interação do usuário com o produto. A eficácia é potencializada quando a função do objeto é clara; já a eficiência, quando o design físico funcional se alia a elementos visuais que favorecem a compreensão; e a satisfação, quando a experiência sensorial e emocional é positiva, influenciada tanto pela estética quanto pelo significado simbólico atribuído ao produto (Cardoso, 2013; Silva, 2019).

Prototipagem rápida por meio do processo de impressão 3D FDM

De acordo com Silva e Stati (2021), o termo “prototipagem” constitui um dos métodos fundamentais para transformar ideias em representações tangíveis. E a “prototipagem rápida”, por sua vez, caracteriza-se como uma técnica de produção de protótipos por adição de material. Atualmente, o termo “impressão 3D” se destaca como um recurso amplamente utilizado nesse contexto, devido à facilidade de acesso a equipamentos e insumos em lojas físicas ou online (Silva; Stati, 2021). Além dessa acessibilidade, a construção dos objetos para impressão 3D apresenta simplicidade operacional, o que está associado à eficiência de suas etapas, conforme Oliveira *et al.* (2009): modelagem virtual do objeto em software CAD 3D, criando um sólido tridimensional que é posteriormente seccionado em camadas horizontais, cuja espessura é configurável na impressora 3D (Alcalde; Wiltgen, 2018); conversão do modelo para o formato STL, baseado em malhas triangulares de superfície; processamento e análise dos dados do arquivo digital; impressão camada por camada do objeto; e pós-impressão, incluindo remoção de suportes e resíduos excedentes.

A qualidade da impressão depende de parâmetros como espessura das camadas, nivelamento da mesa, temperatura, especificações do equipamento, orientação de impressão e processos de pré e pós-tratamento (Oliveira *et al.*, 2009). Entre as tecnologias de impressão 3D, destacam-se Estere-

olitografia (SLA), Sinterização Seletiva a Laser (SLS) e Fusão por Deposição de Material (FDM). O processo FDM é amplamente empregado atualmente por sua velocidade e baixo custo, reduzindo desperdício de material, consumo de energia e tempo de produção (Alcalde; Wiltgen, 2018).

Neste projeto, optou-se pela tecnologia FDM, utilizando impressoras de mesa acessíveis e filamentos termoplásticos fundidos e depositados camada a camada, com movimentação controlada do extrusor e da mesa nos eixos X, Y e Z (Alcalde; Wiltgen, 2018).

Os materiais escolhidos para o projeto, compatíveis com FDM, foram: PLA (ácido polilático), poliéster alifático obtido a partir do ácido láctico derivado da fermentação da glicose do milho, fonte renovável. É um termoplástico biodegradável, rígido e frágil, com boa resistência à tração e impressão de alta resolução, utilizado em bases e coberturas do protótipo (Brito *et al.*, 2012; Ultimaker, 2017a; Kumar *et al.*, 2010). E o nylon é um material de alta durabilidade, resistente à abrasão, com baixo atrito e boa resistência à fadiga mecânica, empregado na peça interna do pedal, submetida a constante atrito (Ultimaker, 2017b).

Metodologia

Este estudo adotou uma abordagem qualitativa e aplicada para o desenvolvimento de um protótipo ergonômico de apoio de pés com movimento ativo, voltado à prevenção da Doença Venosa Crônica (DVC). Inicialmente, foram coletados dados e feedbacks de usuários sobre critérios de usabilidade, considerando os três aspectos centrais de Löbach (2001): função, estética e simbolismo, bem como a percepção e experiência do usuário (Cardoso, 2013). Para isso, utilizou-se um protótipo pré-existente desenvolvido pelos autores, com o objetivo de compreender necessidades, limitações e expectativas dos usuários.

A partir dessas informações, foi aplicado um processo iterativo e livre em design, abrangendo pesquisa, esboços, modelagem virtual e prototipagem rápida por impressão 3D, fundamentado em princípios ergonômicos e de usabilidade conforme a norma ISO 9241-11 (2011). O processo criativo se apoiou no método hipotético-dedutivo, que, segundo Ensslin e Vianna (2008) e Popper (1993), valoriza a formulação e teste de hipóteses, promovendo o avanço por ciclos de tentativa e erro, orientando a proposição de melhorias funcionais e estéticas.

Resultados

O protótipo anterior criado pelos autores serviu como referência para o desenvolvimento do projeto atual, especialmente na identificação das características essenciais de função e uso de um apoio plantar. Embora observasse princípios básicos de design ergonômico, sua avaliação apontou

lacunas que demandavam revisões mais abrangentes nos aspectos funcionais, estéticos e simbólicos. Para aprofundar o entendimento das necessidades dos usuários, foi realizada uma análise da relação social do usuário com o protótipo antigo, considerando critérios de usabilidade baseados em Löbach (2001), função, estética e simbolismo, e Cardoso (2013), abrangendo fatores cognitivos e de experiência: ponto de vista do usuário, discurso sobre o uso do protótipo e percepção.

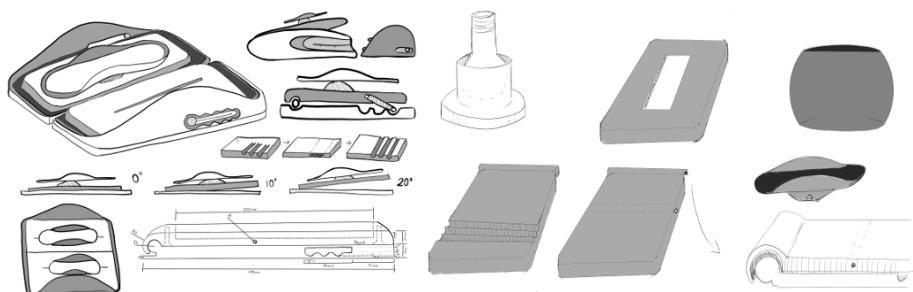
Dessa análise emergiram quatro prioridades de melhoria: estabilidade (função), intuitividade (função e simbolismo), regulagem (função) e agradabilidade visual (estética). Esses insights orientaram a geração de novas ideias, por meio de esboços 2D e 3D, incorporando funcionalidades como: bases amplas e estáveis; simulação de marcha intuitiva; mobilização do tornozelo com regulagens adequadas para estimular a musculatura da panturrilha e favorecer o retorno venoso; e cores sóbrias e formas orgânicas adequadas a ambientes corporativos.

Geração de alternativas e esboços

A fase de esboços é essencial no desenvolvimento do projeto, pois direciona etapas subsequentes, metodologias e ferramentas (Munari, 1981). Foram produzidos desenhos iniciais visando atender às demandas identificadas: definição de formato orgânico simplificado para transmitir leveza; base ampla e próxima ao chão para garantir estabilidade; cores sóbrias adequadas a ambientes de trabalho; encaixes que permitissem regulagem de altura e ângulo; e componentes que possibilitassem simulação da marcha e movimentação do tornozelo, promovendo ativação da articulação talocrural e do músculo da panturrilha.

Figura 1 - Esboços para definição de formato.

Fonte: Os autores, 2024.



Modelagem virtual

Para avaliar a viabilidade funcional de encaixes, ângulos e dimensões dos esboços, cada componente foi modelado virtualmente, seguindo as normas ISO 9241-11 (2011) e os parâmetros ergonômicos da NR-17 Brasil (2022), utilizando o software SolidWorks 2020. De acordo com essas diretrizes, um apoio de pés ergonômico capaz de atender aos extremos dos percentis apresenta inclinação de 20°, posicionando-se a 14 cm do plano

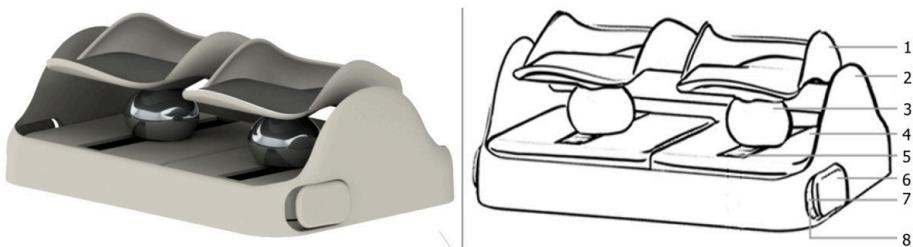
horizontal, com regulagem que permite elevar seu ponto máximo até 28 cm do chão (INT, 1995).

Com base nessas especificações, iniciou-se a modelagem no ambiente CAD, permitindo visualização volumétrica, simulação de movimentos e avaliação técnica dos componentes (Alcade; Wiltgen, 2018). Cada peça do protótipo foi desenvolvida individualmente no módulo “peça” do SolidWorks 2020, utilizando ferramentas como linha, filete de esboço, retângulo central, círculo, arco de três pontos, spline, linha de centro, espelhamento de entidades, padrões circulares, adição de dimensões, aparar entidades e geometria de referência para criação em outros planos. Após a finalização dos esboços, estes foram transformados em sólidos por meio de recursos da aba “recursos”, como ressalto/base extrudado, base revolucionada, corte extrudado, filete inclinado, furo simples, assistente de furação, casca, escala e ferramentas de superfícies.

A verificação de compatibilidade e funcionamento entre as peças ocorreu no ambiente “montagem”, permitindo a inserção, movimentação e posicionamento dos componentes, garantindo a análise de encaixes e articulações. Após a montagem virtual completa, iniciou-se a renderização do protótipo (Figura 2, à esquerda).

Figura 2 - Renderização final.

Fonte: Os autores, 2024.



Funcionalmente, o apoio articulado de pés (Figura 2, à direita) integra diferentes elementos estruturais. Destacam-se as bases de encaixe deslizante inferior (8) e superior (7), cobertas por uma peça (4) que permite inclinação do sistema em ângulos de 0°, 15° e 25° em relação à base. Essa cobertura protege os mecanismos internos e oculta o componente de simulação da marcha (5), acoplado a um mecanismo giratório (3) que possibilita rotação de 360° do pedal (1) sobre eixo pivotante. A inclinação do pedal favorece movimentos de inversão, eversão, dorsiflexão e flexão plantar, estimulando a articulação do tornozelo e a musculatura dos membros inferiores. A superfície do pedal apresenta conformação anatômica leve na região do calcanhar, facilitando o gesto de impulsão da marcha. Nas laterais (2) há orifícios que permitem ajuste da angulação das bases por meio de botão rosqueável (6) conectado ao mecanismo interno. Ressalta-se que o dispositivo está em processo de registro de comunicação de inovação na AUNI (Agência UNESP de Inovação), modalidade “Outros – Desenho Industrial”, sob o número 24C017.

Escolha do material e prototipagem rápida

Os materiais selecionados tiveram como critérios a sustentabilidade, estética, resistência e acabamento. O filamento PLA (poliéster alifático), biodegradável e derivado de fontes renováveis, foi utilizado para as peças plásticas principais, devido à sua elevada resistência à tração e à facilidade de acabamento estético e funcional (Melo, 2012).

A impressão 3D foi realizada por meio da técnica FDM (Fused Deposition Modeling), que deposita camadas de filamento derretido com precisão, sendo reconhecida como uma opção econômica e eficiente para prototipagem rápida (Alcade; Wiltgen, 2018). Parâmetros como altura da camada, espessura da parede e densidade de preenchimento foram ajustados para assegurar resistência estrutural e qualidade superficial (Tabela 1).

Tabela 1 - Parâmetros de impressão.

Fonte: Os autores, 2024.

Parâmetro/Filamento	Valor/PLA
Altura da camada	0,25mm
Espessura da parede	2,0mm
Preenchimento área interna	0,40mm
Preenchimento do acabamento	0,15mm
Temperatura máxima do bico de extrusão	260°C
Velocidade máxima de impressão	150mm/s

Quanto à quantidade de material extrudado pelo bico extrusor da impressora 3D, variou de 0,40 mm nas regiões que exigiam maior resistência mecânica, a 0,15 mm nas superfícies e áreas que demandavam acabamento fino e textura uniforme, sem rugosidades perceptíveis, garantindo funcionalidade e estética adequadas ao protótipo.

Montagem e ajuste final

Com as peças prontas, procedeu-se à montagem manual, utilizando ferramentas específicas para assegurar encaixes firmes e estabilidade estrutural. O mecanismo rotativo do pedal, fabricado em nylon, permite movimentos de 360º com inclinação lateral de até 60º, simulando inversão, eversão, dorsiflexão e flexão plantar (figura 3).

Figura 3 - Protótipo montado e aplicado em ambiente de trabalho.

Fonte: Os autores, 2024.



Esses movimentos contribuem para a mobilidade da articulação talocrural e estimulam o músculo da panturrilha, favorecendo o retorno venoso. O sistema de rotação do pedal é composto por três componentes que garantem deslizamento suave do eixo, regulado por uma capa protetora rosqueável que controla a amplitude do movimento.

Também foram incorporados outros componentes no protótipo para permitir os movimentos, ângulos e ajustes necessários (Tabela 2).

Tabela 2 - Componentes do protótipo.

Fonte: Os autores, 2024.

QTD	COMPONENTE
02	Peça da base inferior impressa
02	Peça da base intermediária impressa
02	Peça superior da base impressa
02	Pedal impresso
02	Mecanismo de rotação do pedal em nylon
02	Capa para a peça de rotação do pedal impressa
01	Barra de 1 metro de rosca sem fim de diâmetro de $\frac{1}{4}$ de polegada
08	Parafusos de rosca soberba para a rosca sem fim
04	Arruelas
02	Mecanismo de corrediça de 20 cm simulador da marcha
10	Parafusos
10	Porcas
04	Porcas rebite
04	Placas de alumínio de 1mm de espessura
60cm	Fita de borracha adesiva

Discussões

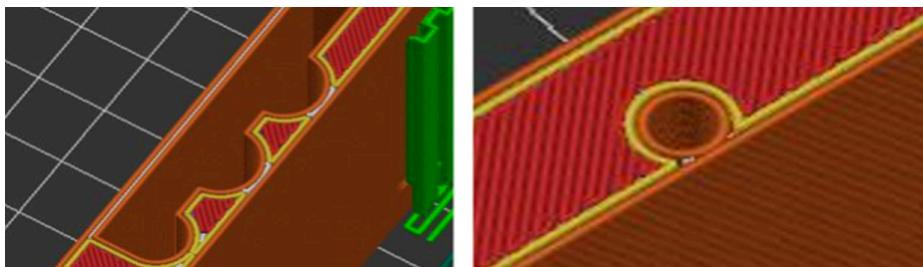
Antes da definição do formato final, o protótipo passou por diversas alterações estruturais e estéticas. Durante seu desenvolvimento, identifi-

caram-se limitações de projeto que impactaram o resultado final. Algumas dessas questões foram solucionadas ainda nas fases de modelagem virtual e impressão, enquanto outras somente puderam ser corrigidas durante a montagem física. Embora as dimensões tenham sido estabelecidas com base em parâmetros ergonômicos predefinidos, a verificação prática só foi possível após a impressão, permitindo avaliar folgas, encaixes e deslizamentos com precisão milimétrica.

Na análise prévia à impressão, foram identificados problemas em regiões próximas a rasgos e furos passantes, consideradas críticas para a resistência mecânica do PLA (Santana *et al.*, 2016). Considerando que o PLA pode deformar-se por variações de temperatura durante a impressão (Alcade; Wiltgen, 2018), optou-se por aumentar a altura e largura desses rasgos para garantir maior robustez (Figura 4).

Figura 4 - Problemas referentes à espessura da peça.

Fonte: as autores, 2024.



Algumas adaptações ocorreram apenas após testes com protótipos físicos. Por exemplo, a base inferior foi modificada para ampliar o rasgo passante (Figura 4 à direita), facilitando o deslizamento da barra metálica, que junto a outros componentes (placas de alumínio, porcas, rosca e rebites) compõe o mecanismo de angulação entre as bases inferior e superior. Os rasgos (Figura 4 à esquerda) também foram ajustados e inclinados, assegurando melhor fixação e facilidade no ajuste dos níveis de inclinação, enquanto uma trava circular foi incorporada para evitar movimentos indesejados.

Durante a montagem, desafios materiais permaneceram. O PLA, apesar de biodegradável e de baixo custo, possui baixa temperatura de fusão ($\sim 175^{\circ}\text{C}$) e transição vítreia ($\sim 65^{\circ}\text{C}$) (Santana *et al.*, 2016), o que ocasionou pequenas deformações e descolamentos durante a remoção de rebarbas e lixamento, principalmente em peças pigmentadas. A inserção da barra de rosca sem fim com furadeira causou leve deformação por fricção térmica, exigindo remodelagem manual via imersão em água quente.

Considerando essas limitações térmicas, recomenda-se, para futuras reproduções, a utilização de materiais com maiores temperaturas de fusão e transição vítreia, garantindo maior resistência mecânica e térmica (Oliveira *et al.*, 2009; Melo, 2012). Entretanto, as dimensões projetadas podem ser mantidas, já que foram dimensionadas para minimizar deformações. Sugere-se ainda que o protótipo seja utilizado em ambientes frescos, evitando temperaturas acima da transição vítreia do PLA e prevenindo alterações estruturais e moleculares (Santana *et al.*, 2016).

Considerações finais

O desenvolvimento do protótipo ergonômico de apoio plantar com movimentação ativa evidenciou a relevância do design na criação de soluções que integram aspectos funcionais, estéticos e simbólicos, promovendo aderência e conforto para usuários em situações de permanência prolongada na posição sentada.

O processo criativo foi essencial para identificar limitações do protótipo anterior e propor melhorias eficazes, especialmente em estabilidade, intuitividade, regulagem e estética, resultando em um produto alinhado às necessidades reais dos usuários. A utilização da modelagem 3D e da prototipagem rápida facilitou visualização, ajustes e correções técnicas, além de otimizar tempo e custos de desenvolvimento.

Desafios relacionados ao material foram identificados, principalmente devido às propriedades térmicas e mecânicas do PLA, apontando a necessidade de pesquisas futuras com materiais alternativos que ofereçam maior durabilidade e resistência sem comprometer a sustentabilidade.

O protótipo desenvolvido demonstra potencial inovador para promover saúde postural e vascular em trabalhadores que enfrentam sedentarismo, estimulando o movimento dos membros inferiores e melhorando a circulação sanguínea. Este trabalho reforça o papel estratégico do design ergonômico na promoção de estudos sobre prototipagem rápida, seleção de materiais e saúde humana, abrindo possibilidades para soluções integradas, funcionais e acessíveis.

Referências

ALCALDE, E.; WILTGEN, F. **Estudo das tecnologias em prototipagem rápida: passado, presente e futuro.** Revista de Ciências Exatas da Universidade de Taubaté, v. 24, n. 2, p. 12–20, 2018.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Previdência. Norma Regulamentadora nº 17 – Ergonomia (atualizada pela Portaria MTP nº 423, de 7 de outubro de 2021). Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho>. Acesso em: 8 ago. 2025.

BRITO, G. F. et al. **Tenacification of poly (lactic acid) by the addition of the terpolymer (ethylene / methyl acrylate / glycidyl methacrylate).** Poly: Science and Technology, v. 22, n. 2, 2012.

CAMPOS, C. C. C.; ALBUQUERQUE, P. C.; BRAGA, I. J. S. **Avaliação do volume de fluxo venoso da bomba sural por ultra-sonografia Doppler durante cinesioterapia ativa e passiva: um estudo piloto.** Jornal Vascular Brasileiro, v. 7, n. 4, p. 325–332, 2008.

CARDOSO, G. C. **Avaliação de experiência do usuário durante o desenvolvimento de um aplicativo social móvel.** Dissertação (Mestrado em Design) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2013.

CAVALHERI, G. **Correlação da hemodinâmica e da mobilidade do tornozelo com o quadro clínico da doença venosa.** Jornal Vascular Brasileiro, v. 9, n. 4, p. 270, 2010.

COENEN, P. et al. **Associations of prolonged standing with musculoskeletal symptoms – a systematic review of laboratory studies.** Gait & Posture, 2017.

DA SILVA COSTA, J. A.; AMARAL, A. Z. **Projeto de protótipo de vestuário com critérios ergonômicos, de usabilidade e inovação têxtil apropriados para idosos ou acamados.** In: II jornada de pesquisa do programa de pós-graduação em design UFMA, 2021, São Luís. Anais [...]. São Luís: UFMA, 2021.

DA SILVA, Jéssica Laisa Dias; STATI, Cesar. **Prototipagem e Testes de Usabilidade.** Editora Intersaber, 2021.

ENSSLIN, L.; VIANNA, W. B. **O design na pesquisa quali-quantitativa em engenharia de produção – questões epistemológicas.** Revista Produção Online, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

GLOVICZKI, P. et al. **The care of patients with varicose veins and associated chronic venous diseases: clinical practice guidelines of the Society for Vascular Surgery and the American Venous Forum.** Journal of Vascular Surgery, 2011.

HAMILL, J.; KNUTZEN, K. M.; DERRICK, T. R. **Bases biomecânicas do movimento humano.** Tradução de F. G. do Nascimento; P. P. M. Hidaka. Revisão científica de R. da S. Chaves. 4. ed. Barueri: Manole, 2016.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9241-11 **Ergonomics of human-system interaction — Part 11: Usability: Definitions and concepts.** Genebra: ISO, 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA. **Ergokit - Manual de aplicação dos dados antropométricos.** Rio de Janeiro. V. 01 1995.

JAKOBSSON, J. et al. **Physical activity during the coronavirus (COVID-19) pandemic: prevention of a decline in metabolic and immunological functions.** Frontiers in Sports and Active Living, v. 2, p. 57, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fspor.2020.00057>.

KUMAR, M.; MOHANTY, S.; NAYAK, S. K.; PARVAIZ, M. R. **Bioresource.** Technology, 2010.

LÖBACH, B. **Design industrial.** São Paulo: Blucher, 2001.

LOSEKANN, R. G. C.; MOURÃO, H. C. **Desafios do teletrabalho na pandemia COVID-19: quando o home vira office.** Caderno de Administração, v. 28, p. 71–75, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4025/cadadm.v28i0.53637>.

LURIE, F. et al. **The 2020 update of the CEAP classification system and reporting standards.** Journal of Vascular Surgery: Venous and Lymphatic Disorders, v. 8, n. 3, p. 342–352,

2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvsv.2019.12.075>.

McKEOWN, C. **Office ergonomics: practical applications.** Boca Raton: CRC Press, 2007.

MELO, L. de S. **Estudo da influência do percentual de preenchimento no comportamento mecânico do PLA e ABS em impressão 3D.** 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2012.

MOHAMMADIAN, F. et al. **Effects of active footrest on posture, discomfort and performance of computer users.** Applied Ergonomics, v. 92, 103349, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2020.103349>.

MUNARI, B. **Das coisas nascem coisas.** Lisboa: Edições 70, 1981.

NIELSEN, J. **Usability engineering.** San Francisco: Morgan Kaufmann, 1993.

OLIVEIRA, M. F.; MAIA, I. A.; AL-CHUEYR, T.; PASCHOAL, G. H. L.; BERNARDES, L. F.; MOREIRA, L. C.; SILVA, J. V. L. **Explorando os recursos das tecnologias de prototipagem rápida – SLS e FDM – em aplicações especiais.** Anais do 10º Congresso Brasileiro de Polímeros, Foz do Iguaçu, PR, 2009.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Global recommendations on physical activity for health.** Genebra: WHO Press, 2016. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/44399>. Acesso em: 8 ago. 2025.

POPPER, K. **A lógica da pesquisa científica.** São Paulo: Cultrix, 1998.

RAIOL, R. A. **Praticar exercícios físicos é fundamental para a saúde física e mental durante a pandemia da COVID-19.** Brazilian Journal of Health Review, v. 3, n. 2, p. 2804–2813, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34119/bjhrv3n2-124>.

SANTANA, L. et al. **Avaliação da composição química e das características térmicas de filamentos de PLA para impressoras 3D de código aberto.** In: IX CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2016, Fortaleza. Anais [...]. Fortaleza: ABCM, 2016.

SANTOS, R. F. F. N.; PORFÍRIO, G. J. M.; PITTA, G. B. B. **A diferença na qualidade de vida de pacientes com doença venosa crônica leve e grave.** Journal Vascular Brasileiro, v. 8, n. 2, 2009.

SCATOLIM, R. L. **Apoio eletrônico para os pés: uma opção para portadores de lesão medular – uma contribuição do design.** Tese (Doutorado em Design) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Bauru, SP, 2017.

SILVA, D. K.; NAHAS, M. V. **Prescrição de exercícios físicos para pessoas com doença vascular periférica.** Revista Brasileira de Ciências do Movimento, v. 10, n. 1, 2008.

Design ergonômico: aplicação da impressão 3D como ferramenta de prototipagem rápida de um apoio de pés

416

SILVA, M. G.; PROCÓPIO, R. J.; MOTTA-SANTOS, D. **Exercícios físicos na doença venosa crônica.** Revista do DERC, v. 26, n. 3, p. 189–198, 2020.

SHERMAN, C.; HEDGE, A. **Test of a dynamic footrest on leg swelling in sedentary computer workers.** In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, v. 47, n. 6, p. 942–946, 2003.

ULTIMAKER. **Ficha técnica PLA** (PLA datasheet). Ultimaker, 2017a.

ULTIMAKER. **Ficha técnica Nylon** (Nylon datasheet). Ultimaker, 2017b.

Recebido: 15 de setembro de 2025.

Aprovado: 19 de outubro de 2025.