ANÁLISE DE DESEMPENHO MECÂNICO DE PRÓTESES DE DEDOS DE MÃO MANUFATURADOS POR PROTOTIPAGEM RÁPIDA VIA IMPRESSÃO 3D

Thiago Lopes Quevedo ⁽¹⁾ (thiagoquevedo@ufpr.br), Carolina Mocelin Gomes Pires ⁽¹⁾
(carolinamocelin@gmail.com), Filipe Melo de Aguiar ⁽¹⁾ (filipe.aguiar@ufpr.br),
Jucélio Tomás Pereira ⁽¹⁾ (jucelio.tomas@ufpr.br), Rafael Henrique de Oliveira ⁽²⁾
(rafael.henrique206@gmail.com)

⁽¹⁾ Universidade Federal do Paraná (UFPR); Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica

⁽²⁾ Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS); Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais

RESUMO: O desenvolvimento de dedos em próteses por acionamento mecânico e elétrico, vem proporcionando avanço significativo na reabilitação de pessoas com perdas parcial ou total da mão. As próteses buscam oferecer maior mobilidade, ergonomia e semelhança com o membro natural, trazendo ao usuário a possibilidade de uma recuperação mais rápida e menos traumática. O presente estudo teve como objetivo analisar 15 projetos de dedos, com duas ou três falanges, para próteses de mão, sendo dois modelos desenvolvidos pelos autores e treze obtidos em plataformas de compartilhamento digital. Todos os projetos foram concebidos por meio da manufatura aditiva da impressão 3D seguindo critérios estipulados pelos projetistas. Para os testes de desempenho mecânico foram definidos como parâmetros de avaliação as forças aplicadas para realizar os movimentos de: extensão, flexão, acionamento de uma tecla de um notebook e de um teclado convencional de um desktop. Embora nenhum modelo tenha alcançado superioridade em todos os quesitos avaliados, foi possível determinar qual componente protético apresentou melhor desempenho por movimento executado. Com base nos resultados obtidos, foi proposto neste trabalho um novo modelo de dedo protético, com três falanges, para uso em atividades que exigem maior força.

PALAVRAS-CHAVE: ENSAIOS MECÂNICOS, REABILITAÇÃO, ERGONOMIA, DESIGN.

ANALYSIS OF MECHANICAL PERFORMANCE OF HAND FINGER PROSTHESES MANUFACTURED BY RAPID PROTOTYPING VIA 3D PRINTING

ABSTRACT: The development of fingers in prostheses by mechanical and electrical actuation, has provided significant progress in the rehabilitation of people with partial or total loss of the hand. The prostheses aim to offer higher mobility, ergonomics and resemblance with the natural limb, giving the user the possibility of a faster and less traumatic recovery. The present study aimed to analyze 15 finger designs for hand prostheses with two or three phalanges, two models developed by the authors and 13 obtained in digital sharing platforms. All designs were built through the additive manufacture of 3D printing following criteria stipulated by the designers. For the mechanical performance tests, the applied forces to perform the movements of: extension, flexion, activation of a key of a notebook and of a conventional keyboard of a desktop were defined as evaluation parameters. Although no model has achieved superiority in all the evaluated questions, it was possible to determine which prosthetic component presented better performance in each movement performed. Based on the results obtained, a new prosthetic finger model with three phalanges was proposed for use in activities that require greater force.

| **KEYWORDS:** *MECHANICAL TESTS, REHABILITATION, ERGONOMICS, DESIGN.*

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de próteses utilizando a manufatura aditiva com tecnologia da impressão em 3 dimensões (3D), projetos e novos conceitos voltados para a engenharia de reabilitação surgem a todo instante. Nos dias atuais é possível obter diversos modelos de próteses por meio de plataformas digitais de compartilhamento, nos quais arquivos são disponibilizados com a propósito de ajudar pessoas que perderam algum membro. Para Mihailidis e Andrysek (2017, p.35), assim, com o auxílio da tecnologia de prototipagem rápida, os usuários podem confeccionar próteses de baixo custo para reabilitação motora.

As próteses para membros superiores, como a mão, obtiveram grande avanço por meio de plataformas de compartilhamento, onde alguns arquivos para construção de modelos são disponibilizados gratuitamente ao público. Normalmente, os modelos de próteses são elaborados em *softwares* de construção de desenhos em 3 dimensões (CAD 3D), os quais são convertidos no formato de estereolitografia (*stereolithography* – STL). Volpato *et al.* (2017, p.75) o STL é um padrão de arquivo comum em quase todos os computadores modernos, representando uma forma simples de modelos com malhas tridimensionais, no qual a extensão possibilita aos arquivos prontos o “fatiamento” na impressão 3D.

O desenvolvimento de próteses de alta tecnologia é fruto de uma nova geração de dispositivos, projetados com mecanismos e articulações envolvendo eletrônica e mecânica fina. Segundo AlZubaidi e Al-Bayat (2017, p.15-18) os projetos surgem da união de diversas áreas como a mecatrônica, biomecatrônica, engenharia biomédica e reabilitação motora, tendo como meta a obtenção de dispositivos que contenham semelhanças mecânicas e visuais cada vez mais próximas aos membros naturais. A interdisciplinaridade dessas áreas confere aos usuários movimentos cada vez mais precisos e contínuos, e reduzindo a folga entre as articulações.

Um dos maiores desafios na reabilitação dos movimentos está nas próteses de membros superiores, como a mão biônica. Cada projeto representa um desafio no sincronismo de movimentos, com a quantidade de mecanismos que permitam a coordenação e os graus de liberdade desejados. Resnik *et al* (2012, p.713) define que os projetos atuais resultam em custos elevados, devido ao tempo de pesquisa e aos materiais empregados, fazendo com que a prótese não seja acessível financeiramente a uma grande parte da população.

No Brasil há 45,6 milhões de pessoas com algum tipo de deficiência, sendo 13,2 milhões com deficiência motora (IBGE, 2000). Com isso, o desenvolvimento de uma prótese representa, em muitos casos, a possibilidade da restauração de alguns movimentos básicos, proporcionando maior qualidade de vida às pessoas que tiveram membros amputados.

O objetivo deste trabalho é analisar o desempenho mecânico de diferentes projetos de dedos protéticos que estão disponíveis online. Para isso, esses modelos serão manufaturados via impressão 3D com o propósito de realizar uma série de ensaios para analisar as forças de acionamento das

articulações, extensão e flexão dos dedos, bem como a força necessária para executar o movimento de acionamento de teclas de um teclado convencional de um computador desktop e de um notebook. Assim, para confrontar os dados obtidos pelos modelos já existentes no mercado, os autores também propõem dois modelos de dedo protético.

2. METOLOGIA

Em uma prótese de mão os dedos são os elementos que apresentam maior dificuldade no dimensionamento, pois são componentes móveis e articulados. Para Bakhy (2014, p.13) os dedos também são responsáveis por manipular, apanhar, prender e mover objetos de forma precisa, possibilitando movimentos coordenados por meio de seus mecanismos. As articulações são projetadas com base nos princípios físicos da mecânica, com geometria externa que emula o formato natural de um dedo humano.

O dedo protético pode ser composto por duas ou três falanges. A Figura 1 apresenta um modelo de dedo protético, contendo três falanges articuladas. As articulações estão dispostas entre as falanges proximal e medial, e entre a medial e a distal. Para execução do movimento de flexão, o trabalho é realizado pelo um cabo flexor, na parte inferior do dedo, o qual exerce uma força de tração. Para o movimento de extensão, este pode ser realizado por cabos extensores com diferentes propriedades elásticas, os quais conferem um movimento automático para o dedo retornar ao estado de extensão.

FIGURA 1. Modelo de dedo protético contendo as falanges proximal (1), medial (2), distal (3), e os cabos extensor (4) e flexor (5). Fonte: Os autores (2019).

2.1 Análise dos projetos de dedos protéticos

Foram selecionados 13 projetos de dedos protéticos para as análises, os quais foram obtidos gratuitamente a partir de plataformas de compartilhamento. Os dedos fazem parte de próteses de

mãos mecânica e eletrônica. Cada dedo possui uma diferença de *design*, forma de acionamento, características de articulações e quantidades de falanges. A partir da manufatura dos diversos dedos protéticos, foi possível desenvolver dois novos dedos com a proposta de suprir algumas lacunas ergonômicas e de versatilidade de movimentos.

Inicialmente, os dedos de todos os projetos, incluindo os projetos novos propostos neste trabalho, foram impressos com o polímero acrilonitrila butadieno estireno (*Acrylonitrile Butadiene Styrene* – ABS), com padrão de impressão com 20% de preenchimento e altura de camada de 0,15 mm. Esses projetos foram enumerados e associados aos seus respectivos nomes comerciais para organização das medidas. Em seguida, pela análise dos projetos, foram determinados e listados o número de articulações de cada dedo protético, sua forma de acionamento (mecânica ou elétrica) e a forma de extensão e flexão (cabos, elásticos ou molas). A Figura 2 apresenta os 15 projetos analisados neste artigo.

FIGURA 2. Projetos de dedos protéticos utilizados com vistas lateral (a) e superior (b). Fonte: Os autores (2019).

A força empregada nos cabos para os movimentos de flexão e extensão foi determinada utilizando uma célula de medição de carga (HBM – modelo S2). Os cabos foram fixados à extremidade da célula, a qual estava fixada em uma mesa. A falange proximal dos dedos protéticos foi movida distanciando-se do dinamômetro até uma flexão completa do dedo. As forças exercidas pelos cabos foram medidas em triplicata.

Por fim, foi avaliada a força de compressão realizada para o acionamento de teclas empregando dois tipos de teclados: um convencional de mesa (Dell – modelo SK-8175) e um de *notebook* (Dell – modelo Inspiron i14-5457). Para tal, as falanges proximal e medial foram fixadas para impedir a flexão (o que permite que apenas a falange distal se movimente para o acionamento das teclas). A Figura 3 apresenta o aparato experimental para o teste de força para o acionamento de teclas do *notebook*. A altura entre o teclado e a base de apoio das falanges é de 10 mm para o ambos os teclados. Os cabos de flexão foram fixados à célula de carga e posteriormente movidos apenas o suficiente para que a flexão na falange realizasse o acionamento da tecla. Os ensaios de força foram realizados em triplicata, para obtenção do valor médio da força e do seu desvio-padrão.

FIGURA 3. Acionamento de tecla em notebook com dedo protético. Fonte: Os autores (2019)

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os projetos dos dedos foram enumerados e discriminados de acordo com o tipo de acionamento, mecânico ou elétrico, conforme apresentado na Tabela 1. Após a etapa de identificação dos projetos, foram realizados os ensaios de determinação de força. O projeto P5 não foi submetido aos ensaios, pois é dependente da estrutura completa da mão. Também, não foram realizados testes com o projeto P11, o qual não apresenta passagem para os cabos no interior do dedo protético.

TABELA 1. Materiais usados nos parafusos.

Projeto	Articulações	Acionamento	Forma de Extensão/Flexão	Nome Comercial
P1	1	Mecânico	Cabos	Cyborg Beast
P2	1	Mecânico	Cabos	Osprey Hand
P3	1	Mecânico	Elástico/Cabo	Phoenix Hand
P4	1	Mecânico	Cabos	Raptor
P5	1	Mecânico	Elástico/Cabo	Prosthetic Hand
P6	2	Elétrico	Cabos	Hand (Mahdi Elsayed Hussein)
P7	2	Elétrico	2 Cabos	Hand Robot InMoov
P8	2	Mecânico	Elástico/Cabo	Flex Hand
P9	2	Mecânico	Mola/Cabo	Finger Robotic Modular
P10	2	Mecânico	Não tem forma de extensão / cabo	Hand Cathy
P11	2	Elétrico	Cabos	Robot Hand
P12	2	Elétrico	Cabos	The_Lucky_Paw_Mechanical_Hand
P13	2	Mecânico	Elástico/Cabo	Prótese Robótica
P14	2	Elétrico	Elástico/Cabo	TQ 1
P15	2	Elétrico	Cabos	TQ 2

Fonte: Os autores (2019).

A Figura 4 mostra a força média e os desvios-padrão para os ensaios de flexão. Foi observado que o projeto P4 requereu a menor força para este movimento, uma vez que apresenta menor complexidade na articulação, tamanho reduzido e, também, folga entre as articulações (Figura 2). Outro fator que favorece a redução dessa força está associado à distância que o cabo extensor está da articulação que contém as falanges medial e proximal.

O projeto P8 exigiu maior força para a flexão (Figura 4), pois para o cabo de tração realizar o movimento é necessário vencer a rigidez da mola de conexão entre as falanges, a qual apresenta maior resistência ao movimento em relação aos demais projetos. Devido à constituição do material da mola (poliuretano) e à essa estrutura, esse projeto resultou em uma maior dispersão dos dados. Os demais projetos apresentaram comportamentos semelhantes, com menores desvios-padrão.

FIGURA 4. Força média para flexão. Fonte: Os autores (2019)

A Figura 5 apresenta os testes realizados para os ensaios de extensão dos dedos. Para este tipo de teste apenas seis projetos foram capazes de efetuar este tipo de movimento. O projeto P1 apresentou maior força para extensão do dedo. Este resultado pode ser justificado pela maior proximidade do cabo extensor ao eixo da articulação entre as falanges medial e proximal. Outra contribuição para o aumento desta força se dá devido à folga no pino de fixação das falanges. O projeto P2 foi considerado o melhor resultado para este ensaio, pois requereu menor força para execução deste movimento. Este comportamento pode ser explicado pela menor complexidade da geometria do modelo e maior folga na articulação. Os demais projetos apresentaram comportamento estável, devido aos baixos valores de desvio-padrão.

FIGURA 5. Força média para extensão. Fonte: Os autores (2019)

A Figura 6 apresenta o comportamento dos dedos protéticos para os ensaios de força para acionamento de uma tecla de *notebook*. O projeto P2 necessitou de menor força para execução do movimento. Este comportamento pode ser explicado pela simplicidade de sua geometria, menores dimensões, maior estabilidade decorrente da união da falange medial à distal, e devido ao formato mais curvo dessa falange (Figura 2a). Este resultado concorda com a menor força requerida para o teste de flexão (Figura 4). O projeto P9 apresentou maior força para desenvolver o movimento de acionamento da tecla. Este projeto contém três falanges, o que exige mais força no cabo de flexão. Outro fator que contribui para o aumento da força requerida está relacionado com as articulações, as quais são bem justas, o que melhora a estabilidade, todavia aumenta o atrito entre os componentes da peça.

O projeto P10 apresentou maior dispersão dos dados, este fato pode ser explicado devido a um travamento que ocorre durante a execução do movimento. Este fenômeno se dá pela própria geometria da articulação, a qual é composta por pinos fixos para conexão das falanges. Desta forma, não há como reduzir este tipo de dispersão intrínseca à fixação. O projeto P13 resultou no segundo maior valor de desvio-padrão. Este projeto foi concebido sem pino de fixação das falanges (Figura 2), de tal forma que a sustentação do dedo é somente por cabos elásticos, conferindo ao dedo uma maior instabilidade.

FIGURA 6. Força média para acionamento do teclado de *notebook*. Fonte: Os autores (2019)

A Figura 7 mostra os resultados de força para o teste de acionamento de teclas do teclado de um computador *desktop*. Os resultados obtidos apresentaram distribuição dos dados semelhante ao caso anterior (Figura 6). Todavia, o projeto P6 necessitou de mais força para desempenhar o

movimento do que no caso anterior. A tecla do computador de mesa escolhido é menos sensível à força aplicada, requerendo mais força para executar o movimento. Além disso, este projeto apresenta a maior folga entre as falanges, o que requer mais força no cabo de flexão.

FIGURA 7. Força média para acionamento do teclado de *desktop*. Fonte: Os autores (2019)

De forma geral, os projetos não apresentaram grandes dispersões nos resultados dos ensaios, podendo ser considerados satisfatórios. Todavia, o projeto P15, proposto pelos autores, foi o modelo que exigiu menor força dos cabos em relação aos dedos protéticos de três falanges. Este resultado foi obtido para o caso do acionamento de teclas de um teclado convencional *desktop*, o qual requer maior força para execução do movimento. O projeto P15 também possui o melhor ajuste entre as falanges, não conferindo tanto atrito às peças e não apresentando folga excessiva. Desta forma, proporciona ao usuário uma maior estabilidade no manejo de peças, exigindo menor força para execução de movimentos de compressão. Outra qualidade do projeto P15 está nas suas dimensões naturais da mão humana, além da aparência mais realista.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou o desempenho de 15 dedos protéticos em ensaios de força na extensão e flexão dos dedos, bem como a força necessária para o acionamento de teclas de computadores. Os projetos apresentaram características diferentes de construção e operação.

Os modelos de dedos com duas falanges apresentaram melhores resultados para ensaios de flexão e extensão. São projetos que possuem tamanho reduzido e menor folga entre as falanges. Os

modelos com três falanges exigiram maiores forças para esses ensaios, pois o acionamento dessas falanges requer maior movimentação dos cabos. Os projetos com três falanges mostraram comportamentos semelhantes aos modelos de duas falanges nos ensaios de acionamento de teclas de computadores *desktop* e *notebook*.

Nos testes de extensão e flexão, os dedos que continham maiores folgas entre as articulações apresentaram melhores resultados, sendo beneficiados pela geometria. No entanto, para os testes de acionamento de teclas eram os projetos que exigiam mais força para execução do movimento.

Para uso geral, a prótese de dedo deve possuir bom ajuste entre as articulações, de forma a ofertar pouco atrito entre as falanges, mas também não proporcionar folga excessiva à peça. Foi observado, também, que dedos com três falanges proporcionam melhor agarre, enquanto os dedos com duas falanges apresentaram melhores resultados em relação ao acionamento de teclas.

REFERÊNCIAS

ALZUBAIDI, A.; AL-BAYATY, A. Introduction to Prosthetic Hand Engineering. Vol. 1. 1ª ed. CreateSpace, An Amazon.com Company, Seattle, EUA, 15-18 p., 2017.

BAKHY, S. H. Prosthetic Robotic Hand. 1ª ed. Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, Alemanha, 13 p., 2014.

IBGE. Censo Demográfico, 2000. Disponível em: < www.ibge.gov.br >. Acesso em: 12 jul.2019.

MIHAILIDIS, A.; ANDRYSEK, J. New Hands, New Life. Robots, Prostheses and Innovation. 1ª ed. Firefly Books Ltd., New York, EUA, 35 p., 2017.

RESNIK, L.; MERUCCI, M. R.; LIEBERMAN-KLINGER, S.; FANTINI, C.; KELTY, D. L.; DISLA, R.; SASSON, L. Advanced upper limb prosthetic devices: Implications for upper limb prosthetic rehabilitation. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, v. 93, n. 4, pp. 710 – 717, 2012.

VOLPATO, N.; MUNHOZ, A. L. J.; COSTA, C. A.; AHRENS, C. H.; CARVALHO, J.; SANTOS, J. R. L.; SILVA, J. V. L.; FOGIATTO, J. A.; LIMA, M. S. F. Manufatura Aditiva. Tecnologia e Aplicações da Impressão 3D. 1ª ed. Editora Blucher, São Paulo, Brasil, 75 p., 2017.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES pelo auxílio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho