



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS – REGIONAL CATALÃO
UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE MATEMÁTICA E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO



Guilherme Ferreira Neto

**MODELAGEM E DESENVOLVIMENTO DE PRÓTESE DE MÃO
MECATRÔNICA COM ACIONAMENTO INDIVIDUAL DE DEDOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CATALÃO – GO, 2017

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: ☒ **Dissertação** ☐ **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

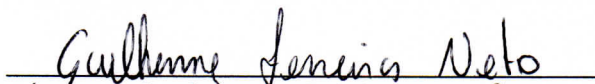
Nome completo do autor: Guilherme Ferreira Neto

Título do trabalho: Modelagem e Desenvolvimento de Prótese de Mão Mecatrônica com Acionamento Individual de Dedos

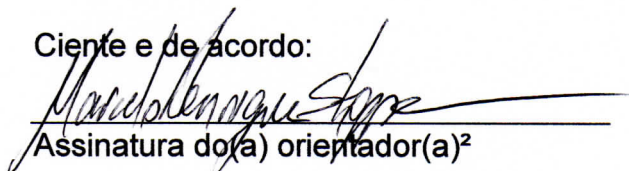
3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento ☒ **SIM** ☐ **NÃO**¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.


Assinatura do(a) autor(a)²

Ciente e de acordo:


Assinatura do(a) orientador(a)²

Data: 03 /10 /2017

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

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

² A assinatura deve ser escaneada.

GUILHERME FERREIRA NETO

MODELAGEM E DESENVOLVIMENTO DE PRÓTESE DE MÃO
MECATRÔNICA COM ACIONAMENTO INDIVIDUAL DE DEDOS

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Modelagem e Otimização pela Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão.

Orientador:
Prof. Dr. Marcelo Henrique Stoppa

CATALÃO – GO

2017

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

Ferreira Neto, Guilherme

Modelagem e Desenvolvimento de Prótese de Mão Mecatrônica com
Acionamento Individual de Dedos [manuscrito] / Guilherme Ferreira
Neto. - 2017.

LXXXIV, 84 f.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Henrique Stoppa.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Unidade
Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Catalão,
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização, Catalão, 2017.
Bibliografia.

Inclui siglas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Próteses de Mão. 2. Manufatura Aditiva. 3. Modelagem. 4. Baixo
Custo. I. Henrique Stoppa, Marcelo, orient. II. Título.

CDU 51

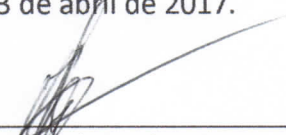


Defesa Nº _____

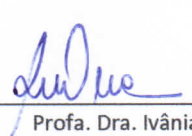
Ata de Defesa Pública – Dissertação de Mestrado

Aos três dias do mês de abril do ano de 2017, às 9h:00 min, reuniram-se os componentes da banca examinadora, professores(as) Dr. Marcelo Henrique Stoppa (presidente e orientador), Dra. Ivânia Vera, e Dr. Marcos Napoleão Rabelo para, em sessão pública realizada no auditório Congadas do Centro Integrado em Pesquisa, da Regional Catalão (RC), da Universidade Federal de Goiás (UFG), procederem com a avaliação do trabalho intitulado “Modelagem e Desenvolvimento de Prótese de Mão Mecatrônica com Acionamento Individual de Dedos”, em nível de Mestrado, área de concentração *Modelagem e Otimização*, de autoria de Guilherme Ferreira Neto, discente do Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização (PPGMO) da UFG/RC. A sessão foi aberta pelo presidente da banca, que fez a apresentação formal dos membros da banca. A seguir, a palavra foi concedida ao discente que, dentro do tempo regulamentar, procedeu a apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o candidato, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação do trabalho. Os membros da banca consideraram o trabalho final: **(X) Aprovado** (unanimidade) ou () **Reprovado** (por maioria simples). Cumpridas as formalidades de pauta, às 10 h: 30 min a presidência da mesa encerrou a sessão e para constar, eu Marcelo Henrique Stoppa, lavrei a presente Ata que, depois de lida e aprovada, segue assinada pelos membros da banca examinadora e pelo discente e, posteriormente, será homologada pelo Colegiado do PPGMO.

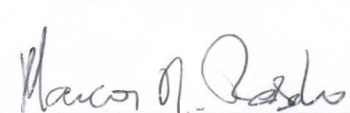
Catalão-GO, 03 de abril de 2017.



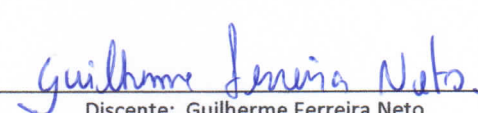
Prof. Dr. Marcelo Henrique Stoppa
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e
Otimização, UFG/RC
(Presidente da Banca)



Profa. Dra. Ivânia Vera
IBioTec – UFG/RC



Prof. Dr. Marcos Napoleão Rabelo
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e
Otimização, UFG/RC



Discente: Guilherme Ferreira Neto
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e
Otimização, UFG/RC

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus por me conceder forças para superar todas as dificuldades.

Agradeço a minha família, minha mãe Neuza, o meu pai Zeferino e especialmente a minha esposa Normia, que sempre estiveram presentes me apoiando, pacientemente me incentivando e somando forças para que mais esta etapa de minha vida pudesse ser completada.

Agradeço o amigo e orientador Dr Marcelo Henrique Stoppa, pelos ensinamentos, pela paciência e por tudo que fez extraindo de mim o meu melhor.

Agradeço os colegas Bruno Oliveira, Bruno Maia, Rafael Mendes e Guilherme Andrade, que sempre estavam dispostos a doarem parte de seu tempo para me suportar nos estudos e na elaboração desta dissertação.

Agradeço o amigo Marcelo Camargo por apoiar este projeto.

Por fim, agradeço o Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização (PPGMO) e a todos que tive a honra de ter como professor, pela oportunidade do estudo e pela transmissão de seus conhecimentos.

RESUMO

FERREIRA NETO, GUILHERME. *Modelagem e Desenvolvimento de Prótese de Mão Mecatrônica com Acionamento Individual de Dedos*. 2017. 84 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem e Otimização) – Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, Catalão – GO.

Dentre os membros motores, a mão tem grande importância para os seres humanos devido à sua versatilidade e capacidade para manipular objetos. Muitas pessoas não têm este membro, seja por má formação ou por amputação, o que dificulta na execução das atividades cotidianas. As próteses comerciais existentes têm custo elevado inviabilizando a utilização para a maioria das pessoas que dela necessita, por outro lado, existem comunidades na *internet* que desenvolvem próteses de mão acessíveis, via processo de fabricação por manufatura aditiva, porém, geralmente com métodos de acionamento pouco eficientes e pouco ergonômicas. Este estudo apresenta o desenvolvimento da estrutura mecânica de uma prótese de mão com acionamento individual dos dedos. Para isso, é desenvolvido o modelo matemático que descreve o movimento do dedo robótico que tem como acionadores, motores de corrente contínua, acoplados a engrenagens que por sua vez estão conectadas a braços de movimento. É realizado um estudo cinemático do movimento dos dedos, além de simulação computacional para a estrutura mecânica proposta. Também foi construído um protótipo virtual parametrizado para checar a viabilidade de execução da mecânica proposta. A prótese proposta nesta pesquisa será a base estrutural para etapas do desenvolvimento de uma prótese acionada por comando de voz.

Palavras-chaves: Próteses de Mão, Manufatura Aditiva, Modelagem, Baixo Custo.

ABSTRACT

FERREIRA NETO, GUILHERME. *Modelagem e Desenvolvimento de Prótese de Mão Mecatrônica com Acionamento Individual de Dedos*. 2017. 84 f. Master Thesis in Modelling and Optimization – Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, Catalão – GO.

Among the parts of the body, the hand is one with great importance for the humans because of their versatility and ability to manipulate objects. Many people do not have this member due to malformation body or amputation, which makes it difficult to perform daily activities. The existing commercial prostheses have high costs making it unusual for a significant part of the people who need it. On the other hand, there are Internet communities to develop more accessible hand prostheses, for manufacturing by process through additive manufacturing, but, usually with inefficient and ergonomic operation methods. This study presents the development of the mechanical structure of a hand prosthesis with individual finger actuator. For this, the mathematical model developed is able to describe the movement of the robotic finger, that has as actuator, direct current motors, coupled to gears which is coupled to movement bars. A kinematic study of the movement of the fingers was performed, besides of computational simulation for the proposed mechanical structure. We also built a parameterized virtual prototype to check the feasibility of execution of the proposed mechanics. The prosthesis proposed in this research will be the structural base for other steps of development of a prosthesis driven by voice command.

Keywords: Prosthetic Hand, Additive Manufacturing, Modeling, Low Cost.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Estrutura óssea - Vista do dorso de uma mão.	24
Figura 2.2 – Classificação de preensão.	25
Figura 2.3 – Classificação de próteses.	26
Figura 2.4 – Prótese passiva laboral.	26
Figura 2.5 – Prótese passiva estética.	26
Figura 2.6 – Prótese mecânica - e-NABLE Flexy-hand.	27
Figura 2.7 – Prótese Mioelétrica - Exiii HACKberry.	28
Figura 2.8 – Método de construção por camadas.	29
Figura 2.9 – Etapas para Impressão 3D.	29
Figura 2.10 – Representação do processo SLA.	30
Figura 2.11 – Representação do processo SLS.	31
Figura 2.12 – Representação do processo FDM.	32
Figura 2.13 – Impressora RepRap Prusa I3.	33
Figura 2.14 – Esquema de geração de arquivo de instrução de máquina	34
Figura 2.15 – Impacto do número de camadas em MA	35
Figura 2.16 – Representação esquemática de deposição de perfil de camada.	36
Figura 2.17 – Representação de estratégias de preenchimento de objeto.	37
Figura 2.18 – Representação de densidades de malhas STL.	37
Figura 3.1 – Ilustração das referências do modelo matemático.	39
Figura 3.2 – Representação dos sistemas de referência do modelo matemático.	40
Figura 3.3 – Representação de uma Translação.	41
Figura 3.4 – Representação de uma Rotação.	42
Figura 3.5 – Rotação sobre eixo x	43
Figura 3.6 – Dedo robótico do projeto InMoov.	44
Figura 3.7 – Dedo robótico do projeto InMoov-Vista explodida.	45
Figura 3.8 – Estrutura mecânica proposta	45
Figura 3.9 – Representação esquemática dos dedos da prótese	46
Figura 3.10 – Representação esquemática para o modelo de polegar	47
Figura 3.11 – Modelo de polegar em flexão total	48

Figura 3.12 –Modelo de polegar em extensão total	48
Figura 3.13 –Representação esquemática da relação entre os ângulos α_t e γ_t	50
Figura 3.14 –Relação entre os ângulos α_t e γ_t	52
Figura 3.15 –Representação esquemática para o modelo dos dedos indicador, médio, anelar e mínimo	53
Figura 3.16 –Modelo para os dedos i, m, r e l em flexão total.	54
Figura 3.17 –Modelo para os dedos i, m, r e l em extensão total	55
Figura 3.18 –Representação esquemática da relação entre os ângulos α_n, β_n e γ_n	58
Figura 3.19 –Relação entre os ângulos α_n e β_n	60
Figura 3.20 –Relação entre os ângulos β_n e γ_n	62
Figura 3.21 –Relação entre os ângulos α_n e γ_n	62
Figura 3.22 –Diagrama de transformações para o polegar.	64
Figura 3.23 –Diagrama de transformações para o polegar.	64
Figura 3.24 –Diagrama de transformações para o polegar.	66
Figura 3.25 –Diagrama de transformações para o polegar.	66
Figura 3.26 –Translação do sistema de referencia para o indicador.	68
Figura 3.27 –Diagrama de transformações para os outros dedos.	69
Figura 3.28 –Diagrama de transformações para os outros dedos.	69
Figura 4.1 – Protótipo virtual da prótese	71
Figura 4.2 – Corpo da palma da prótese	72
Figura 4.3 – Detalhamento das falanges do polegar da prótese	73
Figura 4.4 – Detalhamento das falanges do indicador da prótese	73
Figura 4.5 – Dedo polegar da prótese - Flexão e extensão totais	74
Figura 4.6 – Dedos indicador da prótese - Flexão e extensão totais	74
Figura 4.7 – Motor elétrico com caixa de redução.	75
Figura 4.8 – Acoplamento do motor com o dedo.	76
Figura 4.9 – Dedos da Prótese - Vista em corte	76
Figura 4.10 –Detalhe das barras de transmissão de movimento.	77
Figura 4.11 –Posicionamento dos motores na palma da prótese.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tabela comparativa de Impressoras 3D	33
Tabela 3.1 – Ângulos de flexão e extensão da prótese proposta	46
Tabela 4.1 – Proporções entre as falanges mostradas como razões	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D — Tridimensional

ABS — Acrilonitrila Butadieno Estireno (do inglês: *Acrylonitrile Butadiene Styrene*)

CAD — Desenho Assistido por Computador (do inglês: *Computer Aided Design*)

CAM — Manufatura Assistida por Computador (do inglês: *Computer Aided Manufacturing*)

FDM — Modelagem por Fusão e Deposição (do inglês: *Fused Deposition Modeling*)

GDL — Graus de Liberdade

IFD — Articulação Interfalangeana Distal

IFP — Articulação Interfalangeana Proximal

MA — Manufatura Aditiva

MCF — Articulação Metacarpofalangeanas

MS — Membro Superior

PLA — Polilático (do inglês: *Polylactic Acid*)

SLA — Estereolitografia (do inglês: *Stereolithography Apparatus*)

SLS — Sinterização Seletiva a Laser (do inglês: *Selected Laser Sintering*)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Motivação	21
1.2	Objetivos Gerais	22
1.3	Objetivos Específicos	22
2	REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1	A MÃO HUMANA	23
2.1.1	Anatomia da mão	23
2.1.2	Tipos de apreensão	24
2.2	PRÓTESES DE MÃO	25
2.2.1	Classificação das próteses	25
2.3	MANUFATURA ADITIVA	28
2.3.1	Principais técnicas de impressão 3D	29
2.3.2	Projeto RepRap	33
2.3.3	Arquivos de impressão 3D	34
2.3.4	Principais parâmetros para <i>software</i> CAM	34
2.3.5	Modelo virtual	36
3	MODELO MATEMÁTICO	39
3.1	MATRIZES DE TRANSFORMAÇÃO HOMOGÊNEAS	40
3.1.1	Matriz de Translação	41
3.1.2	Matriz de Rotação	42
3.2	ESTRUTURA MECÂNICA PROPOSTA	44
3.3	ELEMENTOS DE TRANSMISSÃO DE MOVIMENTO	46
3.3.1	Modelo para o polegar	47
3.3.2	Modelo para os outros dedos	52
3.4	REFERENCIAL PARA OS DEDOS DA PRÓTESE	62
3.4.1	Coordenadas para o Polegar	63
3.4.2	Coordenadas para Indicador, Médio, Anular e Mínimo	67
4	PROTÓTIPO	71
4.1	Palma e Dorso	72
4.2	Dedos	72

4.3 Sistema de Acionamento 75

5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE 79

REFERÊNCIAS 83

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A tecnologia tem contribuído com a melhora do cotidiano dos seres humanos. Atividades simples do dia a dia podem ser facilitadas utilizando dispositivos específicos, como escovas de cabelo, espelhos, garfos, facas, dentre outros, ferramentas que melhoram o desempenho em realizar as funções. É sabido que a tecnologia também pode ser empregada em dispositivos e serviços que ofereçam às pessoas com deficiência a capacidade de executar, ou complementar, funções motoras e intelectuais, gerando inclusão e independência do indivíduo. As próteses se enquadram neste tipo de tecnologia, também conhecida como Tecnologia Assistiva. A protetização é uma técnica usada para substituir a ausência parcial ou total de membros auxiliando o indivíduo nas rotinas diárias ([BERSCH, 2008](#)).

As próteses de mão comercializadas atualmente têm custo elevado, sendo próximo a R\$340.000,00 à depender da configuração, e, são geralmente de origem estrangeira, inviabilizando o acesso de vários pacientes a estas tecnologias, principalmente as que utilizam a tecnologia de acionamento mioelétrico ([POLIS *et al.*, 2009](#)).

Algumas comunidades virtuais como a e-NABLE e HACKberry propõem o desenvolvimento de próteses utilizando como processo de fabricação a tecnologia de impressão em três dimensões (3D). Estas utilizam cabos como mecanismos de transmissão de movimento para os dedos, uma configuração que exige manutenção devido ao desgaste dos cabos pelo atrito com as guias condutoras, diminuindo a eficiência da prótese.

Um fator que impacta na autonomia da bateria é o tipo de atuador utilizado, geralmente servo motores utilizados na prática de modelismo. Este tipo de atuador tem por característica analisar e corrigir a todo tempo a divergência entre a posição que o eixo do atuador deveria estar e a posição real, o que consome parcela significativa da bateria da prótese.

Estes aspectos motivam a busca por uma prótese de mão construída por impressão

3D economicamente acessível, atingindo um maior número de pessoas com deficiências. Além disso, desenvolver um método de acionamento dos dedos que não utilize cabos, deve melhorar a eficiência de transmissão dos movimentos, utilizando como atuadores, motores de corrente contínua, proporcionando maior vida útil a prótese. Diante da complexidade da mão humana, compreende-se então, o grande desafio de desenvolvimento de uma prótese de mão.

1.2 Objetivos Gerais

Desenvolver a estrutura mecânica de uma prótese de mão fabricada por meio da tecnologia de impressão em três 3D, norteado pelo estudo sobre os movimentos da mão humana, com acionamento individual dos dedos, utilizando como atuadores, motores de corrente contínua, e como elementos de transmissão, engrenagens e barras de inter-conexões entre as falanges. O estudo limita-se ao desenvolvimento da estrutura mecânica da prótese não sendo abordadas técnicas existentes de controle dos atuadores.

1.3 Objetivos Específicos

- Estudar as próteses de mão e definir o tipo a ser desenvolvido neste trabalho;
- Desenvolver um modelo matemático para calcular a dimensão dos elementos de transmissão do movimento dos dedos de acordo com dimensões das falanges, e, que descreve a posição da ponta dos dedos em função do ângulo da falange proximal, tendo como referência a palma da mão.
- Elaborar desenho em 3D de um protótipo de prótese em *software* CAD de acordo com o modelo matemático estabelecido;
- Construir o protótipo utilizando impressora 3D avaliando a viabilidade de reprodução da estrutura mecânica proposta
- Testar o funcionamento do protótipo e avaliar os resultados, comparando os movimentos do protótipo com o modelo matemático determinado.

Capítulo 2

REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A MÃO HUMANA

A mão humana, localiza-se na extensão final do membro superior (MS), é uma das estruturas mecânicas mais complexas do corpo humano. Formada por 27 ossos e 17 articulações, ela é capaz de se mover em até 23 graus de liberdade (GDL), sendo 2 na palma da mão, 5 no dedo polegar e 4 em cada um dos dedos indicador, médio, anelar e mínimo. Esta estrutura permite sua adaptação a várias formas de objetos (TUBIANA, 1981; HALL, 2000). O MS é constituído por três articulações, o ombro com 3 GDL, o cotovelo com 1 GDL e o punho com 2 GDL, somado-se aos 23 GDL da mão, o membro superior humano é constituído por 29 GDL (HALL, 2000; NIKU, 2010).

Para localizar um ponto no espaço são necessárias três coordenadas, geralmente x , y e z . Já para localizar um objeto é necessário definir sua posição em relação a um ponto no espaço, utilizando outras três coordenadas, logo, para localizar um objeto no espaço são necessárias e suficientes seis coordenadas, ou seja, 6 GDLs. (NIKU, 2010). Nota-se que o membro superior humano com 29 GDL tem grande capacidade e precisão em manipular objetos em qualquer posição, já que para isso, apenas 6 GDLs são suficientes (TUBIANA, 1981; NIKU, 2010).

2.1.1 Anatomia da mão

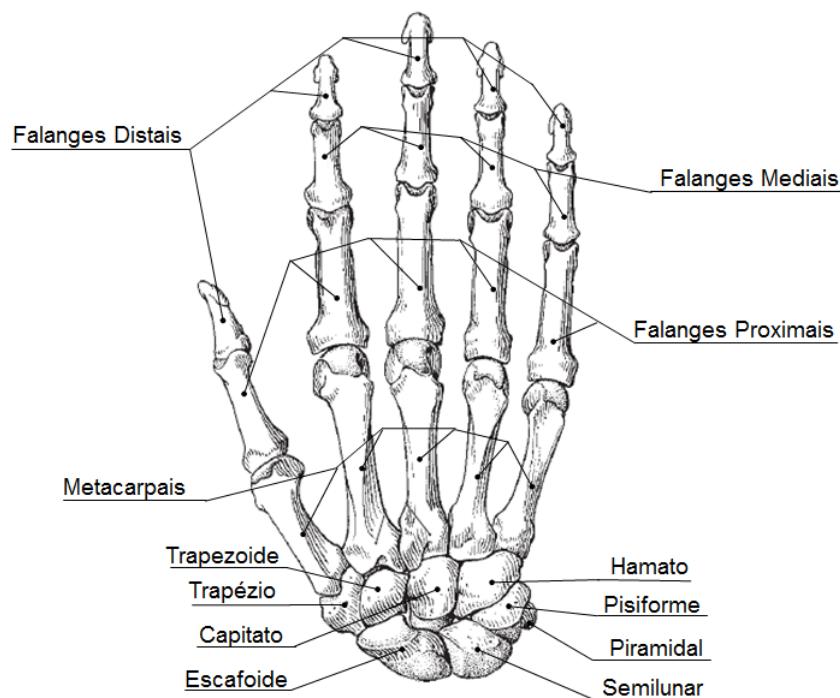
Os ossos tem como principal função sustentar o sistema esquelético permitindo articulações entre si, possibilitando que contrações musculares sejam transformadas em movimentos úteis (SOBOTTA, 2006). A estrutura óssea da mão, figura 2.1, pode ser dividida em três grupos:

- **Carpó:** grupo de ossos próximos ao braço, estrutura também conhecida como punho, é formada por duas linhas de ossos, sendo a primeira formada pelos ossos escafoíde,

semilunar, piramidal e pisiforme, e a segunda formada pelos ossos trapézio, trapezóide, capitato e hamato, totalizando 8 ossos (PANCHAL-KILDARE; MALONE, 2013).

- **Metacarpo:** grupo de cinco ossos que forma a palma da mão, chamados de metacarpais. Estes ossos são enumerados de acordo com estrutura a quem pertencem, iniciando em 1 para a estrutura do dedo polegar e finalizando em 5 para o dedo mínimo (PANCHAL-KILDARE; MALONE, 2013).

Figura 2.1 – Estrutura óssea - Vista do dorso de uma mão.



Fonte: Adaptada de (FENEIS; DAUBER; SPITZER, 2000).

- **Falanges:** grupo de ossos que formam os dedos. Os dedos indicador, médio, anelar e mínimo são formados pelas falanges proximais, mediais e distais, enquanto o polegar é formado somente pelas falanges proximal e distal (PANCHAL-KILDARE; MALONE, 2013).

2.1.2 Tipos de preensão

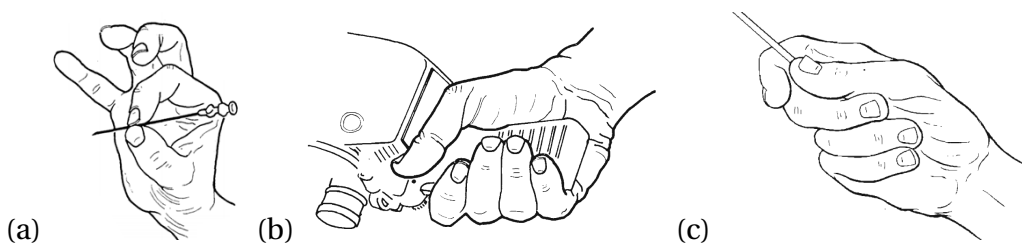
A grande capacidade de execução de ações da mão deve-se à sua principal função, que é a preensão (POLIS *et al.*, 2009). As preensões realizam tarefas definidas e devem ser classificadas em três grupos de acordo com a aplicação: digitais, palmares e centradas (KAPANDJI, 2002).

As preensões podem ainda serem classificadas em dois tipos: de força e de precisão. A preensão de força ocorre ao segurar um objeto com palma da mão exercendo contra-força com os dedos parcialmente flexionados. Já a preensão de precisão ocorre quando um objeto

é fixado delicadamente entre as laterais dedos e polegar ou entre o polegar e face palmar (NAPIER, 1956). A figura 2.2 relaciona os tipos básicos de preensão da mão.

Figura 2.2 – Classificação de preensão.

(a) Digital (b) Palmar (c) Centrada.



Fonte: Adaptada de (KAPANDJI, 2002).

2.2 PRÓTESES DE MÃO

A mão humana é uma parte essencial do corpo para manipulação de objetos e alimentos, apesar de estar presente em diversos animais, nos seres humanos ela faz diferença pela sua versatilidade auxiliando o seu desenvolvimento (KAPANDJI, 2002). A prótese tem a função de substituir artificialmente uma parte faltante do corpo, conferindo independência, qualidade de vida e auto-estima (CARVALHO, 2004).

2.2.1 Classificação das próteses

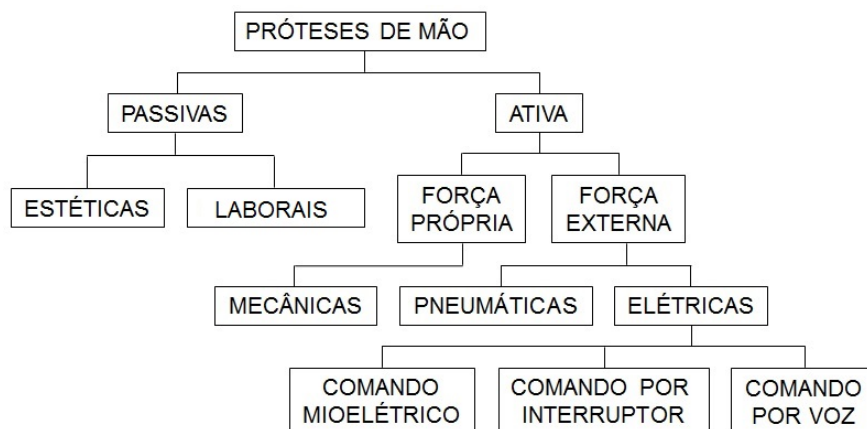
Com o intuito de se obter próteses cada vez mais funcionais, vários tipos e modelos foram desenvolvidos gerando a necessidade de classificá-los. Uma forma interessante de classificação é considerar suas características técnicas. A figura 2.3 ilustra uma classificação através dos parâmetros de funcionalidade, tipo de construção e fonte de energia. (BLOHMKE, 1994).

- **Próteses passivas:**

As próteses passivas não são funcionais, e são divididas em próteses estéticas e para atividade laboral. As próteses estéticas são indicadas para pacientes que têm exigências no quesito aparência, renunciando às funcionalidades das próteses ativas. Por não ter articulações, este tipo de prótese tem peso menor, conferindo conforto ao paciente, contudo, são flexíveis e se deformam de acordo com as cargas que lhe são atribuídas (BLOHMKE, 1994; CUNHA, 1999).

As próteses para atividade laboral, são dispositivos que geralmente têm uma ferramenta na extremidade distal e são utilizadas pelos pacientes para auxiliar em tarefas simples, como por exemplo um gancho na extremidade oposta a que se fixa ao coto do braço,

Figura 2.3 – Classificação de próteses.



Fonte: Adaptado de (BLOHMKE, 1994).

possibilitando ao paciente, transportar uma mala, por exemplo (CUNHA, 1999; CARVALHO, 2004). A figura 2.4 ilustra um modelo de prótese laboral enquanto a figura 2.5 ilustra um modelo de prótese estética.

Figura 2.4 – Prótese passiva laboral.



Fonte: <http://www.medicalexpo.ru/prod/fillauer/product-74954-769447.html>

Figura 2.5 – Prótese passiva estética.



Fonte: <http://www.ottobock.com.br>.

- **Próteses ativas:**

As próteses ativas são próteses funcionais acionadas pelo paciente, sendo divididas em dois grupos: ativas acionadas por força própria e ativas acionadas por força externa (BLOHMKE, 1994).

- **Próteses mecânicas:**

As próteses mecânicas pertencem ao grupo de próteses ativas de força própria, sendo o paciente a fonte de energia. São acionadas com determinados movimentos do paciente, por exemplo, fazendo com que os dedos de uma prótese se movimente ao fazer flexão ou extensão do punho. Os movimentos são acionados por tirantes ou cabos, conforme ilustrada na figura 2.6 (BLOHMKE, 1994; CUNHA, 1999).

O projeto e-NABLE, uma comunidade eletrônica de voluntários da *internet* que atua globalmente, desenvolve, fabrica e doa próteses mecânicas utilizando a tecnologia de manufatura aditiva. A prótese apresentada pela figura 2.6 foi desenvolvida pela e-NABLE. Em janeiro de 2013 Ivan Owen patenteou e publicou no *Thingiverse*, um servidor na *web* de arquivos digitais, o primeiro modelo de prótese mecânica *open source* para impressão 3D, sendo este o marco de início da comunidade. Em um ano de existência já contava com 3000 colaboradores e mais 750 próteses doadas ao redor do mundo, demonstrando o sucesso da comunidade (ENABLE, 2016).

Figura 2.6 – Prótese mecânica - e-NABLE Flexy-hand.



Fonte: <http://enablingthefuture.org>.

- **Próteses elétricas de comando mioelétrico:**

A primeira prótese mioelétrica foi desenvolvida pelo físico Reinhold Reiter nos anos 40 e teve sua pesquisa publicada em 1948. Devido à precariedade dos meios de comunicação da época, esta descoberta foi pouco divulgada, acarretando no desenvolvimento dessa mesma tecnologia em outros países como Inglaterra (CHILDRESS, 1985).

As próteses mioelétricas são controladas pelos pacientes através de contrações musculares do coto, gerando sinais elétricos da ordem de microvolts que são captados por eletrodos que enviam estes sinais ao controlador eletrônico da prótese. O controlador da prótese interpreta os sinais recebidos e comanda os atuadores para realizar as preensões comandadas pelo paciente (CUNHA, 1999).

Em 2015 a empresa japonesa Exiii iniciou um projeto *open source* para desenvolvimento de uma prótese de mão biônica. Assim como acontece com o projeto e-NABLE, vários colaboradores trabalham no projeto, sendo os arquivos relativos a este disponibilizado no servidor de arquivos eletrônico da web GitHub⁷. A prótese foi denominada HACKberry, o nome de uma espécie de árvore que cresce com vários ramos (figura 2.7) (EXIII, 2016).

Figura 2.7 – Prótese Mioelétrica - Exiii HACKberry.



Fonte: <http://www.exiii.jp>.

2.3 MANUFATURA ADITIVA

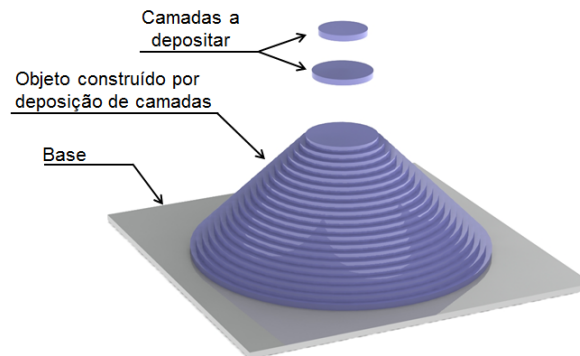
Com a necessidade de disponibilizar novos produtos que atendam as exigências do mercado consumidor, as indústrias precisam ter a capacidade de desenvolver novos produtos com formas mais elaboradas e no menor prazo para se tornarem competitivas (CUNICO, 2015). Com isso, acentuou-se o objetivo de reduzir os prazos e riscos de projeto em um novo desenvolvimento. A indústria introduziu o uso de protótipos para validação de formas dimensionais e montabilidade. Isto possibilitou a redução da necessidade de ajustes de projeto e ferramentas de fabricação, garantindo o lançamento de novos produtos com maior velocidade inovadores e competitivos. Máquinas e ferramentas de construção de protótipos se tornaram cada vez mais rápidas e automáticas, originando então na indústria, o termo Prototipagem Rápida (CUNICO, 2015).

Dentre os vários meios de prototipagem encontra-se o processo de manufatura aditiva (MA). Este conceito gera modelos físicos em três dimensões através de adição de material camada por camada, tecnologia também conhecida como impressão 3D (CUNICO, 2015).

Na Figura 2.8 está uma representação simples da tecnologia de manufatura aditiva com facilidade de percepção do objeto idealizado por meio da deposição de camadas de

material que descrevem a secção transversão do objeto.

Figura 2.8 – Método de construção por camadas.



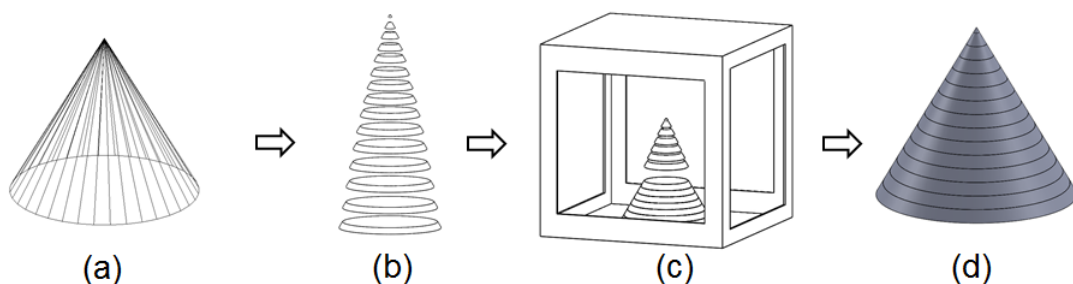
Fonte: Elaborada pelo autor.

O conceito de construção por MA é conhecido desde a primeira revolução industrial porém, as primeiras impressoras 3D foram desenvolvidas somente na década de 1980 graças ao avanço da eletrônica, dos computadores, dos *softwares* de Desenho Assistido por Computador (CAD - *Computer Aided Design* em inglês) e dos *softwares* de Manufatura Assistida por Computador (CAM - *Computer Aided Manufacturing* em inglês) (PALLAROLAS, 2013; CUNICO, 2015).

Para que seja possível produzir um objeto utilizando tecnologia de impressão 3D é necessário obter um modelo virtual originado de *software* CAD, que é processado por *software* CAM gerando um arquivo eletrônico de instruções de máquina, que por sua vez, é executado pela impressora 3D, finalizando na construção do objeto idealizado.

Figura 2.9 – Etapas para Impressão 3D.

(a) Modelo virtual (b) Modelo fatiado (c) Fabricação (d) Objeto



Fonte: Elaborada pelo autor.

2.3.1 Principais técnicas de impressão 3D

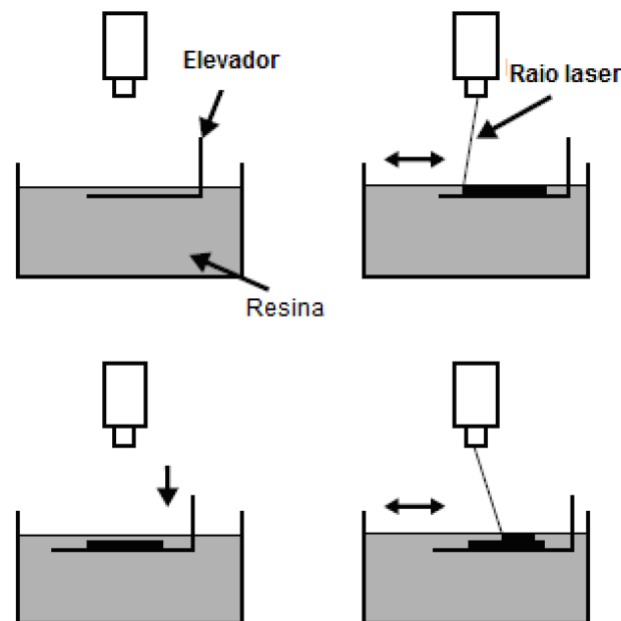
O desenvolvimento das impressoras 3D teve início na década de 80, após muitos esforços e desprendimento em pesquisas, resultando nas tecnologias inovadoras, possibi-

tando-as, de ocuparem a importância que tem nos dias hoje (CUNICO, 2015). Nos próximos parágrafos as principais tecnologias serão melhor detalhadas.

- **Estereolitografia (SLA)**

A Estereolitografia (SLA - *stereolithography* em inglês) gera modelos 3D através da cura de resina líquida fotossensível, geralmente polimerizada por um feixe de raio laser ou por uma luz que emite raios ultravioleta, dependendo do fabricante da impressora. Um cabeçote laser cura a resina à medida que se desloca nos eixos X e Y descrevendo a secção transversal do objeto, formando uma camada. Após a cura da primeira camada, a impressora move a bandeja de impressão ao longo do eixo Z, imergindo a primeira camada na resina fotossensível possibilitando a polimerização da próxima camada, e assim sucessivamente até o término de fabricação do objeto. Após o término da impressão o material não sinterizado é removido do objeto finalizando a fabricação (PALLAROLAS, 2013; CUNICO, 2015). A figura 2.10 ilustra o processo de impressão 3D por tecnologia SLA.

Figura 2.10 – Representação do processo SLA.



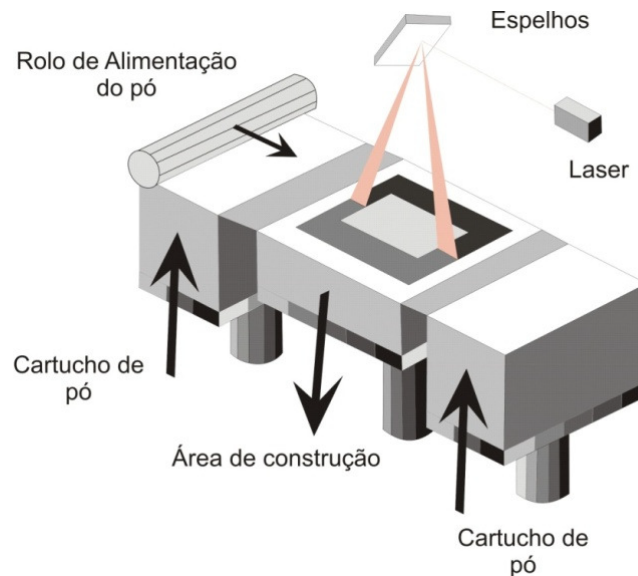
Fonte: (POWERS *et al.*, 2007).

Alguns fabricantes como por exemplo a Object[®], oferece máquinas com capacidade de construir objetos com propriedades mecânicas diferentes, ajustando-se a proporção entre dois tipos de resina fotossensível simulando até 25 tipos de materiais (PALLAROLAS, 2013).

- **Sinterização seletiva a laser (SLS)**

Impressoras por sinterização seletiva a laser (SLS - *Selective Laser Sintering* em inglês) produzem modelos através de sinterização a laser de uma camada de polímero particulado. A máquina dispõe de um dispositivo alimentador que se move geralmente no sentido X da impressora com função de espalhar e compactar o material sólido (pó) sobre a bandeja de impressão. De forma similar ao processo SLA, o feixe de laser percorre os eixos X e Y descrevendo a secção transversal do objeto polimerizando a camada. Após a polimerização da primeira camada a bandeja de impressão se move no eixo Z imergindo a camada polimerizada no pó, os cartuchos de material se movem em direção ao alimentador e novamente, o alimentador se move, agora na direção inversa espalhando e compactando o polímero em pó, preparando a bandeja para a sinterização da próxima camada, este processo se repete até o término da impressão. De forma similar a tecnologia SLA, o material não sinterizado é retirado do objeto finalizando o processo de impressão (OLIVEIRA *et al.*, 2009; PALLAROLAS, 2013). A tecnologia SLS é ilustrada pela figura 2.11.

Figura 2.11 – Representação do processo SLS.



Fonte: (OLIVEIRA *et al.*, 2009).

A tecnologia SLS, por polimerizar particulados sólidos, torna possível a mistura de outros tipos de materiais ao polímero tais como pó de metais e de cerâmicas, conferindo objetos com propriedades mecânicas melhores se comparado a objetos fabricados com matéria prima sem adição de misturas (CUNICO, 2015).

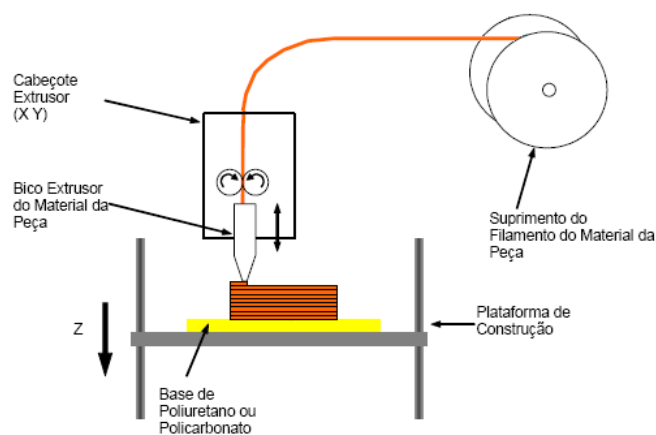
- **Modelagem por fusão e deposição (FDM)**

A modelagem por fusão e deposição (FDM - *Fused Deposition Modeling* em inglês) foi desenvolvida pela empresa *Stratasys* no final dos anos 80 (CUNICO, 2015). Esta tecnolo-

gia gera objetos em três dimensões fundindo e depositando materiais termoplásticos como Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS - *Acrylonitrile Butadiene Styrene* em inglês) e Ácido Polilático (PLA - *Polylactic Acid* em inglês).

O polímero para utilização nesta tecnologia tem forma de filamento, que é introduzido em um bloco aquecido, conhecido como bico extrusor, que tem a função de fundir o polímero. Guias rotativas empurram o material para o interior do bico fazendo com que o material fundido seja extrudado através do pequeno orifício do bico extrusor. Durante a extrusão, a máquina move o bico extrusor nos eixos X e Y depositando material, desenhando assim sobre a bandeja da impressora a forma da secção transversal do objeto, formando a primeira camada. Após preencher a camada extrudando o polímero fundido, a impressora move a bandeja ao longo do eixo Z para iniciar a deposição da próxima camada. Este processo se repete até o término da fabricação (OLIVEIRA *et al.*, 2009; CUNICO, 2015).

Figura 2.12 – Representação do processo FDM.



Fonte: Adaptado de (VOLPATO, 2007).

• Comparativo de tecnologias

Cada tecnologia tem características únicas e isto faz com que determinada tecnologia se destaque com desempenho superior para certas aplicações, porém, apresenta baixo desempenho para outras. A tabela 2.1 apresenta as características principais de cada processo, sendo necessário avaliar o tipo de objeto a ser fabricado para definição de qual a melhor relação custo-benefício (CUNICO, 2015).

De forma geral, a tecnologia FDM apresenta-se melhor para aplicações de baixo custo devido à baixa complexidade do equipamento e ao baixo custo dos insumos (filamento plástico), quando comparada com as tecnologias SLA e SLS. Por outro lado, objetos fabricados por SLA e SLS apresentam melhores níveis de detalhamento e resistência mecânica (CUNICO, 2015).

Tabela 2.1 – Tabela comparativa de Impressoras 3D

	FDM	SLA	SLS
Uso	Doméstico/Industrial	Industrial/Doméstico	Industrial
Precisão	Baixa/Média(0,5 0,01)	Média/Alta(0,1 0,005)	Alta(0,01 0,001)
Materiais	Polímeros	Fotopolímeros	Polímeros Cerâmica e Metais
Resistência	Média	Baixa	Alta
Custo	R\$1.5000,00	R\$50.000,00	R\$130.000,00
Ponto Forte	Baixo custo de operação	Qualidade	Resistência mecânica
Ponto Fraco	Qualidade inferior	Impressão frágil	Alto custo de operação

2.3.2 Projeto RepRap

Em 2004, quando a patente da *Stratasys* para a tecnologia FDM já tinha se expirado, Adrian Bowyer da Universidade de Bath no Reino Unido idealizou um projeto de produção de máquinas de impressão 3D fabricando grande parte das peças com auxílio de uma impressora 3D funcional, necessitando adquirir apenas alguns componentes, os quais não são possíveis de produzir por impressão 3D, como por exemplo, a placa eletrônica e componentes metálicos (RANELLUCCI, 2013; CUNICO, 2015; REPRAP, 2017). O projeto ganhou o codinome de RepRap, uma abreviação do nome em inglês *Replicating Rapid-prototyper* (REPRAP, 2017).

O projeto de Bowyer ganhou adeptos e em poucos anos foram desenvolvidos vários modelos com foco no baixo custo e com o conceito de projeto livre, permitindo a qualquer pessoa a livre reprodução do projeto após ter sido divulgado em rede mundial. A figura 2.13 ilustra o modelo Prusa I3, terceira geração do modelo Prusa. Com esta iniciativa, a tecnologia FDM ficou consideravelmente mais acessível e muito popularizada, possibilitando a adoção desta para o desenvolvimento da pesquisa.

Figura 2.13 – Impressora RepRap Prusa I3.



Fonte: www.reprap.org

2.3.3 Arquivos de impressão 3D

A manufatura aditiva constrói objetos camada-por-camada, sendo necessário conhecer a secção transversal das diferentes regiões do objeto. Neste ponto os *softwares* CAM assumem o importante papel de fatiar eletronicamente o modelo virtual formando as camadas, calcular os movimentos necessários para descrevê-las e gerar instruções de comando para as impressoras 3D, em outras palavras, o *software* CAM é responsável por gerar o arquivo de instrução de máquina, ou arquivo de impressão 3D, tendo como entrada o modelo virtual e os parâmetros de fabricação (RANELLUCCI, 2013; CUNICO, 2015).

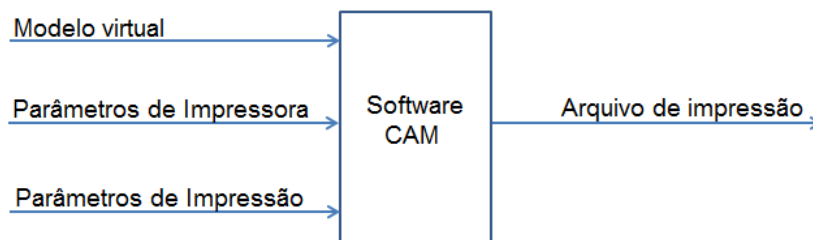
A iniciativa de Bowyer foi o ponto de partida para popularização do *hardware* das impressoras 3D, porém ainda faltava um bom *software* CAM. Para as impressoras comerciais este *software* faz parte do produto, sendo específicos para cada fabricante e modelo, então surgiu a necessidade de um *software* CAM eficiente, fácil de operar e compatível com os modelos RepRap (RANELLUCCI, 2013).

No final de 2011 nasce o *Slic3r*, um *software open source* cujo o propósito de complementar de forma eficiente o *hardware* livre RepRap, permitindo às impressoras de baixo custo melhores resoluções e rapidez na geração dos comandos de máquina (RANELLUCCI, 2013).

2.3.4 Principais parâmetros para *software* CAM

Como pode ser visto na figura 2.14 além de ser alimentado com o modelo virtual, o *software* precisa ser alimentado com informações sobre a máquina (parâmetros de impressora) e com informações sobre o objeto a ser construído (parâmetros de impressão) (RANELLUCCI, 2013).

Figura 2.14 – Esquema de geração de arquivo de instrução de máquina



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os parâmetros de impressora, são características físicas da máquina que devem ser informadas na configuração do processo de impressão.

- Diâmetro do bico de extrusão e diâmetro do filamento:

O *Slic3r* foi desenvolvido para ser capaz gerar arquivos de impressão para vários modelos de impressora 3D, o diâmetro do bico de extrusão e o diâmetro do filamento podem variar de modelo para modelo portanto, para que o *software* possa calcular corretamente o objeto é necessário parametrizá-lo com os valores específicos da máquina de impressão que irá executar o arquivo de instrução de máquina (RANELLUCCI, 2013; MAGALHÃES; VOLPATO; LUERSEN, 2010).

- Temperatura de extrusão e temperatura da bandeja:

Máquinas FDM são capazes de imprimir vários tipos de materiais e cada material tem o seu ponto de fusão diferente, ao inserir os parâmetros de temperatura, ajusta-se o *software* para calcular o arquivo de instrução de máquina de acordo com o material a ser utilizado como matéria prima (MAGALHÃES; VOLPATO; LUERSEN, 2010).

Os parâmetros de impressão, definem como a máquina irá construir o objeto, e por isso, devem ser informados na configuração do processo de impressão e atualizados sempre que for necessário alterar a forma de construção do objeto.

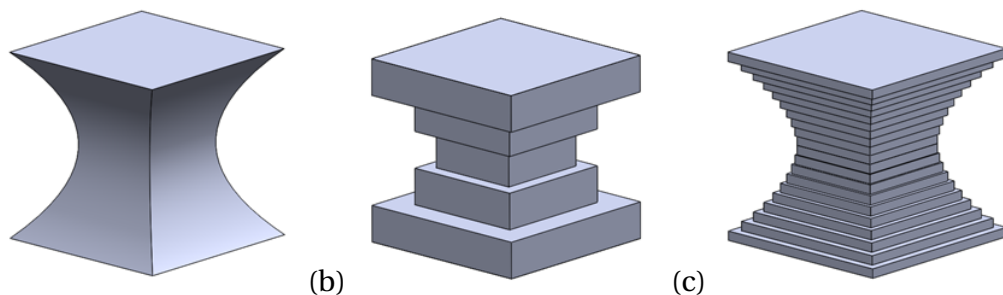
- Espessura de camada:

Este parâmetro define com qual espessura o *software* deve fatiar o modelo virtual. A figura 2.15 apresenta três imagens, uma ilustração de um modelo virtual qualquer e outras duas ilustrando o modelo virtual fabricado por MA com diferentes espessuras de camada.

Figura 2.15 – Impacto do número de camadas em MA

(a) Modelo virtual (b) MA com 5 camadas (c) MA com 20 camadas

(a)



Fonte: Elaborada pelo autor.

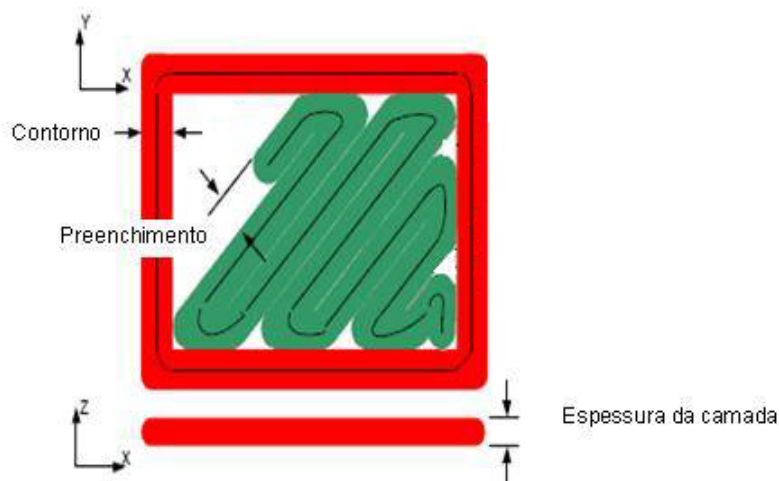
Percebe-se que a espessura da camada impacta diretamente na qualidade do objeto fabricado. O erro dimensional entre o modelo virtual e objeto fabricado diminui à medida que a espessura da camada diminui, por outro lado, o tempo de fabricação

aumenta de forma inversamente proporcional, onerando o custo de fabricação (FOGGIATTO *et al.*, 2005).

- Estratégia de fabricação:

O *software Slic3r* utiliza a estratégia de deposição de camadas iniciando pelos contornos que delimitam interna e externamente a secção transversal do objeto e então conclui a fabricação da camada realizando o preenchimento interno, conforme pode-se observar na figura 2.16. A quantidade de contornos, o padrão e densidade de preenchimento são parâmetros importantes que afetam as características mecânicas e o acabamento do objeto (CUNICO, 2015).

Figura 2.16 – Representação esquemática de deposição de perfil de camada.



Fonte: (MAGALHÃES; VOLPATO; LUERSEN, 2010)

Entre os padrões de preenchimento disponíveis no *software*, pode-se citar como principais o padrão linear, padrão hexagonal e padrão concêntrico. É importante salientar que a estratégia de preenchimento da camada afeta a velocidade de fabricação e resistência mecânica do objeto (CUNICO, 2015; VOLPATO *et al.*,). Na figura 2.17 observam-se diferentes estratégias de preenchimento para um mesmo objeto.

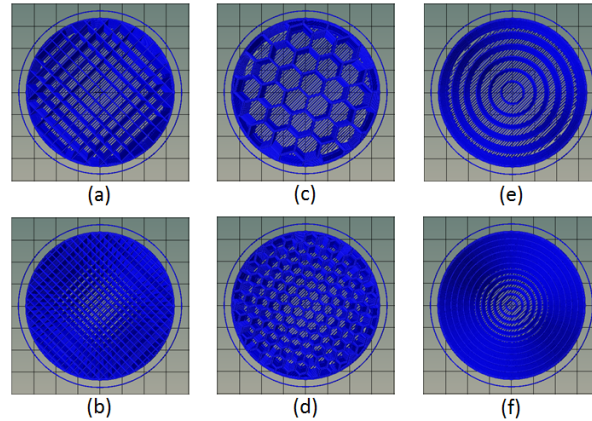
2.3.5 Modelo virtual

Para que seja produzido um objeto por tecnologias de impressão 3D é necessário um modelo virtual do objeto. A extensão de arquivo geralmente utilizada para este fim é a STL (*stereolithography*) por serem arquivos leves e baseados em malha de triângulos (CUNICO, 2015).

Basicamente, pode-se obter computacionalmente arquivos STL modelando o objeto virtualmente em ambiente CAD, por exemplo, SolidWorks®, CATIA®, Blender, dentre outros. Então exporta-se o modelo para esta extensão, ou, utiliza-se equipamento de captura de engenharia reversa, também conhecidos como escaners 3D (RANELLUCCI, 2013).

Figura 2.17 – Representação de estratégias de preenchimento de objeto.

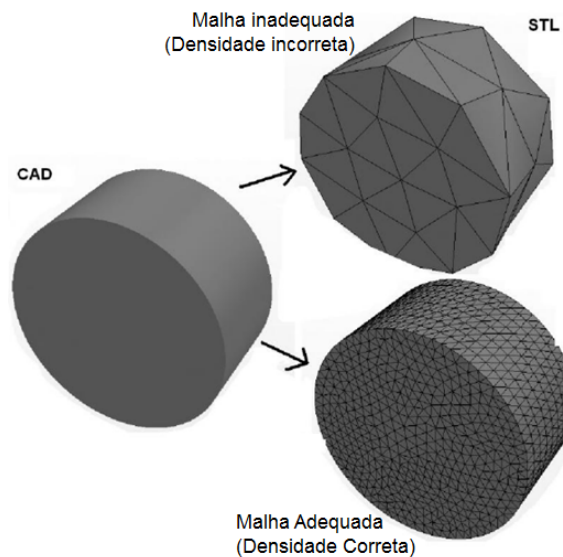
- (a) 10% Preenchimento retilíneo (b) 20% Preenchimento retilíneo (c) 10% Preenchimento hexagonal
 (d) 20% Preenchimento hexagonal (e) 10% Preenchimento cilíndrico (f) 20% Preenchimento cilíndrico



Fonte: Elaborada pelo autor.

Modelos em STL, por serem baseados em malhas de triângulos, têm restrições geométricas maiores quando comparados com as extensões nativas dos *softwares* CAD. Processos de exportação para esta extensão devem ser feitos com um cuidado especial quanto à densidade da malha, evitando que distorções geométricas aconteçam (CUNICO, 2015). Quanto maior a densidade da malha de triângulos, maior será o arquivo STL, portanto, cabe ao projetista encontrar a densidade correta da malha para que haja o mínimo de erro possível (FOGGIATTO *et al.*, 2005). A figura 2.18 ilustra modelos em STL exportados com baixa e com alta resolução de malha.

Figura 2.18 – Representação de densidades de malhas STL.



Fonte: Adaptado de (CUNICO, 2015)

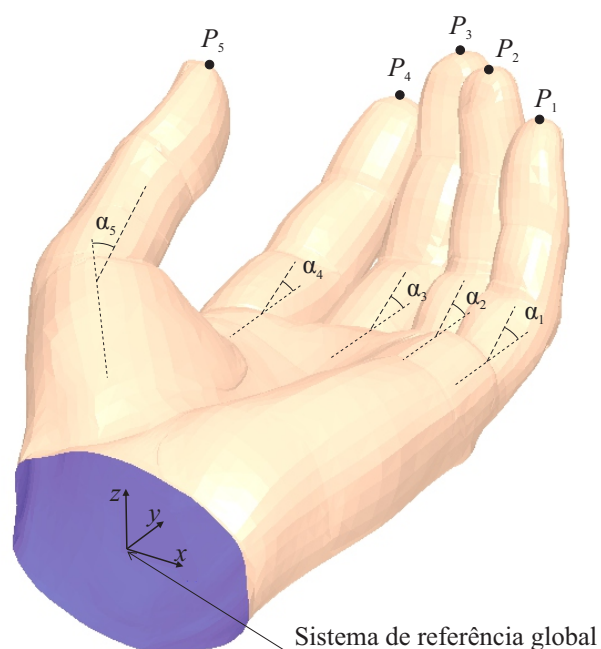
Capítulo 3

MODELO MATEMÁTICO

O protótipo de prótese proposto aqui destina-se a indivíduos que por algum motivo, tiveram amputação transradial do membro superior.

Este estudo prevê o desenvolvimento da estrutura mecânica de uma prótese de mão com cinco dedos com acionamento individual. Assim como na mão humana, cada dedo da prótese tem dimensão diferente, então, se faz necessário o desenvolvimento de um modelo matemático para calcular a localização da extensão final de cada dedo (P_1, P_2, P_3, P_4 e P_5) em função dos ângulos de flexão ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ e α_5) formado entre a palma da mão e a falange proximal de cada dedo (articulações metacarpofalangeanas), tendo como referência uma origem comum, considerada no centro do punho, conforme ilustrado na figura 3.1.

Figura 3.1 – Ilustração das referências do modelo matemático.

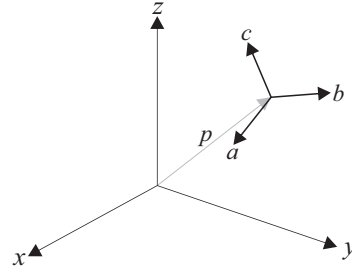


Fonte: Elaborado pelo autor

Para o desenvolvimento do modelo serão utilizadas técnicas de análise de posição de robôs e geometria plana, cujos os conceitos teóricos de robótica são descritos em sequência.

Em análise de posição de robôs, afim de simplificar a representação do movimento, geralmente utiliza-se mais de um sistema de referência, sendo um referencial global e um referencial da extensão final do robô. (NIKU, 2010). Neste estudo, são utilizados os eixos x , y e z para o sistema de referência global, e os eixos a , b e c para o sistema de referência relacionado à extensão final de cada dedo. A figura 3.2 ilustra estes referenciais no espaço.

Figura 3.2 – Representação dos sistemas de referência do modelo matemático.



Fonte: Adaptado de (NIKU, 2010)

A representação de um sistema de referência se dá através da determinação de três eixos ortogonais entre si e o ponto onde estes três eixos se interceptam (origem). Um sistema de referência auxiliar (a, b, c) deve ser representado tomando como referência o sistema global (x, y, z), logo, pode-se determinar um sistema de referência auxiliar através da representação dos cossenos diretores dos vetores unitários de direção (NIKU, 2010). Desta forma, a representação matricial do sistema de referência auxiliar, ilustrado na figura 3.2, é:

$$R_{a,b,c} = \begin{bmatrix} a_x & b_x & c_x & p_x \\ a_y & b_y & c_y & p_y \\ a_z & b_z & c_z & p_z \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

As três primeiras colunas da matriz representam os cossenos diretores x , y e z dos vetores a , b e c respectivamente, enquanto a quarta coluna representa a posição da origem.

3.1 MATRIZES DE TRANSFORMAÇÃO HOMOGÊNEAS

Para que seja possível realizar uma multiplicação de duas matrizes o número de colunas da primeira deve corresponder ao número de linhas da segunda. A representação do sistema de referência descrito na matriz 3.1 resultou em uma matriz 3x4, o que impossibilita algumas operações matemáticas. Para contornar esta limitação, adiciona-se a esta matriz

uma linha contendo coeficiente de escala dos vetores, transformando-a em uma matriz homogênea 4x4 (NIKU, 2010).

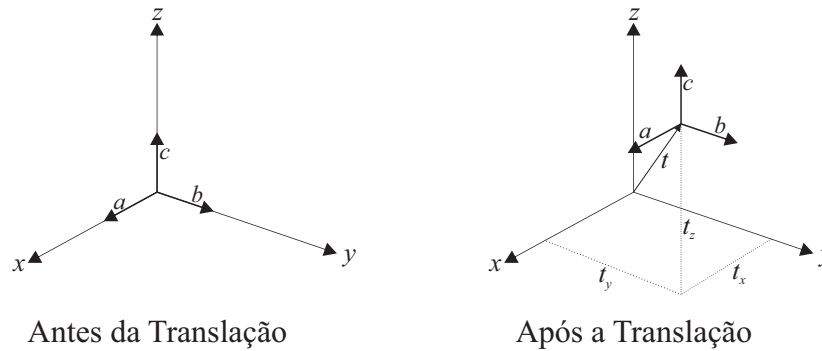
$$R_{a,b,c} = \begin{bmatrix} a_x & b_x & c_x & p_x \\ a_y & b_y & c_y & p_y \\ a_z & b_z & c_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Nota-se que como os elementos $R_{a,b,c}(4,1)$, $R_{a,b,c}(4,2)$ e $R_{a,b,c}(4,3)$ estão vinculados à vetores unitários de direção, e como estes vetores não representam posição e sim somente direção, o coeficiente de escala destes é igual a 0. O elemento $R_{a,b,c}(4,4)$ representa o fator de escala do referencial de origem, logo, para não haver alteração na posição do referencial, o mesmo é igual a 1, o que é equivalente a 100% do módulo do vetor p .

3.1.1 Matriz de Translação

Quando um referencial muda sua posição no espaço sem alteração de orientação diz-se que houve uma transformação de translação pura (imagem 3.3), neste caso, apenas a localização da origem do referencial se altera, permanecendo os vetores de orientação na mesma direção (NIKU, 2010).

Figura 3.3 – Representação de uma Translação.



Fonte: Adaptado de (NIKU, 2010)

Como os vetores de orientação não se alteram, a matriz da transformação de translação é descrita pela equação 3.3, onde t_x , t_y e t_z são as componentes do vetor t que representa a translação, e, as três primeiras colunas representam vetores unitários de direção paralelos

aos eixos x , y e z , ou seja, movimentos de rotação nulo (NIKU, 2010).

$$T_{t_{x,y,z}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Após a translação, a nova localização da origem é obtida somando-se o vetor que descreve a translação ao vetor que descreve a posição de inicial da origem, ou matricialmente, a representação do referencial $R_{a,b,c}$ na nova localização é obtida multiplicando este referencial na localização original pela matriz que representa a translação, conforme representado abaixo:

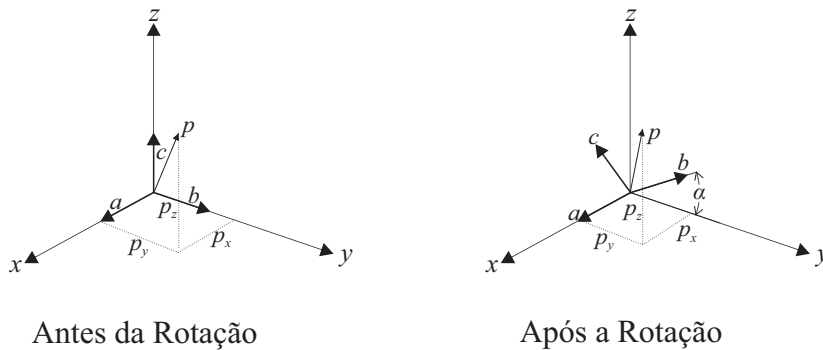
$$R'_{a,b,c} = R_{a,b,c} \cdot T_{t_{x,y,z}} \quad (3.4)$$

$$R'_{a,b,c} = \begin{bmatrix} a_x & b_x & c_x & p_x \\ a_y & b_y & c_y & p_y \\ a_z & b_z & c_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & b_x & c_x & p_x + t_x \\ a_y & b_y & c_y & p_y + t_y \\ a_z & b_z & c_z & p_z + t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

3.1.2 Matriz de Rotação

Quando um referencial rotaciona sobre um dos seus eixos sem que a origem se altere diz-se que houve uma transformação de rotação pura. Supondo que, um referencial $R_{a,b,c}$ cuja origem coincide com a origem do referencial global ($R_{x,y,z}$), e que, ligado ao referencial $R_{a,b,c}$ exista um ponto p , ao girar $R_{a,b,c}$ em torno do eixo x o ponto p também irá rodar (figura 3.4).

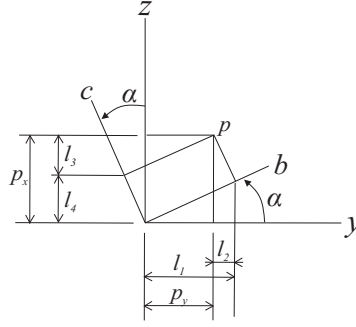
Figura 3.4 – Representação de uma Rotação.



Fonte: Adaptado de (NIKU, 2010)

As coordenadas p_x, p_y e p_z antes da rotação eram iguais a p_a, p_b e p_c respectivamente. Após a rotação, p_a, p_b e p_c não se alteram pois o ponto está ligado a este referencial, porém, as coordenadas p_x, p_y e p_z se alteraram (NIKU, 2010). A figura 3.5 apresenta os sistemas de referência em duas dimensões, tomando como plano de visualização, o plano normal ao eixo x .

Figura 3.5 – Rotação sobre eixo x .



Fonte: Adaptado de (NIKU, 2010)

Analisando esta figura pode-se encontrar p_x, p_y e p_z após a rotação conforme abaixo:

$$\begin{aligned} p_x &= p_a \\ p_y &= l_1 - l_2 = p_b \cos \alpha - p_c \sin \alpha \\ p_z &= l_3 + l_4 = p_b \sin \alpha + p_c \cos \alpha \end{aligned} \quad (3.6)$$

ou de forma matricial:

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_a \\ p_b \\ p_c \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Como as coordenadas p_x, p_y e p_z antes da rotação são iguais as coordenadas p_a, p_b e p_c , ao analisar a matriz 3.7 percebe-se que, as coordenadas p_x, p_y e p_z após a rotação podem ser encontradas multiplicando as coordenadas originais p_x, p_y e p_z por uma matriz do tipo 3x3, a qual, é denominada matriz da transformação de rotação. Para que esta matriz seja compatível com a matriz de representação de referencial (3.2), adiciona-se uma coluna e uma linha a esta, tornando-a do tipo 4x4, desta forma, a matriz de transformação de rotação sobre o eixo x por um ângulo α , é denotada por $Rot(x, \alpha)$ e:

$$Rot(x, \alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

De forma similar à matriz de translação, a quarta coluna da matriz representa a posição, a qual tem é preenchida com os valores 0,0,0 e 1 pois as rotações ocorrem sobre a origem. A quarta linha representa o coeficiente de escala de cada vetor (NIKU, 2010). Estendendo este raciocínio, pode-se obter a matriz de rotação sobre o eixo y por um ângulo α denotada por $Rot(y, \alpha)$ e dada pela equação 3.9, e a matriz de rotação sobre o eixo z por um ângulo α denotada por $Rot(z, \alpha)$ e dada pela equação 3.10.

$$Rot(y, \alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$Rot(z, \alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

3.2 ESTRUTURA MECÂNICA PROPOSTA

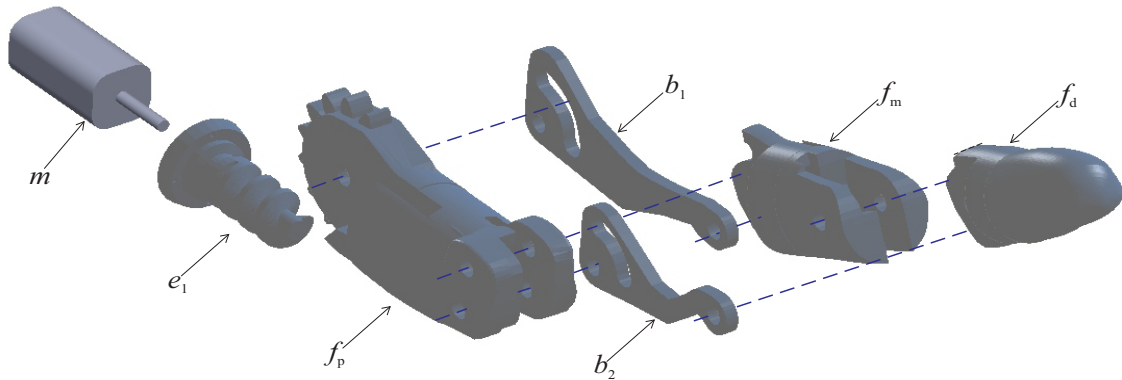
Em janeiro de 2012, Gael Langevin um escultor e designer francês, iniciou um projeto *open source* chamado InMoov cujo objetivo é a construção de um robô humanóide, fabricado por impressão 3D, cuja as dimensões aproximam-se as de um humano adulto. Dentre as várias partes desenvolvidas está a mão robótica com todos os seus componentes. A prótese tomará por base o conceito de dedo robótico e a transmissão de movimento do projeto InMoov. A figura 3.6 ilustra o dedo montado, enquanto a figura 3.7 apresenta a vista explodida do dedo. Neste conceito, a movimentação da falange proximal é efetuada pela rotação de uma engrenagem do tipo rosca sem fim (e_1) acoplada a um motor de corrente contínua (m) e a uma engrenagem do tipo coroa à qual está integrada a falange proximal (f_p). As falanges medial (f_m) e distal (f_d) são movimentadas pelas barras b_1 e b_2 .

Figura 3.6 – Dedo robótico do projeto InMoov.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 3.7 – Dedo robótico do projeto InMoov-Vista explodida.



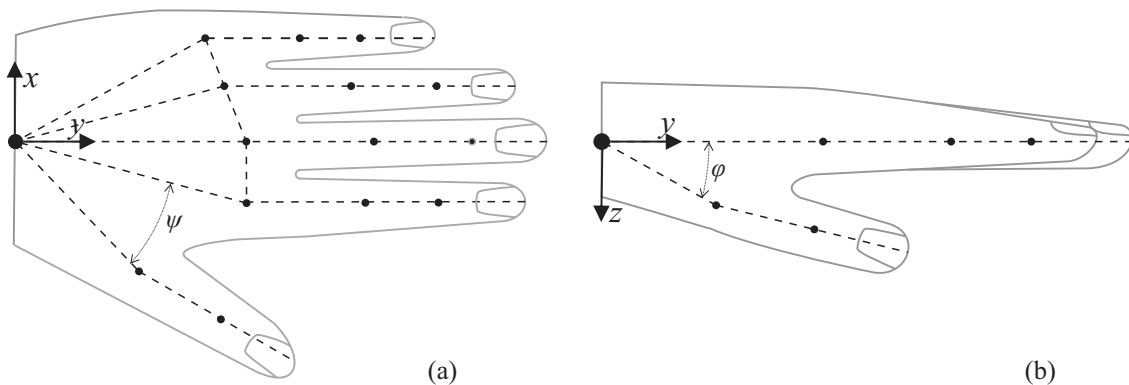
Fonte: Elaborado pelo autor.

O conceito adotado para a estrutura mecânica da prótese permite movimentos de rotação nas articulações metacarpofalangeanas e interfalangeanas em apenas um eixo de referência, logo, os dedos da prótese serão capazes de realizar apenas os movimentos de flexão e extensão, não sendo possível a realização dos movimentos de adução e abdução.

Levando em consideração a posição natural da mão humana, considerou-se o dedo médio disposto na prótese de forma que a sua linha central esteja sobre o eixo y do sistema de referência global. Os dedos: mínimo, anelar e indicador, foram dispostos paralelos ao dedo médio. Já para o dedo polegar por ser oposto, considerou-se rotação de ψ em relação ao eixo z e rotação de ω em relação ao eixo x . A figura 3.8 ilustra a estrutura adotada.

Figura 3.8 – Estrutura mecânica proposta

(a)Vista superior (b)Vista frontal



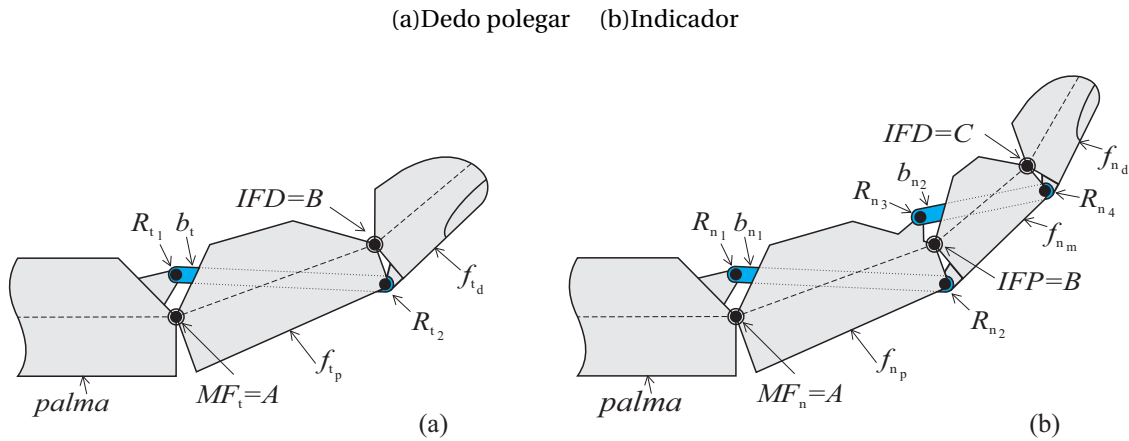
Fonte: Elaborada pelo autor.

A elaboração do modelo matemático se dará no equacionamentos para calcular os elementos de transmissão de movimento, a relação angular entre a as falanges, e, para calcular o espaço de trabalho dos dedos.

3.3 ELEMENTOS DE TRANSMISSÃO DE MOVIMENTO

Os principais elementos de transmissão de movimento são as barras de interconexão das juntas de rotação, indicadas na figura 3.9 por b_t , b_{n_1} e b_{n_2} . Os comprimentos destas barras são determinadas em função dos pontos de rotação R_{t_1} , R_{t_2} , R_{n_1} , R_{n_2} , R_{n_3} e R_{n_4} ; do comprimento das falanges e do movimento que a falange proximal deve provocar nas falanges medial e distal.

Figura 3.9 – Representação esquemática dos dedos da prótese



Fonte: Elaborada pelo autor.

A configuração anatômica do polegar é diferente dos demais dedos uma vez que não possui a falange medial. Desta forma, serão apresentados dois modelos, um para o polegar, onde os parâmetros possuem o índice t , e outro modelo comum aos demais dedos onde os parâmetros possuem o índice n , tal que $n = i, m, r, l$ representando, respectivamente, os dedos indicador (*index*), médio (*middle*), anelar (*ring*) e mínimo (*little*). Serão consideradas aqui, o comprimento de um segmento para sua identificação no modelo.

Na mão humana, o movimento total de flexão do dedo médio na articulação metacarpofalangiana (MF) é próximo 90° , próximo a 110° na articulação interfalangeana proximal (IFP), e, próximo a 80° na articulação interfalangeana distal (IFD), tendendo a aumentar quando analisando os próximos dedos em direção ao dedo mínimo e tendendo a diminuir analisando na direção do dedo polegar (KAPANDJI, 2002). A prótese não prevê movimento de hiperextensão, portanto, para a estrutura proposta os ângulos de flexão e extensão foram adotados conforme tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Ângulos de flexão e extensão da prótese proposta

	MF (α)	IFP (β)	IPD (γ)
Polegar	0° à 70°	-	0° à 90°
Indicador/Médio/Anelar/Mínimo	0° à 90°	0° à 110°	0° à 80°

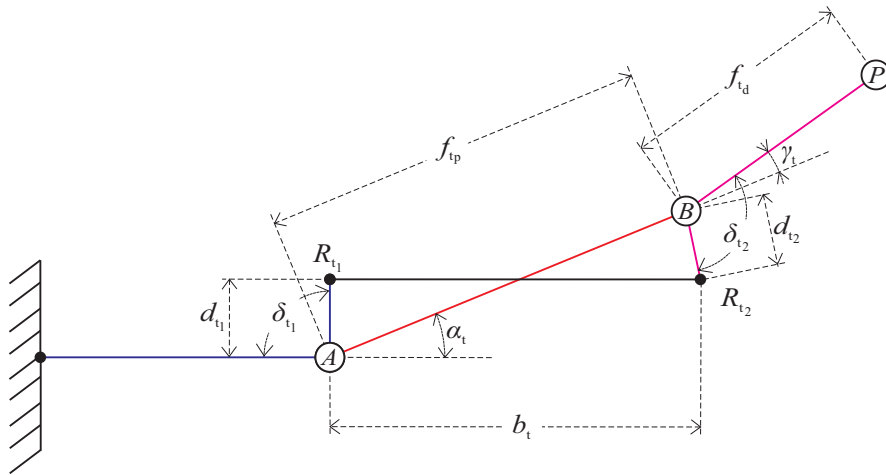
3.3.1 Modelo para o polegar

A figura 3.10 exibe o modelo para o polegar onde a barra b_t , que é transversal à falange proximal f_{tp} , deve movimentar a falange distal f_{td} .

As juntas de rotação metacarpofalangeana e interfalangeana distal são indicadas respectivamente por A e B . Os pontos de rotação onde está acoplada a barra b_t são indicados por R_{t1} e R_{t2} , cuja posição depende das distâncias d_{t1} e d_{t2} e dos ângulos δ_{t1} , formado entre d_{t1} e o plano da palma da mão, e δ_{t2} , formado entre d_{t2} e a falange distal. De forma que R_{t1} e R_{t2} permaneçam dentro do volume do polegar, contribuindo com a estética da prótese, d_{t1} é tomado como sendo 20% do comprimento da falange proximal, ou seja:

$$d_{t1} = 0,2f_{tp} \quad (3.11)$$

Figura 3.10 – Representação esquemática para o modelo de polegar



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para determinar os ângulos δ_{t1} e δ_{t2} , que devem ser fixos na estrutura, e a dimensão d_{t2} , o modelo é analisado nos casos extremos, ou seja, flexão total e extensão total. No primeiro caso, são considerados $\alpha_t = 70^\circ$ e $\gamma_t = 90^\circ$, já quando da extensão total, é considerado $\alpha_t = \gamma_t = 0^\circ$, conforme tabela 3.1.

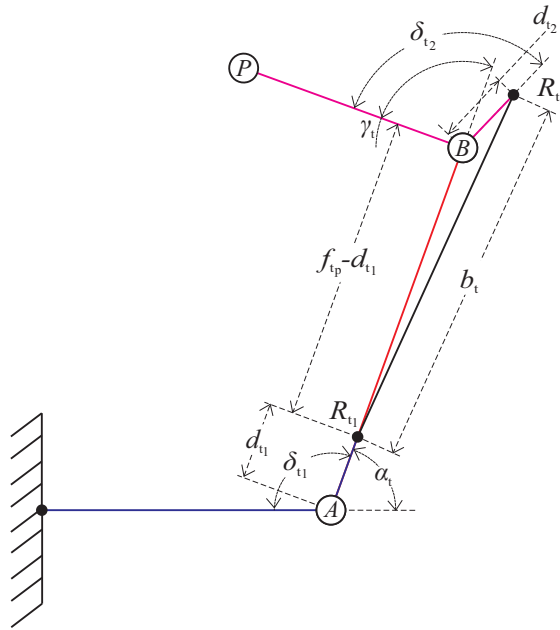
A figura 3.11 exibe o modelo de polegar em flexão total onde observa-se que, de modo a garantir a existência do triângulo $R_{t1}BR_{t2}$ com $R_{t1} \in \overline{AB}$, ou seja, os segmentos d_{t1} e $(f_{tp} - d_{t1})$ colineares, o valor de δ_{t1} deve ser 110° .

Nesta condição, utilizando a lei dos cossenos, a barra b_t é calculada por:

$$b_t^2 = (f_{tp} - d_{t1})^2 + d_{t2}^2 - 2(f_{tp} - d_{t1})d_{t2} \cos(180 - \delta_{t2} + \gamma_t)$$

$$b_t^2 = (f_{tp} - d_{t1})^2 + d_{t2}^2 - 2(f_{tp} - d_{t1})d_{t2} (\cos 90^\circ \cos \delta_{t2} + \sin 90^\circ \sin \delta_{t2})$$

Figura 3.11 – Modelo de polegar em flexão total



Fonte: Elaborada pelo autor.

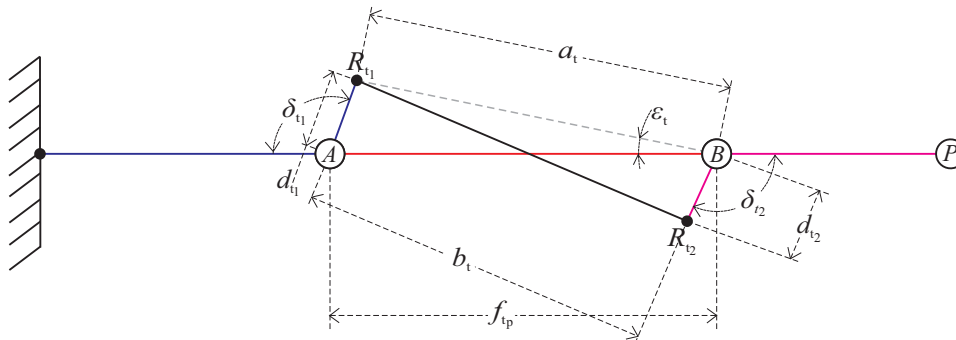
$$b_t^2 = (f_{tp} - d_{t1})^2 + d_{t2}^2 + 2(f_{tp} - d_{t1})d_{t2} \sin \delta_{t2} \quad (3.12)$$

onde utilizando (3.11) obtém-se:

$$b_t^2 = 0,64 f_{tp}^2 + d_{t2}^2 + 1,6 f_{tp} d_{t2} \sin \delta_{t2} \quad (3.13)$$

Por outro lado, a figura 3.12 exibe o modelo de polegar na extensão total ($\alpha_t = \gamma_t = 0^\circ$), para auxiliar no cálculo da dimensão da barra b_t é tomado um segmento auxiliar denominado a_t , sendo $a_t = \overline{R_{t1}B}$, formando o triângulo $R_{t1}BR_{t2}$. Este segmento tem a dimensão determinada considerando o triângulo $AR_{t1}B$ conforme a equação 3.14.

Figura 3.12 – Modelo de polegar em extensão total



Fonte: Elaborada pelo autor.

$$a_t^2 = f_{t_p}^2 + d_{t_1}^2 - 2f_{t_p}d_{t_1}\cos(180^\circ - \delta_{t_1}) \quad (3.14)$$

Utilizando novamente (3.11) obtém-se:

$$\begin{aligned} a_t^2 &= f_{t_p}^2 + (0,2f_{t_p})^2 - 2f_{t_p}(0,2f_{t_p})\cos(180^\circ - 110^\circ) \\ a_t^2 &= f_{t_p}^2 + 0,04f_{t_p}^2 - 0,4f_{t_p}^2\cos 70^\circ = f_{t_p}^2(1,04 - 0,4\cos 70^\circ) \\ a_t &= f_{t_p}\sqrt{1,04 - 0,4\cos 70^\circ} \end{aligned} \quad (3.15)$$

Assim, b_t é calculado neste caso, aplicando e a lei dos cossenos no triângulo $R_{t_1}BR_{t_2}$, como:

$$b_t^2 = a_t^2 + d_{t_2}^2 - 2a_td_{t_2}\cos(180 - \delta_{t_2} + \epsilon_t) \quad (3.16)$$

onde ϵ_t é calculado considerando o triângulo $AR_{t_1}B$ e a equação (3.11):

$$d_{t_1}^2 = a_t^2 + f_{t_p}^2 - 2a_tf_{t_p}\cos\epsilon_t \rightarrow \cos\epsilon_t = \frac{a_t^2 + f_{t_p}^2 - d_{t_1}^2}{2a_tf_{t_p}} = \frac{a_t^2 + 0,96f_{t_p}^2}{2a_tf_{t_p}} \quad (3.17)$$

Como o mecanismo é o mesmo tanto em flexão total quanto em extensão total, d_{t_2} é calculado igualando-se (3.13) e (3.16) e com o auxílio de (3.15) e (3.17). Ainda considera-se $\delta_{t_2} = 115^\circ$ para padronização dimensional conforme os ângulos correspondentes para o modelo dos outros dedos, fato que será detalhado na seção seguinte, desta forma:

$$\begin{aligned} 0,64f_{t_p}^2 + d_{t_2}^2 + 1,6f_{t_p}d_{t_2}\sin 115^\circ &= a_t^2 + d_{t_2}^2 - 2a_td_{t_2}\cos(65^\circ + \epsilon_t) \\ 0,64f_{t_p}^2 - a_t^2 &= -2a_td_{t_2}\cos(65^\circ + \epsilon_t) - 1,6f_{t_p}d_{t_2}\sin 115^\circ \\ 0,64f_{t_p}^2 - a_t^2 &= d_{t_2}[-2a_t\cos(65^\circ + \epsilon_t) - 1,6f_{t_p}\sin 115^\circ] \\ d_{t_2} &= \frac{0,64f_{t_p}^2 - a_t^2}{-2a_t\cos(65^\circ + \epsilon_t) - 1,6f_{t_p}\sin 115^\circ} \\ d_{t_2} &= \frac{0,64f_{t_p}^2 - a_t^2}{-2a_t[\cos 65^\circ \cos \epsilon_t - \sin 65^\circ \sqrt{1 - \cos^2 \epsilon_t}] - 1,6f_{t_p}\sin 115^\circ} \end{aligned} \quad (3.18)$$

Reescrevendo (3.17) em termos de f_{t_p} aplicando (3.15), obtém-se:

$$\cos\epsilon_t = \frac{f_{t_p}^2(1,04 - 0,4\cos 70^\circ) + 0,96f_{t_p}^2}{2f_{t_p}\sqrt{f_{t_p}^2(1,04 - 0,4\cos 70^\circ)}} = \frac{f_{t_p}^2(2 - 0,4\cos 70^\circ)}{2f_{t_p}\sqrt{1,04 - 0,4\cos 70^\circ}} = \frac{2 - 0,4\cos 70^\circ}{2\sqrt{1,04 - 0,4\cos 70^\circ}}$$

$$\cos\epsilon_t = 0,98025151 \quad (3.19)$$

Agora, substituindo (3.19) e (3.15) em (3.18), finalmente encontra-se o valor da dimensão d_{t_2} em função de f_{t_p} :

$$d_{t_2} = \frac{0,64f_{t_p}^2 - f_{t_p}^2(1,04 - 0,4\cos 70^\circ)}{-2\sqrt{f_{t_p}^2(1,04 - 0,4\cos 70^\circ)}[\cos 65^\circ(0,98025151) - \sin 65^\circ\sqrt{1 - 0,98025151^2}] - 1,6f_{t_p}\sin 115^\circ}$$

$$d_{t_2} = \frac{0,64f_{t_p}^2 - 0,90319194f_{t_p}^2}{-2(0,95036411)(0,23504544)f_{t_p} - 1,6(0,90630779)f_{t_p}} = \frac{-0,26319194f_{t_p}}{-1,89684994f_{t_p}}$$

$$d_{t_2} = 0,138752f_{t_p} \quad (3.20)$$

O comprimento da barra b_t em função do comprimento da falange proximal f_{t_p} é encontrado aplicando o valor encontrado de d_{t_2} em (3.13):

$$b_t = \sqrt{0,64f_{t_p}^2 + d_{t_2}^2 + 1,6f_{t_p}d_{t_2}\sin 115^\circ}$$

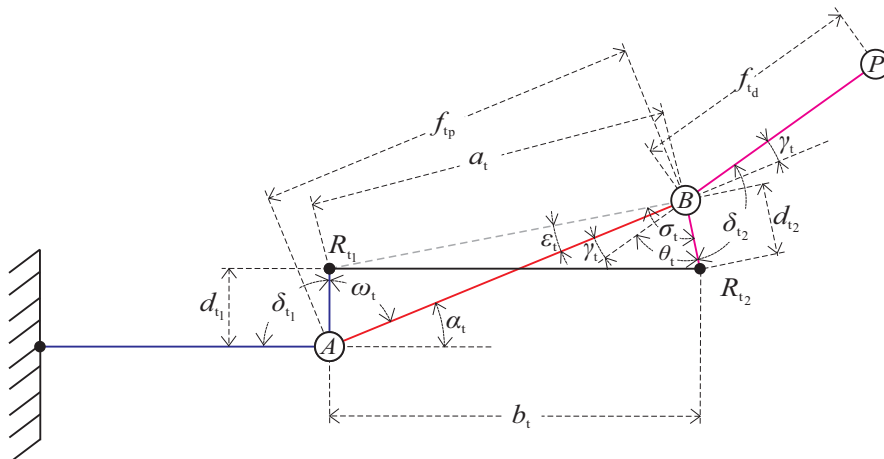
$$b_t = \sqrt{0,64f_{t_p}^2 + (0,138752f_{t_p})^2 + 1,6f_{t_p}0,138752f_{t_p}\sin 115^\circ}$$

$$b_t = \sqrt{0,64f_{t_p}^2 + 0,01925212f_{t_p}^2 + 0,20120323f_{t_p}^2}$$

$$b_t = 0,927607f_{t_p} \quad (3.21)$$

Agora, depois de encontrar a posição dos pontos de rotação R_{t_1} e R_{t_2} , e a dimensão da barra b_t em função da dimensão do dedo, resta-se encontrar a relação que descreve o movimento da falange distal em função do movimento da falange proximal, ou seja, a relação entre o ângulo de entrada α_t e o ângulo de saída γ_t . Para isto, considerando a configuração exibida na figura 3.13 é possível estabelecer as seguintes relações:

Figura 3.13 – Representação esquemática da relação entre os ângulos α_t e γ_t



Fonte: Elaborada pelo autor.

$$\delta_{t_1} + \omega_t + \alpha_t = 180^\circ \rightarrow \omega_t = 180^\circ - 110^\circ - \alpha_t = 70^\circ - \alpha_t \quad (3.22)$$

$$\sigma_t = \epsilon_t + \gamma_t + \theta_t \rightarrow \gamma_t = \sigma_t - \epsilon_t - \theta_t \quad (3.23)$$

$$\theta_t = 180^\circ - \delta_{t_2} = 180^\circ - 115^\circ = 65^\circ \quad (3.24)$$

Percebe-se que a dimensão do segmento de reta auxiliar a_t se altera para cada valor de α_t , para calcular esta dimensão aplica-se a lei dos cossenos no triângulo $AR_{t_1}B$, sendo:

$$a_t = \sqrt{f_{t_p}^2 + d_{t_1}^2 - 2f_{t_p}d_{t_1}\cos\omega_{t_1}} \quad (3.25)$$

Reescrevendo (3.25) utilizando (3.22) e (3.11) tem-se:

$$\begin{aligned} a_t &= \sqrt{f_{t_p}^2 + (0,2f_{t_p})^2 - 2f_{t_p}(0,2f_{t_p})2\cos(70^\circ - \alpha_t)} \\ a_t &= \sqrt{f_{t_p}^2 + 0,04f_{t_p}^2 - 0,4f_{t_p}^2\cos(70^\circ - \alpha_t)} \\ a_t &= f_{t_p}\sqrt{1,04 - 0,4\cos(70^\circ - \alpha_t)} \end{aligned} \quad (3.26)$$

Reescrevendo (3.17) em termos de f_{t_p} aplicando (3.26), obtêm-se:

$$\begin{aligned} \cos\epsilon_t &= \frac{f_{t_p}^2[1,04 - 0,4\cos(70^\circ - \alpha_t)] + 0,96f_{t_p}^2}{2f_{t_p}\sqrt{f_{t_p}^2[1,04 - 0,4\cos(70^\circ - \alpha_t)]}} \\ \cos\epsilon_t &= \frac{\cancel{f_{t_p}^2}[2 - 0,4\cos(70^\circ - \alpha_t)]}{2\cancel{f_{t_p}^2}\sqrt{1,04 - 0,4\cos(70^\circ - \alpha_t)}} \\ \cos\epsilon_t &= \frac{2 - 0,4\cos(70^\circ - \alpha_t)}{2\sqrt{1,04 - 0,4\cos(70^\circ - \alpha_t)}} \\ \epsilon_{t_1} &= \arccos\left[\frac{2 - 0,4\cos(70^\circ - \alpha_t)}{2\sqrt{1,04 - 0,4\cos(70^\circ - \alpha_t)}}\right] \end{aligned} \quad (3.27)$$

Agora, aplicando a lei dos cossenos ao triângulo R_1BR_2 encontra-se σ_{t_1} como:

$$b_t^2 = a_t^2 + d_{t_2}^2 - 2a_td_{t_2}\cos\sigma_{t_1} \rightarrow \cos\sigma_{t_1} = \frac{a_t^2 + d_{t_2}^2 - b_t^2}{2a_td_{t_2}} \quad (3.28)$$

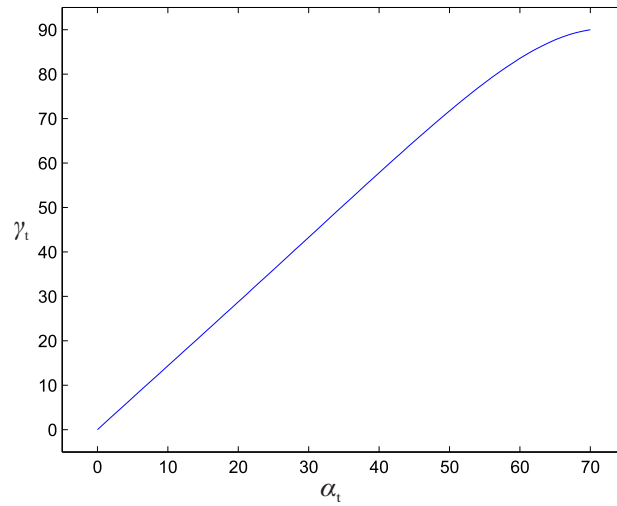
Reescrevendo (3.28) utilizando (3.26), (3.20) e (3.21), obtêm-se:

$$\begin{aligned}
\cos \sigma_{t_1} &= \frac{f_{t_p}^2 [1,04 - 0,4 \cos(70^\circ - \alpha_t)] + 0,01925212 f_{t_p}^2 - 0,86045475 f_{t_p}^2}{2 \sqrt{f_{t_p}^2 [1,04 - 0,4 \cos(70^\circ - \alpha_t)]} (0,138752 f_{t_p})} \\
\cos \sigma_{t_1} &= \frac{f_{t_p}^2 [1,04 - 0,4 \cos(70^\circ - \alpha_t)] + 0,01925212 - 0,86045475}{f_{t_p}^2 [2 \sqrt{1,04 - 0,4 \cos(70^\circ - \alpha_t)}] (0,138752)} \\
\cos \sigma_{t_1} &= \frac{0,19879737 - 0,4 \cos(70^\circ - \alpha_t)}{0,277504 \sqrt{1,04 - 0,4 \cos(70^\circ - \alpha_t)}} \\
\sigma_{t_1} &= \arccos \left[\frac{0,19879737 - 0,4 \cos(70^\circ - \alpha_t)}{0,277504 \sqrt{1,04 - 0,4 \cos(70^\circ - \alpha_t)}} \right] \quad (3.29)
\end{aligned}$$

Finalmente, aplica-se (3.28) e (3.29) em (3.23), obtendo a equação (3.30) que descreve o ângulo γ_t em função do ângulo α_t para a estrutura mecânica proposta. A figura 3.14 representa graficamente a relação entre estes ângulos.

$$\gamma_t = \arccos \left[\frac{0,19879737 - 0,4 \cos(70^\circ - \alpha_t)}{0,277504 \sqrt{1,04 - 0,4 \cos(70^\circ - \alpha_t)}} \right] - \arccos \left[\frac{2 - 0,4 \cos(70^\circ - \alpha_t)}{2 \sqrt{1,04 - 0,4 \cos(70^\circ - \alpha_t)}} \right] - 65^\circ \quad (3.30)$$

Figura 3.14 – Relação entre os ângulos α_t e γ_t

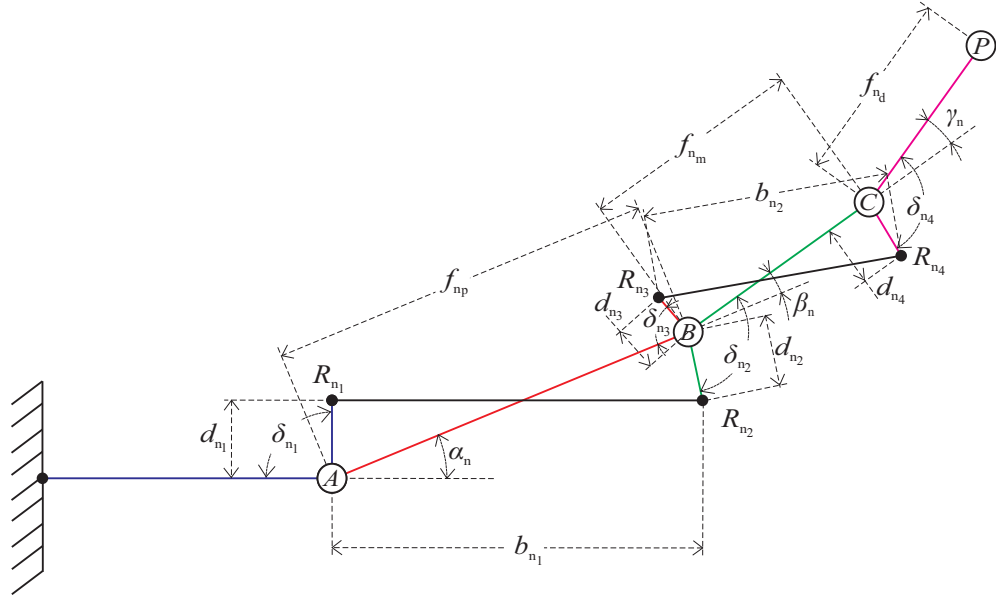


Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.2 Modelo para os outros dedos

De modo análogo ao que foi apresentado para o modelo de polegar, a figura 3.15 exibe o modelo para os outros dedos, onde b_{n_1} e b_{n_2} são barras transversais, respectivamente, à falange proximal (f_{n_p}) e à medial (f_{n_m}), que em ação conjunta, movimentam a falange distal (f_{n_d}).

Figura 3.15 – Representação esquemática para o modelo dos dedos indicador, médio, anelar e mínimo



Fonte: Elaborada pelo autor.

As juntas de rotação metacarpofalangeanas, interfalangeanas proximal e distal são respectivamente indicadas por A (MF), B (IFP) e C (IFD).

Os pontos de fixação das barras b_{n1} e b_{n2} são respectivamente R_{n1} , R_{n2} , R_{n3} e R_{n4} cuja posição depende das distâncias d_{n1} , d_{n2} , d_{n3} e d_{n4} e dos ângulos seguintes:

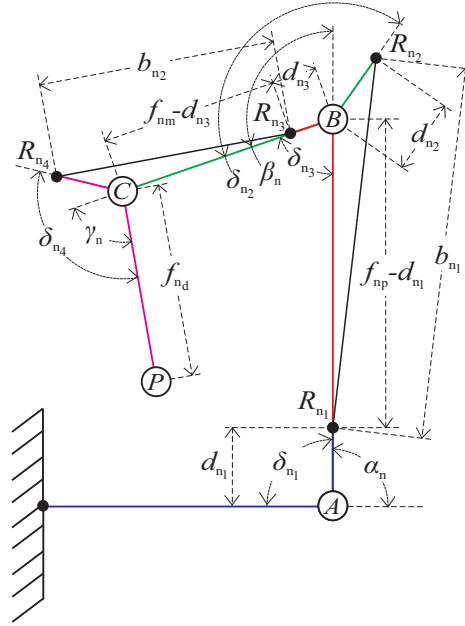
- δ_{n1} : entre d_{n1} e o plano da palma da mão;
- δ_{n2} : entre d_{n2} e falange medial;
- δ_{n3} : entre d_{n3} e falange proximal;
- δ_{n4} : entre d_{n4} e falange distal.

De forma que os pontos R_{n1} , R_{n2} , R_{n3} e R_{n4} estejam dentro do volume dos dedos as distâncias d_{n1} e d_{n3} são tomadas como:

$$\begin{aligned} d_{n1} &= 0,2 f_{np} \\ d_{n3} &= 0,2 f_{nm} \end{aligned} \quad (3.31)$$

Seguindo o mesmo raciocínio usado no modelo para o polegar, para a determinação dos ângulos δ_{n1} , δ_{n2} , δ_{n3} e δ_{n4} , que também devem ser fixos na estrutura, o modelo deve ser analisado para os casos de flexão total ($\alpha_n = 90^\circ$, $\beta_n = 110^\circ$ e $\gamma_n = 80^\circ$) e extensão total ($\alpha_n = \beta_n = \gamma_n = 0^\circ$), conforme tabela 3.1. Este procedimento também permite o cálculo de d_{n2} e d_{n4} .

A figura 3.16 exhibe o modelo para os dedos indicador, médio, anelar e mínimo, cuja variação se dá pelo índice n , que assume respectivamente os índices i (*index*), m (*middle*), r (*ring*) e l (*little*). Nesta primeira situação é considerada flexão total.

Figura 3.16 – Modelo para os dedos i, m, r e l em flexão total.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para garantir a existência dos triângulos $R_{n1}BR_{n2}$ com $R_{n1} \in \overline{AB}$ e $R_{n3}CR_{n4}$ com $R_{n3} \in \overline{BC}$, ou seja, d_{n1} com $(f_{np} - d_{n1})$ e d_{n3} com $(f_{nm} - d_{n3})$, colineares, os valores de δ_{n1} e δ_{n2} devem ser, respectivamente, 90° e 115° . Além disso, $\delta_{n3} = 70^\circ$, e para padronização dimensional, toma-se $\delta_{n4} = 115^\circ$.

Tomando o triângulo $R_{n1}BR_{n2}$ e aplicando a lei dos cossenos, calcula-se a dimensão da barra b_{n1} :

$$b_{n1}^2 = (f_{np} - d_{n1})^2 + d_{n2}^2 - 2(f_{np} - d_{n1})d_{n2} \cos(180^\circ - \delta_{n2} + \beta_n) \quad (3.32)$$

onde usando (3.31), e usando $\beta_n = 110^\circ$ e $\delta_{n2} = 115^\circ$, obtém-se:

$$b_{n1}^2 = 0,64f_{np}^2 + d_{n2}^2 - 1,6f_{np}d_{n2} \cos 175^\circ \quad (3.33)$$

Agora, tomando o triângulo $R_{n3}CR_{n4}$, a barra b_{n2} é calculada por:

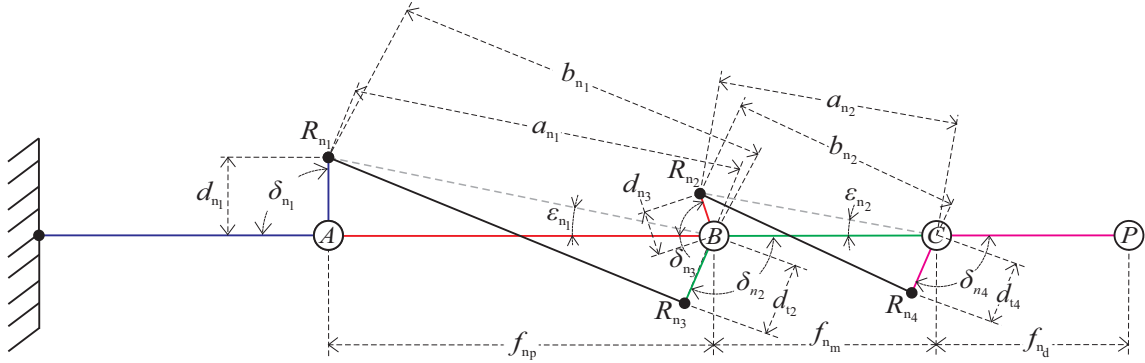
$$b_{n2}^2 = (f_{nm} - d_{n3})^2 + d_{n4}^2 - 2(f_{nm} - d_{n3})d_{n4} \cos(180^\circ - \delta_{n4} + \gamma_n) \quad (3.34)$$

onde usando (3.31) novamente, e, $\gamma_n = 80^\circ$ e $\delta_{n4} = 115^\circ$, obtém-se:

$$b_{n2}^2 = 0,64f_{nm}^2 + d_{n4}^2 - 1,6f_{nm}d_{n4} \cos 145^\circ \quad (3.35)$$

No caso de extensão total ($\alpha_n = \beta_n = \gamma_n = 0^\circ$) exibido na figura 3.17, são tomados os segmentos $a_{n_1} = \overline{R_{n_1}B}$ e $a_{n_2} = \overline{R_{n_3}C}$ para auxiliar no cálculo de b_{n_1} e b_{n_2} , e a lei dos cossenos sobre os triângulos $R_{n_1}AB$ e $R_{n_3}BC$.

Figura 3.17 – Modelo para os dedos i, m, r e l em extensão total



Fonte: Elaborada pelo autor.

$$a_{n_1}^2 = d_{n_1}^2 + f_{n_p}^2 - 2d_{n_1}f_{n_p} \cos(180^\circ - \delta_{n_1}) \quad (3.36)$$

$$a_{n_2}^2 = d_{n_3}^2 + f_{n_m}^2 - 2d_{n_3}f_{n_m} \cos(180^\circ - \delta_{n_3}) \quad (3.37)$$

ou ainda, usando (3.31):

$$a_{n_1}^2 = (0,2f_{n_p})^2 + f_{n_p}^2 - 2(0,2f_{n_p})f_{n_p} \cos(180^\circ - 90^\circ)$$

$$a_{n_1}^2 = 0,04f_{n_p}^2 + f_{n_p}^2 - 0,4f_{n_p}^2 \cos 90^\circ = 1,04f_{n_p}^2$$

$$a_{n_1} = f_{n_p} \sqrt{1,04} \quad (3.38)$$

$$a_{n_2}^2 = (0,2f_{n_m})^2 + f_{n_m}^2 - 2(0,2f_{n_m})f_{n_m} \cos(180^\circ - 70^\circ)$$

$$a_{n_2}^2 = 0,04f_{n_m}^2 + f_{n_m}^2 - 0,4f_{n_m}^2 \cos 110^\circ = f_{n_m}^2 (1,04 - 0,4 \cos 110^\circ)$$

$$a_{n_2} = f_{n_m} \sqrt{1,04 - 0,4 \cos 110^\circ} \quad (3.39)$$

Para recalcular a barra b_{n_1} nesta condição, utiliza-se o triângulo $R_{n_1}BR_{n_2}$:

$$b_{n_1}^2 = a_{n_1}^2 + d_{n_2}^2 - 2a_{n_1}d_{n_2} \cos(180^\circ - \delta_{n_2} - \epsilon_{n_1}) \quad (3.40)$$

onde usando (3.38):

$$b_{n_1}^2 = 1,04f_{n_p}^2 + d_{n_2}^2 - 2(f_{n_p} \sqrt{1,04})d_{n_2} \cos(65^\circ + \epsilon_{n_1}) \quad (3.41)$$

Agora, para recalcular a barra b_{n_2} , utiliza-se o triângulo $R_{n_3}CR_{n_4}$:

$$b_{n_2}^2 = a_{n_2}^2 d_{n_4}^2 - 2a_{n_2}d_{n_4} \cos(180^\circ - \delta_{n_4} - \epsilon_{n_2}) \quad (3.42)$$

onde usando (3.39):

$$b_{n_2}^2 = (1,04 - 0,4 \cos 110^\circ) f_{n_m}^2 + d_{n_4}^2 - 2[f_{n_m} \sqrt{(1,04 - 0,4 \cos 110^\circ)}] d_{n_4} \cos(65^\circ + \epsilon_{n_2}) \quad (3.43)$$

É preciso calcular os ângulos ϵ_{n_1} e ϵ_{n_2} . Por meio dos triângulos ABR_{n_1} e BCR_{n_3} obtêm-se:

$$d_{n_1}^2 = f_{n_p}^2 + a_{n_1}^2 - 2f_{n_p}a_{n_1} \cos \epsilon_{n_1} \quad (3.44)$$

$$d_{n_3}^2 = f_{n_m}^2 + a_{n_2}^2 - 2f_{n_m}a_{n_2} \cos \epsilon_{n_2} \quad (3.45)$$

Reescrevendo (3.44) e (3.45) utilizando (3.31), (3.38) e (3.39), ϵ_{n_1} e ϵ_{n_2} é calculado como:

$$(0,2f_{n_p})^2 = f_{n_p}^2 + 1,04f_{n_p}^2 - 2f_{n_p}(f_{n_p}\sqrt{1,04}) \cos \epsilon_{n_1} \rightarrow \cos \epsilon_{n_1} = \frac{2f_{n_p}^2}{2f_{n_p}^2\sqrt{1,04}}$$

$$\cos \epsilon_{n_1} = \frac{1}{\sqrt{1,04}} = 0,98058068 \quad (3.46)$$

$$(0,2f_{n_m})^2 = f_{n_m}^2 + f_{n_m}^2(1,04 - 0,4 \cos 110^\circ) - 2f_{n_m}f_{n_m}\sqrt{1,04 - 0,4 \cos 110^\circ} \cos \epsilon_{n_2}$$

$$\cos \epsilon_{n_2} = \frac{(2 - 0,4 \cos 110^\circ)f_{n_m}^2}{2\sqrt{1,04 - 0,4 \cos 110^\circ}f_{n_m}^2}$$

$$\cos \epsilon_{n_2} = \frac{2,13680806}{2,16961569} \quad (3.47)$$

Igualando (3.40) e (3.41) encontra-se d_{n_2} :

$$0,64f_{n_p}^2 + \cancel{d_{n_2}^2} - 1,6f_{n_p}d_{n_2} \cos 175^\circ = 1,04f_{n_p}^2 + \cancel{d_{n_2}^2} - 2(f_{n_p}\sqrt{1,04})d_{n_2} \cos(65^\circ + \epsilon_{n_1})$$

$$d_{n_2}[1,6f_{n_p} \cos 175^\circ + 2f_{n_p}\sqrt{1,04} \cos(65^\circ + \epsilon_{n_1})] = 1,04f_{n_p}^2 - 0,64f_{n_p}^2$$

$$d_{n_2} = \frac{0,4f_{n_p}}{-1,6 \cos 75^\circ + 2\sqrt{1,04} \cos(65^\circ + \epsilon_{n_1})}$$

$$d_{n_2} = \frac{0,4f_{n_p}}{1,59391152 + 2,03960781[\cos 65^\circ \cos \epsilon_{n_1} - \sin 65^\circ \sqrt{1 - \cos^2 \epsilon_{n_1}}]} \quad (3.48)$$

substituindo (3.46), obtêm-se d_{n_2} em função, exclusivamente, de f_{n_p} :

$$d_{n_2} = \frac{0,4f_{n_p}}{1,59391152 + 2,03960781 \cdot 0,23666974} = 0,192620f_{n_p} \quad (3.49)$$

Seguindo este raciocínio, igualando (3.42) e (3.43), e, utilizando (3.47), encontra-se a dimensão d_{n_4} :

$$\begin{aligned} & 0,64f_{n_m}^2 + d_{n_4}^2 - 1,6f_{n_m}d_{n_4}\cos 145^\circ = \\ & = (1,04 - 0,4\cos 110^\circ)f_{n_m}^2 + d_{n_4}^2 - 2f_{n_m}\sqrt{(1,04 - 0,4\cos 110^\circ)}d_{n_4}\cos(65^\circ + \epsilon_{n_2}) \\ & d_{n_4} = \frac{(1,04 - 0,4\cos 110^\circ)f_{n_m}^2 - 0,64f_{n_m}^2}{2f_{n_m}\sqrt{(1,04 - 0,4\cos 110^\circ)}\cos(65^\circ + \epsilon_{n_2}) - 1,6f_{n_m}\cos 145^\circ} \\ & d_{n_4} = \frac{0,53680806f_{n_m}^2}{1,31064327f_{n_m} + 2,16961569f_{n_m}[\cos 65^\circ \cos \epsilon_{n_2} - \sin 65^\circ \sqrt{1 - \cos^2 \epsilon_{n_2}}]} \\ & d_{n_4} = \frac{0,53680806f_{n_m}}{1,31064327 + 2,16961569 \cdot 0,25921356} = 0,286598f_{n_m} \end{aligned} \quad (3.50)$$

Retornando os valores encontrados em (3.49) e (3.50), respectivamente em (3.41) e (3.43) encontram-se os comprimentos das barras b_{n_1} e b_{n_2} em função exclusivamente dos comprimentos das falanges proximais (f_{n_p}) e mediais (f_{n_m}).

$$\begin{aligned} b_{n_1} &= \sqrt{1,04f_{n_p}^2 + (0,192620f_{n_p})^2 - 2(f_{n_p}\sqrt{1,04})0,192620f_{n_p}(\cos(65^\circ + \epsilon_{n_1}))} \\ &= \sqrt{1,07710246f_{n_p}^2 - 0,39286925f_{n_p}^2(\cos 65^\circ \cos \epsilon_{n_1} - \sin 65^\circ \sqrt{1 - \sin^2 \epsilon_{n_1}})} \\ b_{n_1} &= \sqrt{1,07710246f_{n_p}^2 - 0,39286925 \cdot 0,23666974f_{n_p}^2} = 0,992029f_{n_p} \end{aligned} \quad (3.51)$$

$$\begin{aligned} b_{n_2} &= \sqrt{1,17680806f_{n_m}^2 - (0,286598f_{n_m})^2 - 2,16961569f_{n_m}(0,286598f_{n_m})\cos(65^\circ + \epsilon_{n_2})} \\ &= \sqrt{1,25894647f_{n_m}^2 - 0,62180752f_{n_m}^2(\cos 65^\circ \cos \epsilon_{n_1} - \sin 65^\circ \sqrt{1 - \sin^2 \epsilon_{n_1}})} \\ b_{n_2} &= \sqrt{1,25894647f_{n_m}^2 + 0,62180752 \cdot 0,25921356f_{n_m}^2} = 1,047743f_{n_m} \end{aligned} \quad (3.52)$$

Agora, será encontrada a relação entre o ângulo de entrada α_n e os ângulos β_n e γ_n . Considerando a configuração na figura 3.18 obtêm-se as relações:

$$\delta_{n_1} + \omega_{n_1} + \alpha_n = 180^\circ \rightarrow \omega_{n_1} = 180^\circ - 90^\circ - \alpha_n$$

$$\omega_{n_1} = 90^\circ - \alpha_n \quad (3.53)$$

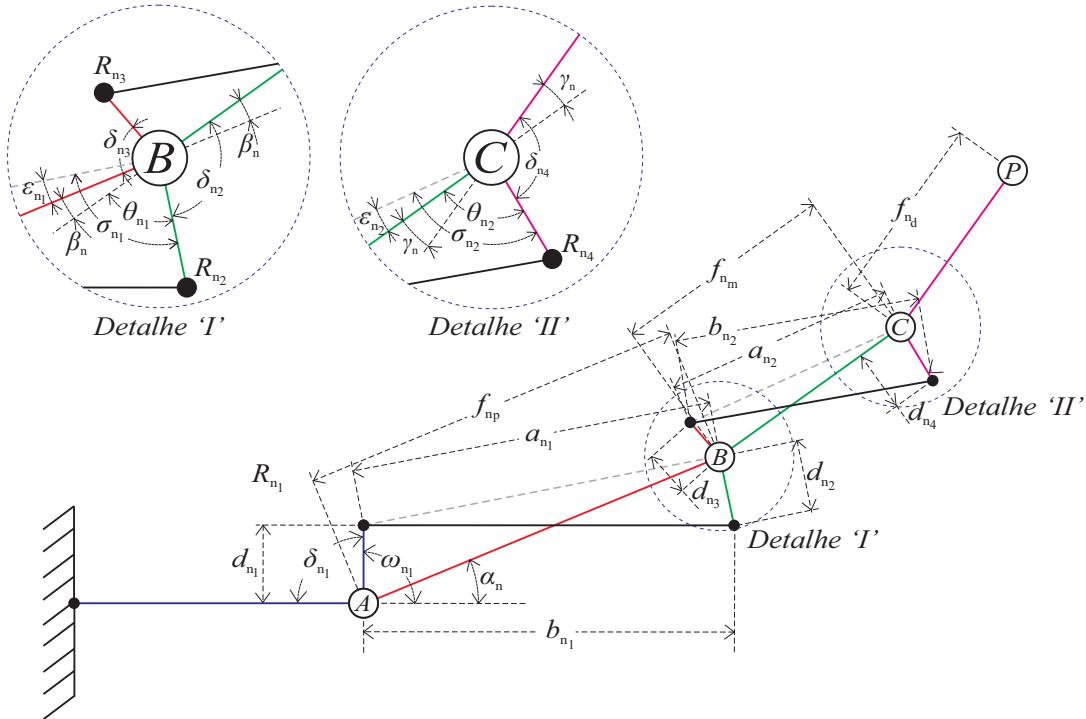
$$\theta_{n_1} = 180^\circ - \delta_{n_2} = 180^\circ - 115^\circ$$

$$\theta_{n_1} = 65^\circ \quad (3.54)$$

$$\sigma_{n_1} = \epsilon_{n_1} + \beta_n + \theta_{n_1} \rightarrow \beta_n = \sigma_{n_1} - \epsilon_{n_1} - \theta_{n_1}$$

$$\beta_n = \sigma_{n_1} - \epsilon_{n_1} - 65^\circ \quad (3.55)$$

Figura 3.18 – Representação esquemática da relação entre os ângulos α_n , β_n e γ_n .



Fonte: Elaborada pelo autor.

O segmento $a_{n_1} = \overline{R_{n_1}B}$ depende de α_n , e seu valor é calculado através do triângulo $AR_{n_1}B$:

$$a_{n_1} = \sqrt{f_{n_p}^2 + d_{n_1}^2 - 2f_{n_p}d_{n_1}\cos\omega_{n_1}} \quad (3.56)$$

De (3.31) e (3.53), a equação (3.56) é reescrita como:

$$\begin{aligned}
 a_{n_1} &= \sqrt{f_{n_p}^2 + (0,2f_{n_p})^2 - 2f_{n_p}(0,2f_{n_p})\cos(90^\circ - \alpha_n)} \\
 a_{n_1} &= \sqrt{f_{n_p}^2 + 0,04f_{n_p}^2 - 0,4f_{n_p}^2\cos 90^\circ - \alpha_n} \\
 a_{n_1} &= f_{n_p}\sqrt{1,04 - 0,4(\cos 90^\circ \cos \alpha_n + \sin 90^\circ \sin \alpha_n)} \\
 a_{n_1} &= f_{n_p}\sqrt{1,04 - 0,4\sin \alpha_n}
 \end{aligned} \tag{3.57}$$

Agora, usando o mesmo triângulo ($AR_{n_1}B$), e, com uso de (3.31) e (3.57), pode-se determinar ϵ_{n_1} como:

$$\begin{aligned}
 d_{n_1}^2 &= a_{n_1}^2 + f_{n_p}^2 - 2a_{n_1}f_{n_p}\cos \epsilon_{n_1} \rightarrow \cos \epsilon_{n_1} = \frac{a_{n_1}^2 + f_{n_p}^2 - d_{n_1}^2}{2a_{n_1}f_{n_p}} \\
 \cos \epsilon_{n_1} &= \frac{f_{n_p}^2(1,04 - 0,4\sin \alpha_n) + f_{n_p}^2 - (0,2f_{n_p})^2}{2f_{n_p}^2\sqrt{1,04 - 0,4\sin \alpha_n}} = \frac{\cancel{f_{n_p}^2}(2 - 0,4\sin \alpha_n)}{\cancel{f_{n_p}^2}2\sqrt{1,04 - 0,4\sin \alpha_n}} \\
 \epsilon_{n_1} &= \arccos\left(\frac{2 - 0,4\sin \alpha_n}{2\sqrt{1,04 - 0,4\sin \alpha_n}}\right)
 \end{aligned} \tag{3.58}$$

Tomando o triângulo $R_{n_1}BR_{n_2}$ é possível determinar σ_{n_1} :

$$b_{n_1}^2 = a_{n_1}^2 + d_{n_2}^2 - 2a_{n_1}d_{n_2}\cos \sigma_{n_1} \rightarrow \cos \sigma_{n_1} = \frac{a_{n_1}^2 + d_{n_2}^2 - b_{n_1}^2}{2a_{n_1}d_{n_2}} \tag{3.59}$$

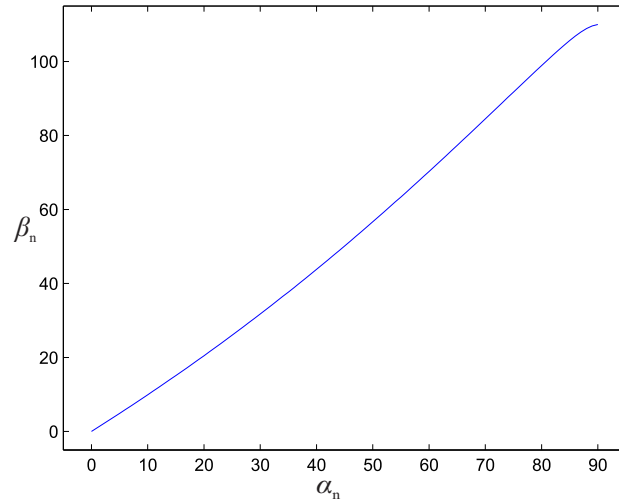
onde substituindo (3.57), (3.51) e (3.49):

$$\begin{aligned}
 \cos \sigma_{n_1} &= \frac{f_{n_p}^2(1,04 - 0,4\sin \alpha_n) + (0,192620f_{n_p})^2 - (0,992029f_{n_p})^2}{2f_{n_p}\sqrt{1,04 - 0,4\sin \alpha_n}0,192620f_{n_p}} \\
 \cos \sigma_{n_1} &= \frac{\cancel{f_{n_p}^2}(0,09298093 - 0,4\sin \alpha_n)}{0,38524\cancel{f_{n_p}^2}\sqrt{1,04 - 0,4\sin \alpha_n}} \\
 \sigma_{n_1} &= \arccos\left(\frac{0,09298093 - 0,4\sin \alpha_n}{0,38524\sqrt{1,04 - 0,4\sin \alpha_n}}\right)
 \end{aligned} \tag{3.60}$$

Finalmente de (3.55), (3.58) e (3.60) tem-se a equação (3.61) que descreve o ângulo β_n em função do ângulo α_n . A figura 3.19 ilustra a relação entre estes ângulos.

$$\beta_n = \arccos\left(\frac{0,09298093 - 0,4\sin \alpha_n}{0,38524\sqrt{1,04 - 0,4\sin \alpha_n}}\right) - \arccos\left(\frac{2 - 0,4\sin \alpha_n}{2\sqrt{1,04 - 0,4\sin \alpha_n}}\right) - 65^\circ \tag{3.61}$$

De modo análogo ao que foi desenvolvido para o ângulo β , da figura 3.18 são consideradas as seguintes relações:

Figura 3.19 – Relação entre os ângulos α_n e β_n 

Fonte: Elaborada pelo autor.

$$\delta_{n_3} + \omega_{n_2} + \beta_n = 180^\circ \rightarrow \omega_{n_2} = 180^\circ - 90^\circ - \beta_n$$

$$\omega_{n_2} = 110^\circ - \beta_n \quad (3.62)$$

$$\theta_{n_2} = 180^\circ - \delta_{n_4} = 180^\circ - 115^\circ$$

$$\theta_{n_2} = 65^\circ \quad (3.63)$$

$$\sigma_{n_2} = \epsilon_{n_2} + \gamma_n + \theta_{n_2} \rightarrow \gamma_n = \sigma_{n_2} - \epsilon_{n_2} - \theta_{n_2}$$

$$\gamma_n = \sigma_{n_2} - \epsilon_{n_2} - 65^\circ \quad (3.64)$$

O segmento $a_{n_2} = \overline{R + n_3 C}$ depende de β , e seu valor é calculado através do triângulo $BR_{n_3}C$:

$$a_{n_2} = \sqrt{f_{n_m}^2 + d_{n_3}^2 - 2f_{n_m}d_{n_3}\cos\omega_{n_2}} \quad (3.65)$$

De (3.31) e (3.62), a equação (3.65) é reescrita como:

$$a_{n_2} = \sqrt{f_{n_m}^2 + (0,2f_{n_m})^2 - 2f_{n_m}(0,2f_{n_m})\cos(110^\circ - \beta_n)}$$

$$a_{n_2} = \sqrt{f_{n_m}^2 + 0,04f_{n_m}^2 - 0,4f_{n_m}^2\cos(110^\circ - \beta_n)}$$

$$a_{n_2} = f_{n_m} \sqrt{1,04 - 0,4 \cos(110^\circ - \beta_n)} \quad (3.66)$$

Utilizando o mesmo raciocínio utilizado para determinar ϵ_{n_1} , utiliza-se o triângulo $BR_{n_3}C$, e as equações (3.31) e (3.66) para determinar ϵ_{n_2} , como:

$$\begin{aligned} d_{n_3}^2 &= a_{n_2}^2 + f_{n_m}^2 - 2a_{n_2}f_{n_m} \cos \epsilon_{n_2} \rightarrow \cos \epsilon_{n_2} = \frac{a_{n_2}^2 + f_{n_m}^2 - d_{n_3}^2}{2a_{n_2}f_{n_m}} \\ \cos \epsilon_{n_2} &= \frac{f_{n_m}^2 [1,04 - 0,4 \cos(110^\circ - \beta_n)] + f_{n_m}^2 - (0,2f_{n_m})^2}{2f_{n_m}^2 \sqrt{1,04 - 0,4 \cos(110^\circ - \beta_n)}} = \frac{\cancel{f_{n_m}^2} [2 - 0,4 \cos(110^\circ - \beta_n)]}{2\cancel{f_{n_m}^2} \sqrt{1,04 - 0,4 \cos(110^\circ - \beta_n)}} \\ \epsilon_{n_2} &= \arccos \left[\frac{2 - 0,4 \cos(110^\circ - \beta_n)}{2\sqrt{1,04 - 0,4 \cos(110^\circ - \beta_n)}} \right] \end{aligned} \quad (3.67)$$

Pelo triângulo $R_{n_3}CR_{n_4}$ é possível calcular σ_{n_2} :

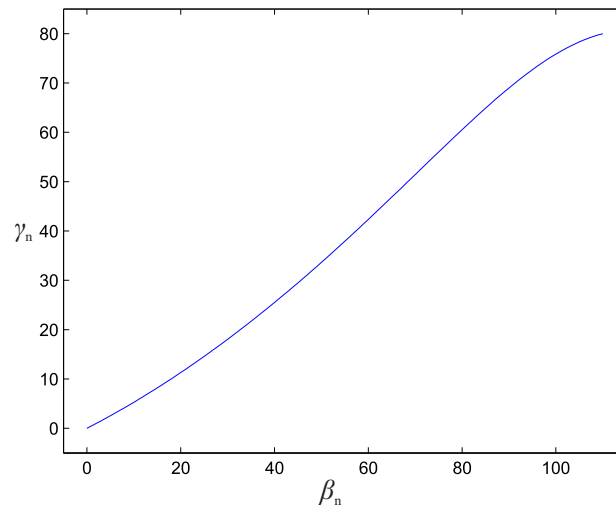
$$b_{n_2}^2 = a_{n_2}^2 + d_{n_4}^2 - 2a_{n_2}d_{n_4} \cos \sigma_{n_2} \rightarrow \cos \sigma_{n_2} = \frac{a_{n_2}^2 + d_{n_4}^2 - b_{n_2}^2}{2a_{n_2}d_{n_4}} \quad (3.68)$$

substituindo (3.66), (3.52) e (3.50):

$$\begin{aligned} \cos \sigma_{n_2} &= \frac{f_{n_p}^2 [1,04 - 0,4 \cos(110^\circ - \beta_n)] + 0,286598f_{n_m}^2 - 1,047743f_{n_m}^2}{2f_{n_p} \sqrt{1,04 - 0,4 \cos(110^\circ - \beta_n)} 0,286598f_{n_m}} \\ \cos \sigma_{n_2} &= \frac{\cancel{f_{n_p}^2} [0,02437302 - 0,4 \cos(110^\circ - \beta_n)]}{0,573196\cancel{f_{n_p}^2} \sqrt{1,04 - 0,4 \cos(110^\circ - \beta_n)}} \\ \sigma_{n_2} &= \arccos \left[\frac{0,02437302 - 0,4 \cos(110^\circ - \beta_n)}{0,573196 \sqrt{1,04 - 0,4 \cos(110^\circ - \beta_n)}} \right] \end{aligned} \quad (3.69)$$

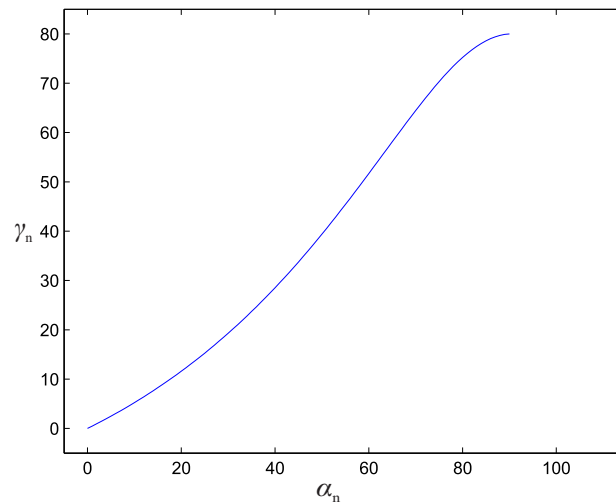
portanto de (3.64), (3.67) e (3.69) obtém-se a equação 3.70 que correlaciona os ângulos γ_n e β_n . A figura 3.20 ilustra esta relação.

$$\gamma_n = \arccos \left[\frac{0,02437302 - 0,4 \cos(110^\circ - \beta_n)}{0,573196 \sqrt{1,04 - 0,4 \cos(110^\circ - \beta_n)}} \right] - \arccos \left[\frac{2 - 0,4 \cos(110^\circ - \beta_n)}{2\sqrt{1,04 - 0,4 \cos(110^\circ - \beta_n)}} \right] - 65^\circ \quad (3.70)$$

Figura 3.20 – Relação entre os ângulos β_n e γ_n 

Fonte: Elaborada pelo autor.

Substituindo a equação (3.61) em (3.70) encontra-se a relação entre os ângulos γ_n e α_n para o estrutura mecânica proposta. A figura 3.21 apresenta esta relação.

Figura 3.21 – Relação entre os ângulos α_n e γ_n 

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4 REFERENCIAL PARA OS DEDOS DA PRÓTESE

Como já descrito anteriormente, o modelo matemático da próteses deverá ser capaz de fornecer a posição da extensão final de cada dedo, aqui representado no espaço, pelos pontos P_1 , P_2 , P_3 , P_4 e P_5 , cujas respectivas coordenadas são P_{n_x} , P_{n_y} e P_{n_z} com $n = 1, 2, 3, 4, 5$, representando respectivamente, os dedos mínimo, anelar, médio, indicador e polegar.

Na seção anterior foram apresentados dois modelos que descrevem as relações entre os ângulos das articulações para a estrutura mecânica proposta. Devido à diferença de configuração anatômica entre o polegar e os demais dedos da mão, aqui são apresentados dois modelos que descrevem a trajetória dos pontos das articulações em função dos ângulos em flexão e extensão, um para o polegar e outro para os demais dedos. Desta forma, a modelagem matemática da estrutura mecânica da prótese proposta se completa.

Para descrever a posição dos pontos P_1, P_2, P_3, P_4 e P_5 no espaço, toma-se o referencial auxiliar $R_{a,b,c}$ na mesma posição, direção e sentido do referencial global $R_{x,y,z}$ e então, pelas matrizes de transformação (rotação e translação), leva-se o referencial $R_{a,b,c}$ até a ponta dos dedos.

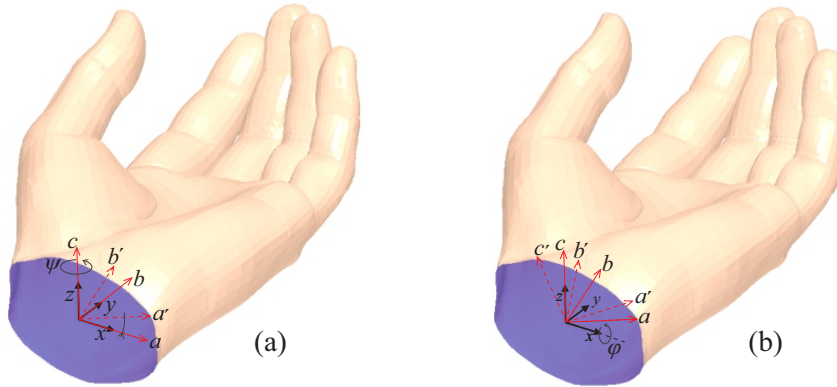
3.4.1 Coordenadas para o Polegar

São necessárias quatro transformações para posicionar o polegar na palma da mão, a partir do centro do punho:

- $Rot(\psi, z)$: rotação sobre o eixo z , por um ângulo ψ (equação 3.10);
- $Rot(\phi, x)$: rotação sobre o eixo x , por um ângulo ϕ_t (equação 3.8);
- $T(t_a, t_b, t_c)$: translação pelo vetor $t = (t_a, t_b, t_c)$ (equação 3.3);
- $Rot(\rho, b)$: rotação sobre o eixo b , por um ângulo ρ (equação 3.9);

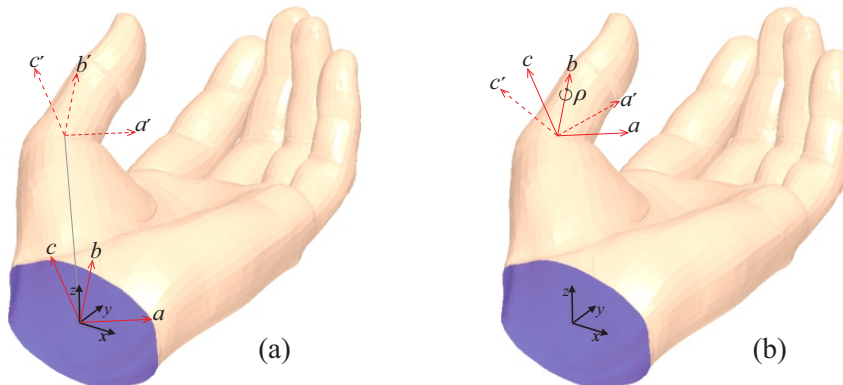
A Figura 3.22 e 3.23 exibe os efeitos das transformações, na sequência exposta anteriormente, e a equação 3.71, exibe as novas coordenadas da articulação metacarpofalangeana (P_a, P_b, P_c), em relação ao sistema global XYZ (P_x, P_y, P_z), centrado no punho, considerando as matrizes da seção 3.1:

Figura 3.22 – Diagrama de transformações para o polegar.

(a) $Rot(\psi, z)$ (b) $Rot(\phi, x)$ 

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3.23 – Diagrama de transformações para o polegar.

(a) $T(t_a, t_b, t_c)$ (b) $Rot(\rho, b)$ 

Fonte: Elaborada pelo autor.

$$\begin{bmatrix} P_a \\ P_b \\ P_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \rho & 0 & -\sin \rho & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \rho & 0 & \cos \rho & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_a \\ 0 & 1 & 0 & t_b \\ 0 & 0 & 1 & t_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\rho & 0 & -\sin\rho & \cos\rho t_a - \sin\rho t_c \\ 0 & 1 & 0 & t_b \\ -\sin\rho & 0 & \cos\rho & -\sin\rho t_a + \cos\rho t_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 & 0 \\ \cos\phi\sin\psi & \cos\phi\cos\psi & -\sin\phi & 0 \\ \sin\phi\sin\psi & \sin\phi\cos\psi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} =$$

onde para facilitar a notação, substitui-se $\cos$ por C e $\sin$ por S , obtendo:

$$= \begin{bmatrix} C\rho C\psi - S\rho S\phi S\psi & -C\rho S\psi - S\rho S\phi C\psi & -S\rho C\phi & C\rho t_a - S\rho t_c \\ C\phi S\psi & C\phi C\psi & -S\phi & t_b \\ -S\rho C\psi + C\rho S\phi S\psi & S\rho S\psi + C\rho S\phi C\psi & C\rho C\phi & -S\rho t_a + C\rho t_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.71)$$

ou:

$$P_a = (\cos\rho\cos\psi - \sin\rho\sin\phi\sin\psi)P_x - (\cos\rho\sin\psi + \sin\rho\sin\phi\cos\psi)P_y - (\sin\rho\cos\phi)P_z + \cos\rho t_a - \sin\rho t_c \quad (3.72)$$

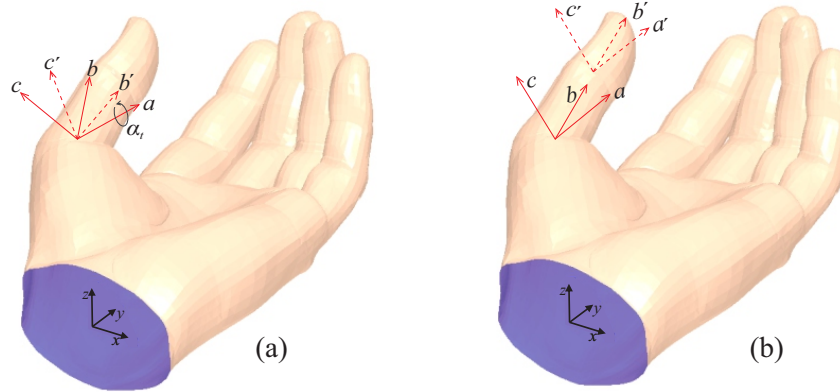
$$P_b = (\cos\phi\sin\psi)P_x + (\cos\phi\cos\psi)P_y - (\sin\phi)P_z + t_b \quad (3.73)$$

$$P_c = (-\sin\rho\cos\psi + \cos\rho\sin\phi\sin\psi)P_x + (\sin\rho\sin\psi + \cos\rho\sin\phi\cos\psi)P_y + (\cos\rho\cos\phi)P_z - \sin\rho t_a + \cos\rho t_c \quad (3.74)$$

Agora, considerando as coordenadas encontradas pelas equações 3.72, 3.73 e 3.74, o referencial é transladado para a posição da articulação metacarpofalangeal e são efetuadas mais 2 rotações e 2 translações, conforme:

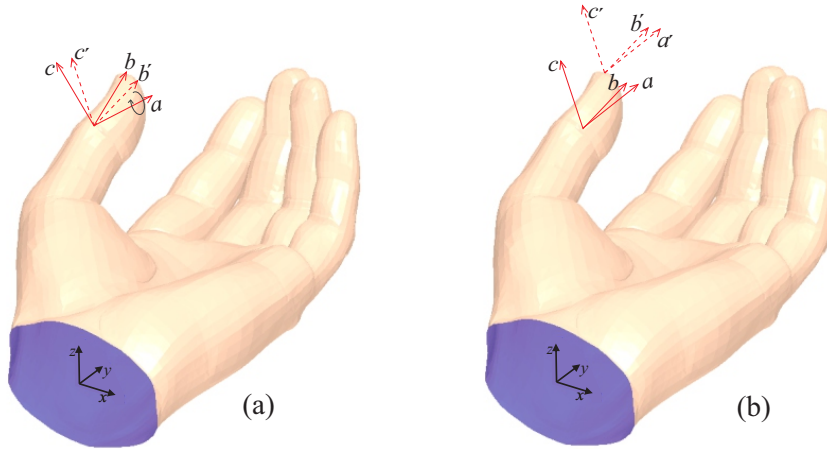
- $T(P_a, P_b, P_c)$: translação para a posição (P_a, P_b, P_c) ;
- $Rot(\alpha_t, a)$: rotação sobre o eixo a , por um ângulo α_t ;
- $T(0, f_{t_p}, 0)$: translação na direção do eixo b , no comprimento da falange proximal f_{t_p} ;
- $Rot(\gamma_t, a)$: rotação sobre o eixo a , por um ângulo γ_t ;
- $T(0, f_{t_d}, 0)$: translação na direção do eixo b , no comprimento da falange distal f_{t_d} ;

Figura 3.24 – Diagrama de transformações para o polegar.

(a) $Rot(\alpha_t, a)$ (b) $T(0, f_{tp}, 0)$ 

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3.25 – Diagrama de transformações para o polegar.

(a) $Rot(\gamma_t, a)$ (b) $T(0, f_{td}, 0)$ 

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 3.24 e 3.27 exhibe os efeitos das transformações na sequência exposta anteriormente:

Desta forma, as coordenadas (P_{5x}, P_{5y}, P_{5z}) da ponta do polegar, são encontradas por:

$$\begin{bmatrix} P_{5x} \\ P_{5y} \\ P_{5z} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & f_{td} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma_t & -\sin \gamma_t & 0 \\ 0 & \sin \gamma_t & \cos \gamma_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$$\begin{aligned}
& \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & f_{tp} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_t & -\sin \alpha_t & 0 \\ 0 & \sin \alpha_t & \cos \alpha_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_a \\ 0 & 1 & 0 & P_b \\ 0 & 0 & 1 & P_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} = \\
& = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma_t & -\sin \gamma_t & f_{td} \\ 0 & \sin \gamma_t & \cos \gamma_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_t & -\sin \alpha_t & f_{tp} \\ 0 & \sin \alpha_t & \cos \alpha_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_a \\ 0 & 1 & 0 & P_b \\ 0 & 0 & 1 & P_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} = \\
& = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_a \\ 0 & \cos(\alpha_t + \gamma_t) & -\sin(\alpha_t + \gamma_t) & P_b \cos(\alpha_t + \gamma_t) - P_c \sin(\alpha_t + \gamma_t) + f_{tp} \cos \gamma_t + f_{td} \\ 0 & \sin(\alpha_t + \gamma_t) & \cos(\alpha_t + \gamma_t) & P_b \sin(\alpha_t + \gamma_t) + P_c \cos(\alpha_t + \gamma_t) + f_{tp} \sin \gamma_t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.75)
\end{aligned}$$

Como o ângulo γ_t é função de $\alpha - t$, dado pela equação 3.30, as coordenadas da ponta do dedo polegar em função do ângulo α_t é dado por:

$$P_{5x} = P_x + P_a \quad (3.76)$$

$$P_{5y} = P_y \cos(\alpha_t + \gamma_t) - P_z \sin(\alpha_t + \gamma_t) + P_b \sin(\alpha_t + \gamma_t) - P_c \sin(\alpha_t + \gamma_t) + f_{tp} \cos \gamma_t + f_{td} \quad (3.77)$$

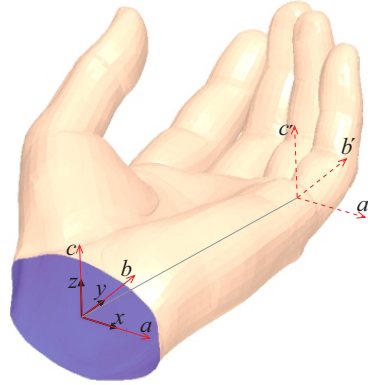
$$P_{5z} = P_y \sin(\alpha_t + \gamma_t) + P_z \cos(\alpha_t + \gamma_t) + P_b \sin(\alpha_t + \gamma_t) + P_c \cos(\alpha_t + \gamma_t) + f_{tp} \sin \gamma_t \quad (3.78)$$

3.4.2 Coordenadas para Indicador, Médio, Anular e Mínimo

De modo análogo ao que foi efetuado para o polegar, a partir das coordenadas globais, no centro do punho (P_x, P_y, P_z) é preciso efetuar apenas uma translação simples, reposicionando o sistema de coordenadas sobre as respectivas articulações metacarpofalangeanas (P_{na}, P_{nb}, P_{nc}). Considerando a translação $T(n_a, n_b, n_c)$ pelo vetor $N = (n_a, n_b, n_c)$ (figura 3.26, têm-se:

$$\begin{bmatrix} P_{na} \\ P_{nb} \\ P_{nc} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & n_a \\ 0 & 1 & 0 & n_b \\ 0 & 0 & 1 & n_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x + n_a \\ P_y + n_b \\ P_z + n_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.79)$$

Figura 3.26 – Translação do sistema de referencia para o indicador.



Fonte: Elaborada pelo autor.

de onde obtém-se:

$$P_a = P_x + n_a \quad (3.80)$$

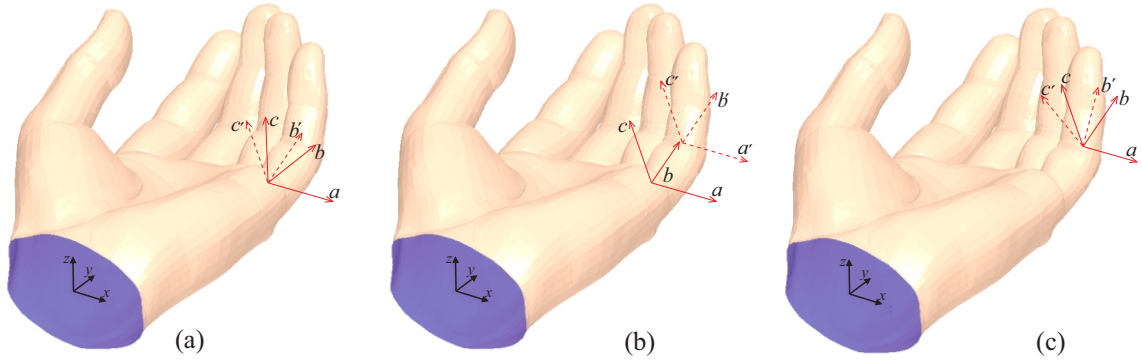
$$P_b = P_y + n_b \quad (3.81)$$

$$P_c = P_z + n_c \quad (3.82)$$

Agora, é preciso encontrar as coordenadas das pontas dos dedos, a partir deste re-posicionamento, por meio da rotação dos ângulos α_n , β_n e γ_n , considerando também as translações pelos tamanhos das falanges, como segue:

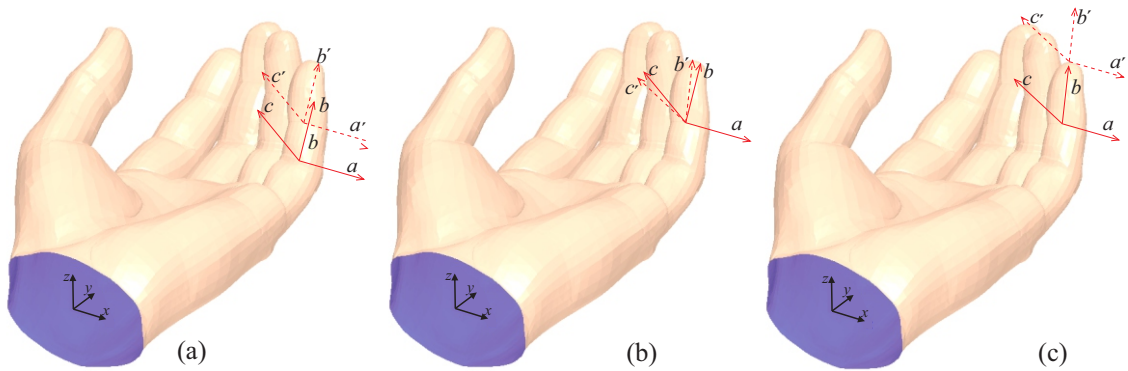
- $Rot(\alpha_n, a)$: rotação sobre o eixo a, por um ângulo α_n ;
- $T(0, f_{n_p}, 0)$: translação na direção do eixo b, no comprimento da falange proximal f_{n_p} ;
- $Rot(\beta_n, a)$: rotação sobre o eixo a, por um ângulo β_n ;
- $T(0, f_{n_m}, 0)$: translação na direção do eixo b, no comprimento da falange medial f_{n_m} ;
- $Rot(\gamma_n, a)$: rotação sobre o eixo a, por um ângulo γ_n ;
- $T(0, f_{n_d}, 0)$: translação na direção do eixo b, no comprimento da falange distal f_{n_d} ;

Figura 3.27 – Diagrama de transformações para os outros dedos.

(a) $Rot(\alpha_n, a)$ (b) $T(0, f_{n_p}, 0)$ (c) $Rot(\beta_n, a)$ 

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3.28 – Diagrama de transformações para os outros dedos.

(a) $T(0, f_{n_m}, 0)$ (b) $Rot(\gamma_n, a)$ (c) $T(0, f_{n_d}, 0)$ 

Fonte: Elaborada pelo autor.

Desta forma, as coordenadas $(P_{n_x}, P_{n_y}, P_{n_z})$ das pontas dos dedos, com $n=1,2,3,4$, são encontradas por:

$$\begin{bmatrix} P_{n_x} \\ P_{n_y} \\ P_{n_z} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & f_{n_d} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma_n & -\sin \gamma_n & 0 \\ 0 & \sin \gamma_n & \cos \gamma_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & f_{n_m} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta_n & -\sin \beta_n & 0 \\ 0 & \sin \beta_n & \cos \beta_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & f_{n_p} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_n & -\sin \alpha_n & 0 \\ 0 & \sin \alpha_n & \cos \alpha_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{n_a} \\ P_{n_b} \\ P_{n_c} \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{aligned}
&= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma_n & -\sin\gamma_n & f_{n_d} \\ 0 & \sin\gamma_n & \cos\gamma_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta_n & -\sin\beta_n & f_{n_m} \\ 0 & \sin\beta_n & \cos\beta_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \\
&\quad \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_n & -\sin\alpha_n & f_{n_p} \\ 0 & \sin\alpha_n & \cos\alpha_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{n_a} \\ P_{n_b} \\ P_{n_c} \\ 1 \end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_n + \beta_n + \gamma_n) & -\sin(\alpha_n + \beta_n + \gamma_n) & f_{n_p}\cos(\beta_n + \gamma_n) + f_{n_m}\cos\gamma_n + f_{n_d} \\ 0 & \sin(\alpha_n + \beta_n + \gamma_n) & \cos(\alpha_n + \beta_n + \gamma_n) & f_{n_p}\sin(\beta_n + \gamma_n) + f_{n_m}\sin\gamma_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{n_a} \\ P_{n_b} \\ P_{n_c} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.83)
\end{aligned}$$

Então, através das equações abaixo as coordenadas das pontas dos dedos são determinadas em função de α_t pois, os ângulo β_n e γ_n são dados respectivamente, pelas equações 3.61 e 3.70.

$$P_{n_x} = P_{n_a} \quad (3.84)$$

$$P_{n_y} = \cos(\alpha_n + \beta_n + \gamma_n)P_{n_b} - \sin(\alpha_n + \beta_n + \gamma_n)P_{n_c} + f_{p_n}\cos(\beta_n + \gamma_n) + f_{m_n}\cos\gamma_n + f_{d_n} \quad (3.85)$$

$$P_{n_z} = \sin(\alpha_n + \beta_n + \gamma_n)P_{n_b} + \cos(\alpha_n + \beta_n + \gamma_n)P_{n_c} + f_{p_n}\sin(\beta_n + \gamma_n) + f_{m_n}\sin\gamma_n \quad (3.86)$$

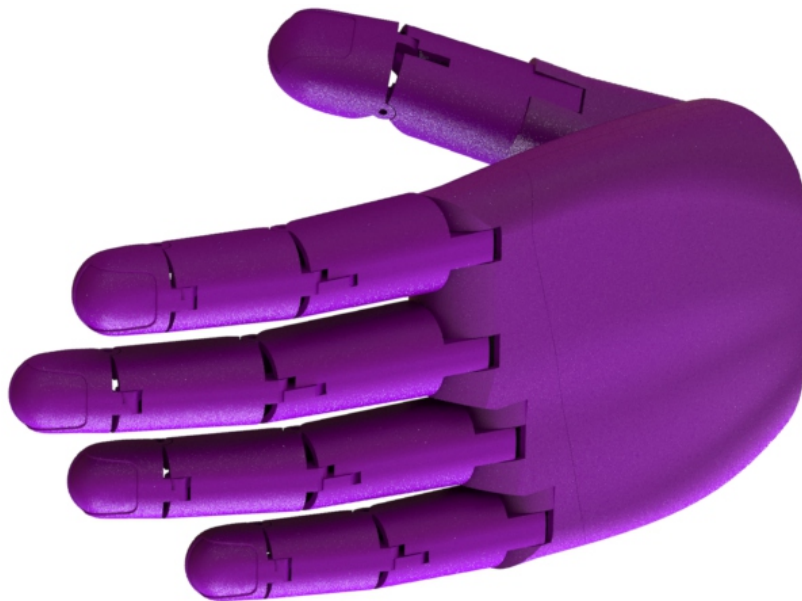
Capítulo 4

PROTÓTIPO

Para checar a viabilidade de execução da mecânica proposta para a prótese, foi construído um protótipo virtual parametrizado de acordo com o modelo matemático desenvolvido. Para a construção deste foi utilizado o software de elaboração de desenho 3D Solidworks© e a infraestrutura do laboratório de pesquisa do Núcleo de Tecnologia Assistiva (NENA) da UFG/GO

A figura 4.1 ilustra a prótese completa, a qual é dividida em três partes: palma, dedos e sistema de acionamento. Cada parte é dividida em peças conforme detalhado nas seções seguintes.

Figura 4.1 – Protótipo virtual da prótese



Fonte: Elaborado pelo autor

4.1 Palma e Dorso

A palma da prótese é dividida em duas peças, a parte palmar que é uma parte estrutural principal e o dorso que é uma tampa (figura 4.2).

Figura 4.2 – Corpo da palma da prótese

(a)Tampa (b)Palma



Fonte: Elaborado pelo autor

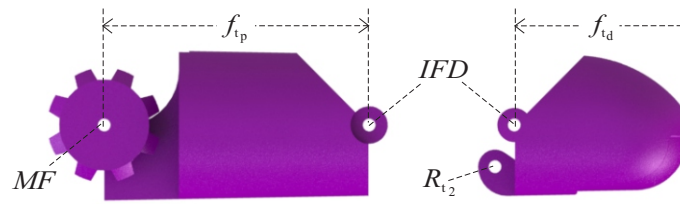
Os pontos de rotação R_{t_1} , R_{n_1} e R_{n_2} estão posicionados na região palmar, o que significa que além posicionar os dedos, esta peça tem a função de fixar as barras b_t , b_{n_1} e b_{n_2} de forma que o movimento induzido nas falanges mediais e distais ocorram conforme planejado.

4.2 Dedos

Os dedos indicador, médio, anelar e o mínimo são compostos por 3 falanges: proximal, medial e distal. O dedo polegar é composto por apenas 2 falanges: proximal e distal. Assim como nas seções anteriores, serão detalhados aqui dois protótipos de dedos, um para o polegar e outro para o indicador, que é análogo aos demais dedos da prótese.

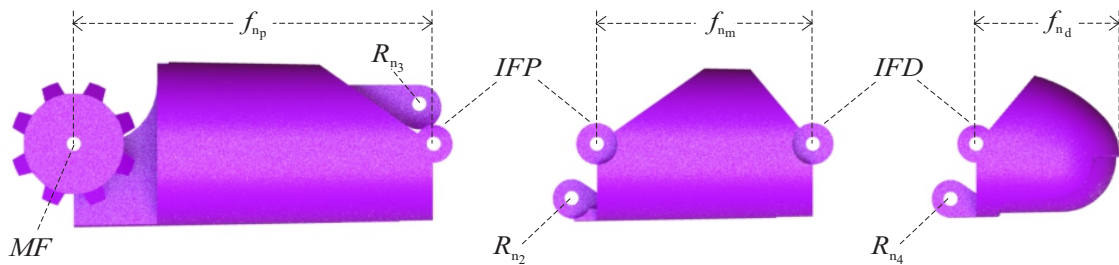
A figura 4.3 apresenta detalhes das falanges do dedo polegar, enquanto a figura 4.4 apresenta detalhes das falanges do dedo polegar indicador.

Figura 4.3 – Detalhamento das falanges do polegar da prótese



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 4.4 – Detalhamento das falanges do indicador da prótese



Fonte: Elaborado pelo autor

Na mão humana, as dimensões das falanges são diferentes em cada dedo e não há relação direta entre as medidas de quaisquer dois dedos. A tabela 4.1 apresenta a relação dimensional entre as falanges de acordo com o dedo, ou seja, as razões entre os comprimentos das falanges mediais e proximais considerando o comprimento da falange distal (ALEXANDER; VIKTOR, 2010).

Tabela 4.1 – Proporções entre as falanges mostradas como razões

Dedo	f_d	f_m	f_p
Polegar	1	-	1,5
Indicador	1	1,4	2,5
Médio	1	1,5	2,6
Anelar	1	1,5	2,4
Mínimo	1	1,1	2,1

Fonte: Adaptado de (ALEXANDER; VIKTOR, 2010)

Desta forma, observa-se que, no polegar por exemplo, a falange proximal é 50% maior que a falange distal. Apesar de não existir relação direta entre os comprimentos dos segmentos dos dedos, percebe-se que a relação dimensional entre as falanges, é muito próxima a sequencia de Fibonacci (ALEXANDER; VIKTOR, 2010). Sendo assim, para efeito de padroni-

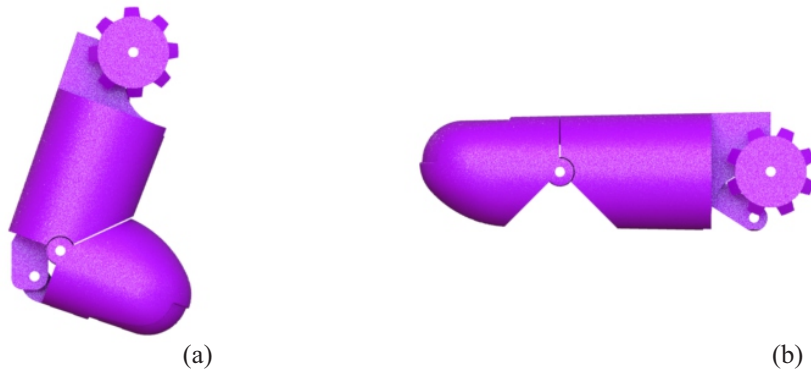
zação dimensional, para a construção do protótipo foi considerada a seguinte relação:

$$\begin{aligned} f_{t_p} &= 1,5 f_{t_d} \\ f_{n_m} &= 1,5 f_{n_d} \\ f_{n_p} &= 2,5 f_{n_d} \end{aligned} \quad (4.1)$$

A figura 4.5 apresenta o dedo polegar nos limites de flexão e de extensão, enquanto a figura 4.6 apresenta os limites de flexão e extensão para o indicador que é análogo aos demais dedos.

Figura 4.5 – Dedo polegar da prótese - Flexão e extensão totais

(a) $\alpha_t = 70^\circ$ e $\gamma_t = 90^\circ$ (b) $\alpha_t = \gamma_t = 0^\circ$



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 4.6 – Dedos indicador da prótese - Flexão e extensão totais

(a) $\alpha_n = 90^\circ$, $\beta_n = 110^\circ$ e $\gamma_n = 80^\circ$ (b) $\alpha_t = \beta_t = \gamma_n = 0^\circ$

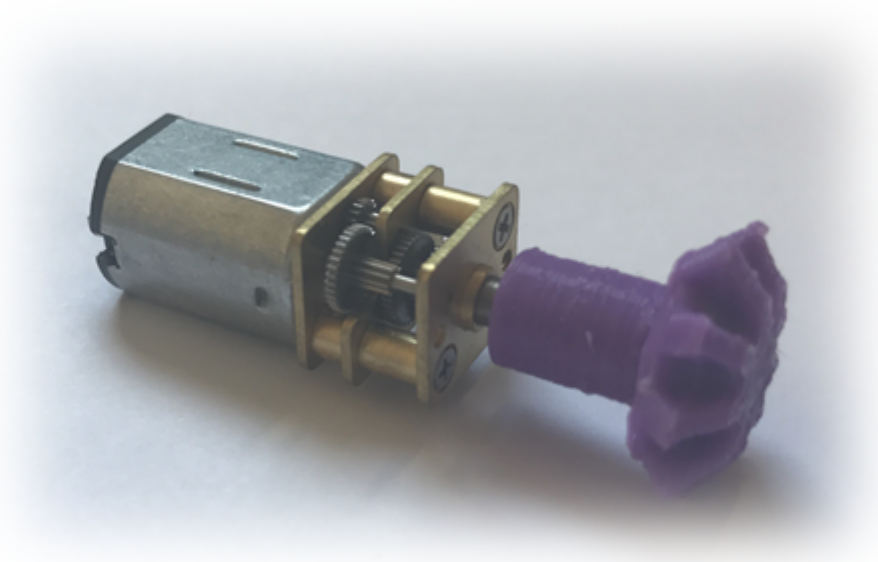


Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 Sistema de Acionamento

Conforme detalhado nas seções anteriores, o movimento das falanges mediais e distais são provocados pela transmissão do movimento da falange proximal. Para gerar o movimento nesta falange, foi adotado um motor de corrente contínua com caixa de redução integrada. Acoplado ao eixo deste motor, foi utilizada uma engrenagem cônica que será o dispositivo de conexão entre o motor e falange proximal. A figura 4.7 apresenta o motor utilizado na prótese com a engrenagem acoplada ao seu eixo.

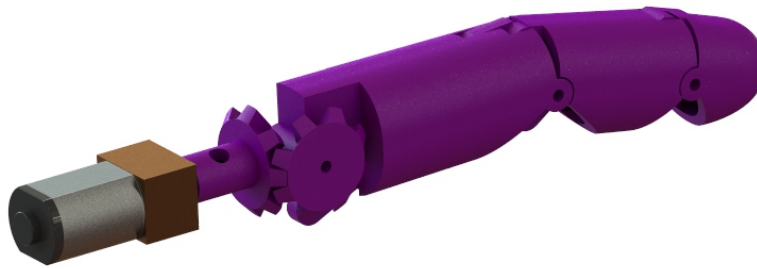
Figura 4.7 – Motor elétrico com caixa de redução.



Fonte: Elaborado pelo autor

A engrenagem adjunta da falange proximal, também é cônica e têm o mesmo diâmetro primitivo que a engrenagem do motor, o que permite o acoplamento do eixo de rotação do motor com o eixo da falange proximal, eixos que são ortogonais entre si. A figura ilustra o acoplamento entre o dedo, motor e engrenagem.

Figura 4.8 – Acoplamento do motor com o dedo.

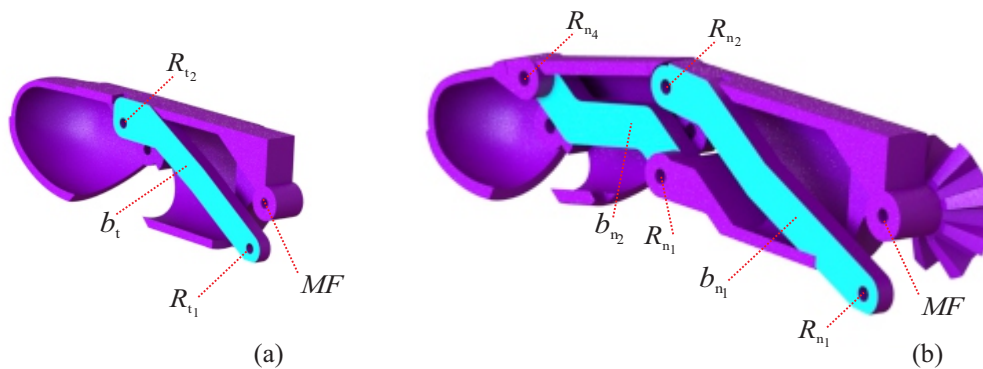


Fonte: Elaborado pelo autor

As barras b_t , b_{n_1} e b_{n_2} transmitem o movimento entre as falanges, sendo assim, a dimensão entre furos é a principal cota dimensional deste componente. Para o protótipo, estas barras foram inseridas no interior das falanges, conforme figura 4.9 que apresenta o dedo polegar e indicador em corte longitudinal.

Figura 4.9 – Dedos da Prótese - Vista em corte

(a)Dedo polegar (b)Indicador

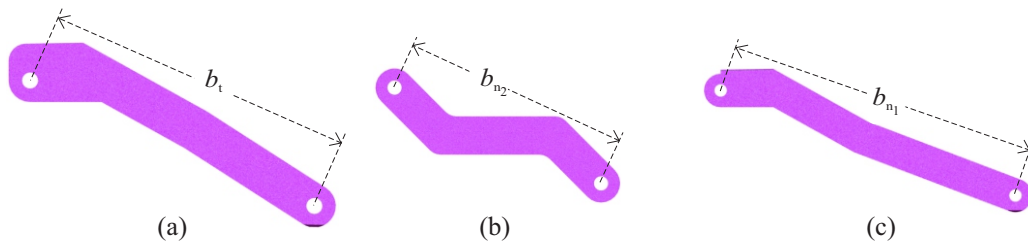


Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 4.10 apresenta detalhes das barras de transmissão de movimento. A forma geométrica destas barras formam tomadas de forma a garantir que não exista interferência entre as barras, paredes internas das falanges ou demais componentes estruturais.

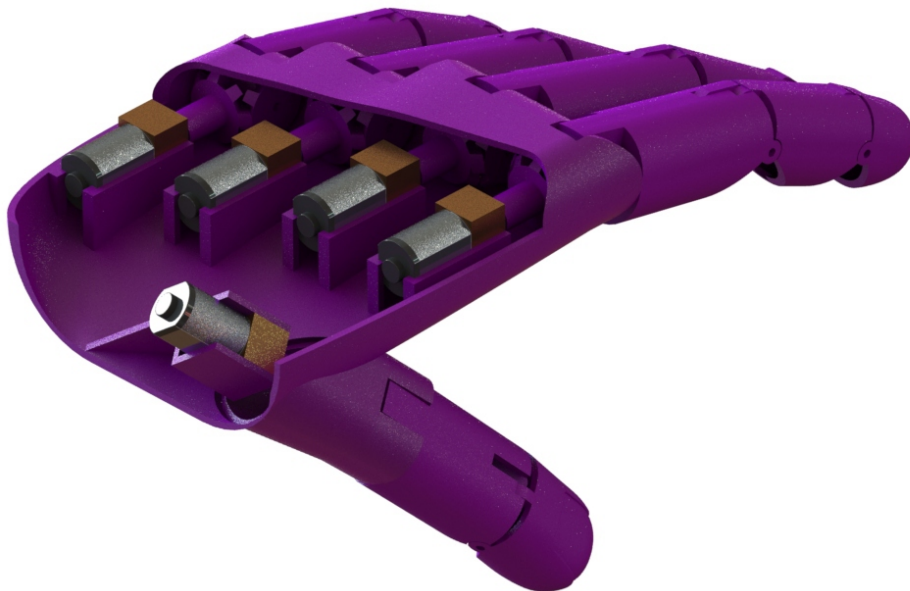
E por fim, na figura 4.11 é exibida a prótese proposta completa ilustrando a forma de conexão entre os motores, e a palma da mão.

Figura 4.10 – Detalhe das barras de transmissão de movimento.

(a) Barra b_t (b) Barra b_{n_2} (c) Barra b_{n_1} 

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 4.11 – Posicionamento dos motores na palma da prótese.



Fonte: Elaborado pelo autor

Capítulo 5

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

É inegável que o avanço da tecnologia trouxe relevante conforto e melhor bem estar ao ser humano, facilitando tarefas que antes eram muito penosas ou demandavam muito tempo. Em paralelo aos frutos tecnológicos, o homem sempre padeceu de males que lhe impediam de realizar tarefas simples de sua rotina diária, como por exemplo, andar, comer, se higienizar, dentre outras.

As guerras trouxeram mazelas que atormentaram a humanidade e desde as épocas mais antigas, se procurava repor partes do corpo, mutilados em batalha de modo que as atividades pudessem continuar sendo realizadas. Na busca por soluções que permitissem substituir partes do corpo, como mãos, braços, pés e pernas, a história registrou inúmeros artefatos construídos que imitassem minimamente os membros perdidos. Estes dispositivos que substituem determinadas partes do corpo são denominadas próteses. Em contrapartida, sabe-se que a mão é o órgão do corpo de colocou o ser humano num outro nível na escala evolutiva, principalmente pela quantidade de tarefas especializadas que sua complexidade anatômica permite executar. Contudo, esta mesma engenhosidade constitutiva, a coloca num patamar de difícil reprodução artificial.

Atualmente existem próteses de mão muito sofisticadas, mas de alto custo que as tornam inacessíveis para quase a totalidade das pessoas. Esforços tem sido envidados no desenvolvimento de próteses de mão que possam ser mais baratas, de fácil manufatura e de sensível aplicabilidade. Neste contexto a manufatura por extrusão de material, mais comumente conhecida como impressão 3D, tem sido uma forte e eficaz aliada na obtenção desta meta.

Este estudo apresentou o desenvolvimento de uma prótese biônica de mão, de baixo custo, confeccionada por impressora 3D, com acionamento individual dos dedos.

Primeiramente, de modo a nortear o desenvolvimento do protótipo, foi realizado um

estudo sobre a anatomia da mão, avaliando os principais tipos de movimento e preensões. Na sequência, foi apresentada uma classificação sobre as próteses de mão, juntamente com recentes pesquisas e projetos sobre próteses de mão.

No tangente ao mundo da impressão 3D, foram apresentadas as principais tecnologias de impressão 3D, ressaltando o projeto RepRap que ganhou apelo popular devido ao barateamento das peças utilizadas na confecção das impressoras, e principalmente dos insumos utilizados. A matéria prima utilizada na impressão por extrusão de material são polímeros termoplásticos, mais comumente usados o PLA (ácido polilático) e o ABS (acronitrila butadieno estireno), sendo que o PLA tem a vantagem de ser biodegradável.

Foram apresentados os principais parâmetros para os arquivos de impressão 3D, detalhando o processo de produção do arquivo virtual e seu posterior fatiamento para impressão camada a camada. É importante ressaltar a influência de fatores tais como, temperatura de extrusão, preenchimento da peça, inclinação de extrusão, diâmetro do bico extrusor, dentre outros na qualidade do objeto impresso.

O modelo matemático proposto neste é para a estrutura mecânica de uma prótese de mão com cinco dedos, utilizou-se os conceitos de posicionamento robótico e geometria para determinação dos referenciais e coordenadas das articulações da mão. Por se tratar de geometria no espaço em três dimensões, foram necessárias matrizes homogêneas de rotação e translação para o correto posicionamento dos referenciais que foram alocados convenientemente sobre as articulações metacarpofalangeanas e interfalangeanas da mão, considerado como ponto de referência global, o centro do punho.

A movimentação da falange proximal de cada dedo é efetuada pela rotação de uma engrenagem cônica acoplada a um motor de corrente contínua dotado de caixa de redução, que gira uma outra engrenagem cônica integrada à falange. As falanges medial e distal são movimentadas por duas barras de acionamento. Desta forma todo o movimento é efetuado considerando apenas a variação do ângulo da articulação metacarpofalangeal. Os demais ângulos são determinados como função deste primeiro.

Foram desenvolvidos dois modelos, um especificamente para o polegar que possui apenas as falanges proximal e distal, o que consequentemente fez com que o movimento pudesse ser executado por apenas uma barra de interligação entre falanges. Os outros quatro dedos (indicador, médio, anelar e mínimo), possuem três falanges e portanto carecem de duas barras de ligação.

Todas partes componentes da prótese foram desenhadas em software CAD, respeitadas as considerações do modelo matemático. Simulações de movimento foram executadas em software CAM, de modo a apontar ajustes construtivos ao modelo. Como exemplo, para que fossem evitados choques internos entre os componentes dos dedos, as barras de conexão precisaram de alteração na sua geometria conforme exibido no capítulo de apresentação

do protótipo.

É importante ressaltar que todo o projeto CAD foi desenvolvido parametrizado, de modo que projetos e posterior impressões de próteses personalizadas com ajustes das medidas de tamanho das falanges, tamanho da palma da mão, dentre outros aspectos físicos, podem diretamente ser implementados.

Com relação à continuidade da pesquisa, é possível apontar aspectos a serem avaliados, tais como:

- avaliação da resistência mecânica das partes da prótese
- desenvolvimento dos sistema de controle dos motores
- inserção de sensores de força/pressão nas pontas dos dedos
- inclusão de comando de voz
- inclusão de comando miolétrico

REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, B.; VIKTOR, K. Proportions of hand segments. *Int. J. Morphol*, v. 28, n. 3, p. 755–758, 2010. Citado na página 73.
- BERSCH, R. Introdução à tecnologia assistiva. *Porto Alegre: CEDI*, 2008. Citado na página 21.
- BLOHMKE, F. Compêndio otto bock: Próteses para o membro superior. *Berlin: Schiele & Schön*, 1994. Citado 3 vezes nas páginas 25, 26 e 27.
- CARVALHO, G. L. d. *Proposta de um método de projeto de próteses de membros superiores com a utilização da engenharia e análise do valor*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- CHILDRESS, D. S. Historical aspects of powered limb prostheses. *Clin Prosthet Orthot*, v. 9, n. 1, p. 2–13, 1985. Citado na página 27.
- CUNHA, F. L. da. *Obtenção e uso dos acoplamentos cinemáticos interfalangeanos e interdigitais no projeto de próteses antropomórficas para membros superiores*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo., 1999. Citado 4 vezes nas páginas 25, 26, 27 e 28.
- CUNICO, M. *Impressoras 3D: O novo Meio Produtivo*. [S.l.]: Concep3d Pesquisas Científicas, 2015. ISBN 9788567043104. Citado 9 vezes nas páginas 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 36 e 37.
- ENABLE. 2016. Disponível em: <<http://enablingthefuture.org/>>. Citado na página 27.
- EXIII. 2016. Disponível em: <<http://www.exiii.jp/>>. Citado na página 28.
- FENEIS, H.; DAUBER, W.; SPITZER, G. I. *Pocket atlas of human anatomy*. [S.l.]: Thieme, 2000. Citado na página 24.
- FOGGIATTO, J. A. *et al.* Utilização do processo de modelagem por fusão e deposição (fdm) na fabricação rápida de insertos para injeção de termoplásticos. Florianópolis, SC, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- HALL, S. *Biomechanica basica*. [S.l.]: Guanabra-Koogan, 2000. ISBN 9788527705752. Citado na página 23.
- KAPANDJI, I. A. *The physiology of the joints*. [S.l.]: Elsevier Science, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25 e 46.

MAGALHÃES, L. C.; VOLPATO, N.; LUERSEN, M. A. A influência dos parâmetros construtivos no comportamento mecânico de peças fabricadas pela técnica de modelagem por fusão e deposição (fdm). In: *Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande, Paraíba*. [S.l.: s.n.], 2010. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.

NAPIER, J. R. The prehensile movements of the human hand. *Bone & Joint Journal*, Bone and Joint Journal, v. 38, n. 4, p. 902–913, 1956. Citado na página 25.

NIKU, S. *Introduction to Robotics*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010. ISBN 9780470604465. Citado 6 vezes nas páginas 23, 40, 41, 42, 43 e 44.

OLIVEIRA, M. F. *et al.* Explorando os recursos das tecnologias de prototipagem rápida-sls e fdm-em aplicações especiais. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS (CBPol)*. [S.l.: s.n.], 2009. v. 10. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

PALLAROLAS, E. A. F. F. Revisão técnica de processos de manufatura aditiva e estudo de configurações geométricas, para estruturas de impressoras tridimensionais. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 29, 30 e 31.

PANCHAL-KILDARE, S.; MALONE, K. Skeletal anatomy of the hand. *Hand clinics*, Elsevier, v. 29, n. 4, p. 459–471, 2013. Citado na página 24.

POLIS, J. E. *et al.* Projeto e construção de parte estrutural de prótese de mão humana com movimentos. Campinas, SP, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 24.

POWERS, M. T. *et al.* *Materials Processing Handbook*. [S.l.]: CRC Press, 2007. Citado na página 30.

RANELLUCCI, A. Reprap, slic3r and the future of 3d printing. *Canessa, E., Fonda, C., and Zennaro, ed., “Low-cost 3D Printing for Science, Education, and Sustainable Development*, CiteSeer, p. 75–82, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 33, 34, 35 e 36.

REPRAP. 2017. Disponível em: <http://reprap.org/>. Citado na página 33.

SOBOTTA, J. *Atlas de anatomia humana*. [S.l.]: Guanabara-Koogan, 2006. ISBN 9788527711944. Citado na página 23.

TUBIANA, R. *The hand*. [S.l.]: WB Saunders Philadelphia, 1981. Citado na página 23.

VOLPATO, N. *Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações*. [S.l.]: Edgard Clucher, 2007. Citado na página 32.

VOLPATO, N. *et al.* Uma otimização da estratégia de preenchimento do processo fdm. Citado na página 36.