



**Universidade Federal de Pernambuco  
Centro de Tecnologia e Geociências  
Departamento de Engenharia Mecânica**

Desenvolvimento e Fabricação de Órteses para animais com deficiência motora através de técnicas de prototipagem mecânica.

**ALUNO:**

Israel Bezerra Cavalcanti

**PROFESSOR ORIENTADOR:**

Justo Emilio Alvarez Jacobo

**Recife - PE  
2024**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Cavalcanti, Israel Bezerra.

Desenvolvimento e fabricação de órteses para animais com deficiência motora através de técnicas de prototipagem mecânica / Israel Bezerra Cavalcanti. - Recife, 2024.

41 p. : il., tab.

Orientador(a): Justo Emilio Alvarez Jacobo

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2024.

Inclui referências.

1. Escaneamento 3D. 2. Fabricação de órteses. 3. Prototipagem mecânica. I. Jacobo, Justo Emilio Alvarez. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)



Universidade Federal de Pernambuco  
Departamento de Engenharia Mecânica Centro de  
Tecnologia e Geociências- CTG/EEP



ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC2

Ao 17º dia do mês de outubro do ano de dois mil e vinte e quatro, às 10:00 horas, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado **Desenvolvimento e fabricação de órteses para animais com deficiência motora através de técnicas de prototipagem mecânica**, elaborado pelo aluno **Israel Bezerra Cavalcanti**, matrícula 20150002492, sob a orientação do Prof. **Justo Emilio Alvarez Jacobo**. A banca foi composta pelos avaliadores: Prof. **Justo Emilio Alvarez Jacobo** (orientador), Prof. **Tiago Lima de Sousa** (avaliador), e Prof. **Francisco Espedito de Lima** (avaliador). Após a exposição oral do trabalho, o candidato foi arguido pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se e deliberaram pela sua \_\_\_\_\_ aprovação \_\_\_\_\_, atribuindo-lhe a média \_\_\_\_\_ 10 (dez) \_\_\_\_\_, julgando-o apto(x) / inapto( ) à conclusão do curso de Engenharia Mecânica. Para constar, redigi a presente ata aprovada por todos os presentes, que vai assinada pelos membros da banca.

Orientador: Prof. Justo Emilio Alvarez Jacobo Nota: 10 (dez)

Assinatura  Documento assinado digitalmente  
JUSTO EMILIO ALVAREZ JACOBO  
Data: 17/10/2024 13:58:47-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Avaliador Interno: Prof. Tiago Lima de Sousa Nota: 10 (dez)

Assinatura  Documento assinado digitalmente  
TIAGO LIMA DE SOUSA  
Data: 17/10/2024 14:30:55-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Avaliador Interno: Prof. Francisco Espedito de Lima Nota: 10 (dez)

Assinatura  Documento assinado digitalmente  
FRANCISCO ESPEDITO DE LIMA  
Data: 24/10/2024 00:23:43-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Recife, 17 de outubro de 2024.

Prof. Marcus Costa de Araújo  
Coordenador de Trabalho de Conclusão de curso - TCC  
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica – CTG/EEP-UFPE

## RESUMO

A utilização de próteses e órteses é fundamental para o bem-estar animal, proporcionando suporte e alívio para animais com deficiências motoras. Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver e fabricar uma órtese capaz de restabelecer parcial ou integralmente as funções motoras de cães com deficiência motora. Os objetivos específicos incluem estudar polímeros com propriedades mecânicas adequadas para a órtese, desenvolver métodos de fabricação com os materiais apropriados e projetar mecanismos que solucionem as dificuldades de locomoção. Para atingir esses objetivos, um molde do membro foi escaneado por meio da técnica de fotogrametria, e, em seguida, um projeto de órtese foi elaborado, utilizando TPU como material principal. Os resultados mostraram que a órtese apresentou integridade mecânica satisfatória através de simulações. Além disso, o método de fabricação utilizando alginato e gesso revelou-se eficiente e de baixo custo, o que pode beneficiar a acessibilidade dessas intervenções em comunidades menos favorecidas. Em suma, os resultados deste estudo confirmam a viabilidade das técnicas propostas, destacando a importância de inovações na fabricação de órteses.

**Palavras-chave:** Escaneamento 3D; Fabricação de órteses; Prototipagem Mecânica.

## **ABSTRACT**

The use of prostheses and orthoses is fundamental for animal well-being, providing support and relief for animals with motor deficiencies. This study aims to develop and manufacture an orthosis capable of partially or fully restoring motor functions in dogs with motor impairments. The specific objectives include researching polymers with suitable mechanical properties for the orthosis, developing manufacturing methods with appropriate materials, and designing mechanisms to address locomotion difficulties. To achieve these objectives, a mold of the limb was scanned using photogrammetry techniques, and subsequently, an orthosis design was created, utilizing TPU as the main material. The results demonstrated that the orthosis exhibited satisfactory mechanical integrity through simulations. Furthermore, the manufacturing method using alginate and plaster proved to be efficient and cost-effective, potentially enhancing the accessibility of these interventions in underprivileged communities. In summary, the findings of this study confirm the feasibility of the proposed techniques, highlighting the importance of innovations in orthosis manufacturing.

**Keywords:** 3D Scanning; Orthosis Manufacturing; Mechanical Prototyping.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	6
1.1	Objetivos	7
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	8
2.1	Biomecânica de animais quadrúpedes de pequeno porte	8
2.1.1	Anatomia dos membros de animais quadrúpedes de pequeno porte	8
2.1.2	Análise da marcha dos animais quadrúpedes de pequeno porte	9
2.1.3	Cinemática e cinética da locomoção dos animais quadrúpedes de pequeno porte	11
2.1.4	Forças e cargas nos membros dos cães	12
2.2	Próteses e órteses	13
2.2.1	Corpos rígidos e móveis	14
2.2.2	Graus de liberdade de um sistema mecânico	15
2.3	Prototipagem mecânica	17
2.3.1	Impressão 3D	18
2.3.2	Escaneamento 3D	19
2.3.3	Critérios de falha mecânica	20
2.3.4	Materiais de impressão 3D	21
2.3.5	Métodos de impressão 3D	22
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	24
3.1	Escopo do estudo	24
3.2	Isonção de aprovação do comitê de ética em pesquisa	25
3.3	Caso de estudo	26
3.4	Estrutura metodológica	27
3.4.1	Método de moldagem do membro anômalo	27
3.4.2	Escaneamento do molde	27
3.4.3	Projeto mecânico da órtese	28
3.4.4	Impressão e teste das órteses	28
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	29
4.1	Molde do membro torácico anômalo	29
4.2	Escaneamento	32
4.3	Projeto da órtese	33
4.3.1	Protótipo 1	35
4.3.2	Protótipo 2	35

4.4	Impressão e testes das órteses.....	36
4.4.1	Fabricação da órtese (protótipo 1).....	36
4.4.2	Fabricação da órtese (protótipo 2).....	37
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>37</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>39</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A compreensão da biomecânica animal abrange um campo multidisciplinar que se dedica ao estudo dos movimentos dos seres vivos e das forças envolvidas nesse processo, envolvendo áreas como engenharia, anatomia, física, matemática, computação e outras disciplinas (HALL, 2012). Os avanços tecnológicos na análise da biomecânica têm permitido o desenvolvimento de novas ferramentas que proporcionam uma compreensão mais aprofundada da biomecânica animal, como a captura de movimento e a modelagem computacional (SCHNECK E BROZINO, 2003). Essas técnicas têm sido essenciais para a investigação minuciosa dos movimentos dos animais em diferentes ambientes e atividades, levando a descobertas importantes sobre os mecanismos adaptativos que permitem aos animais otimizar a locomoção e minimizar o gasto energético durante a atividade física (HALL, 2012).

As aplicações práticas da biomecânica animal têm um impacto significativo na reabilitação de animais feridos ou na criação de próteses que permitem a reinserção de animais na fauna (GIOSO et al., 2008). O estudo da biomecânica animal pode contribuir para reestabelecer funções motoras de animais, dando-lhes mais autonomia para desenvolver suas funções ou possível reinserção na fauna. Por exemplo, a análise biomecânica do movimento dos animais foi essencial para a criação de próteses que reproduzissem o movimento das nadadeiras de uma tartaruga marinha, permitindo que a tartaruga Allison pudesse reestabelecer sua autonomia em relação ao nado (WONG; VARELA; LIANG, 2016). Outro exemplo é o uso da análise biomecânica para a reabilitação da capacidade de alimentação e defesa de aves com má formação de bico, há inúmeros casos de fabricação de próteses para tucanos, papagaios e araras (GIOSO et al., 2008).

No entanto, é importante destacar que essas aplicações práticas exigem uma abordagem personalizada e cuidadosa para garantir o sucesso da reabilitação e a segurança do animal (GIOSO et al., 2008). O desenvolvimento de órteses e próteses requer um conhecimento aprofundado da anatomia e biomecânica do animal em questão, bem como uma avaliação individualizada das suas necessidades e limitações (WONG; VARELA; LIANG, 2016). Nesse sentido, a biomecânica animal tem um papel fundamental na busca de soluções eficazes e seguras para a reabilitação e reintrodução de animais na natureza.

Neste cenário, o estudo e desenvolvimento de técnicas de prototipagem e

fabricação de peças poliméricas e metálicas é de extrema importância para a fabricação de próteses e órteses para animais. A prototipagem permite a criação de modelos tridimensionais que podem ser testados antes da fabricação da peça final, garantindo a precisão e adequação da prótese ou órtese ao animal (FIGUEIREDO; CESAR, 2022). Já a fabricação de peças poliméricas e metálicas permite a produção de dispositivos com alta resistência, durabilidade e precisão, fundamentais para o sucesso de uma prótese ou órtese (FIGUEIREDO; CESAR, 2022). O uso dessas técnicas possibilita a criação de dispositivos que se adequam às particularidades do animal, proporcionando maior conforto e qualidade de vida. (TEXEIRA, 2021).

No presente trabalho, foi realizado um estudo biomecânico em um cão, que apresenta má formação genética do membro torácico esquerdo. Tal deficiência impede que o cão caminhe normalmente, afetando significativamente sua qualidade de vida. Com base nesse estudo, é possível desenvolver uma órtese capaz de auxiliar na marcha do animal, proporcionando-lhe maior autonomia e bem-estar. O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados obtidos com a utilização da órtese, bem como sua relevância para a área de ortopedia veterinária.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho será desenvolver e fabricar uma órtese capaz de reestabelecer parcial ou integralmente as funções motoras de cães com deficiência motora. Como objetivos específicos podem-se citar:

- Estudar polímeros que tenham propriedades mecânicas adequadas de acordo com sua função na órtese;
- Desenvolver métodos de fabricação da órtese com os materiais adequados;
- Projetar mecanismos que solucionem a dificuldade de locomoção de animais com deficiência motora.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 BIOMECÂNICA DE ANIMAIS QUADRÚPEDES DE PEQUENO PORTE**

A biomecânica é uma ciência que estuda os aspectos mecânicos dos organismos vivos, utilizando ferramentas da mecânica para analisar os movimentos e as ações das forças em estruturas estáticas e dinâmicas. Os biomecânicos subdividem seu estudo em cinemática e cinética, sendo a primeira focada na descrição do movimento em si (posições, velocidades e acelerações) e a segunda nas forças associadas a esse movimento. Sendo as estruturas corporais de organismos vivos, incluindo animais quadrúpedes de pequeno porte – e, neste trabalho, o cão – uma composição de materiais sólidos, fluidos e viscoelásticos faz-se necessário compreender a resposta a aplicação de tensões, flexões, torções e diversos tipos de esforços em sólidos, fluidos e materiais viscoelásticos (SCHNECK E BROZINO, 2003). A aplicação desses conceitos na biomecânica do cão é fundamental para entender como o animal se movimenta e como suas estruturas corporais respondem a forças internas e externas.

#### **2.1.1 Anatomia dos membros de animais quadrúpedes de pequeno porte**

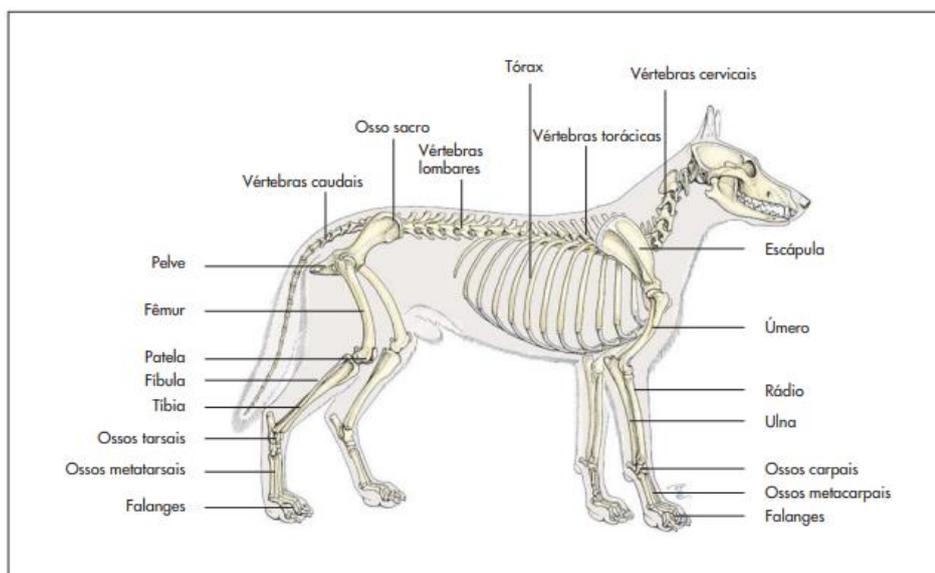
Segundo os autores König e Liebich (2016, p. 5): “Anatomia é o ramo da morfologia voltado para forma, estrutura, topografia e interação funcional dos tecidos e órgãos que compõem o corpo.”

O corpo animal é dividido em órgãos e sistemas orgânicos que atuam mutuamente para realizar determinadas funções que mantem a vida. O aparelho locomotor é um sistema orgânico complexo com função primordial de realizar trabalho de origem mecânica dando ao animal movimento em determinadas partes ou movimentando-o como um todo.

O aparelho locomotor é dividido em dois principais sistemas: O esquelético composto por ossos, cartilagens, ligamentos e as articulações e o muscular. Ao passo que o primeiro sistema age de maneira passiva dentro do aparelho locomotor o muscular age de maneira ativa sendo os músculos responsáveis pela realização de trabalho mecânico enquanto o esqueleto sustenta (com os ossos, cartilagens e ligamentos) e direciona os movimentos como também os restringe (com as

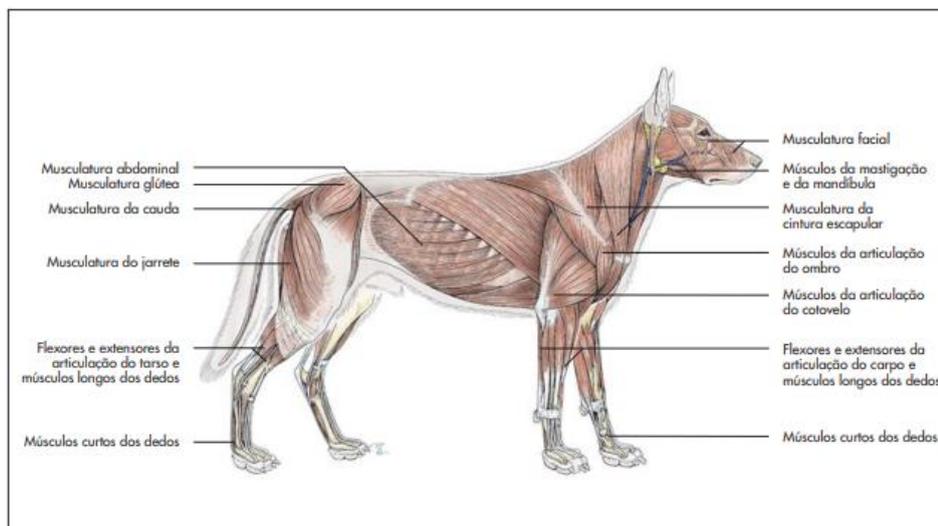
articulações). As Figuras 1 e 2 mostram os ossos e músculos de um cão.

Figura 1: Representação esquemática do esqueleto do cão



Fonte: Adaptado de König (2016)

Figura 2: Representação esquemática do musculatura do cão



Fonte: Adaptado de König (2016)

### 2.1.2 Análise da marcha dos animais quadrúpedes de pequeno porte

Marcha é o modo como um animal se movimenta quando anda, corre ou trotta. Existem diferentes tipos de marcha, com diferentes tipos de classificação que variam de acordo com cada autor. Cada uma delas apresenta características específicas de

movimento das patas e do equilíbrio do cão.

Na marcha diagonal, as patas dianteiras e traseiras opostas se movem juntas, ou seja, quando a pata dianteira esquerda é levantada, a traseira direita também é levantada e vice-versa. Esse tipo de marcha é mais comum em cães de corrida e é caracterizada por um equilíbrio vertical, ou seja, o balanço do cão ocorre principalmente na vertical. Na marcha lateral, as patas de um mesmo lado ficam apoiadas no chão enquanto as outras do lado oposto se deslocam gerando um balanço horizontal no cão.

Para a marcha ser classificada como normal ela deve transladar o cão com o mínimo gasto energético possível (GROSS, 2000). Isso significa que balanços verticais e horizontais devem ter uma tolerância máxima uma vez que ambos os balanços oscilam a energia potencial gravitacional do cão e, para uma mesma quantidade de energia cinética de translação, requerem um maior gasto energético dos músculos do cão significando uma menor eficiência na marcha visto que esta eficiência seria a razão entre a quantidade de energia cinética de translação e o gasto energético dos músculos do cão.

O passo de um cão é um evento cíclico e é medido como sendo a distância entre dois apoios consecutivos de uma mesma pata e o período necessário para a realização deste ciclo é denominado passada que pode ser dividida em fase de apoio (tempo em que a pata está em contato com o solo) e balanço (tempo em que a pata deixa o solo e atingi-o novamente, repetindo o ciclo). Essas divisões da passada em fase de apoio e balanço ainda podem ser subdivididas em mais etapas para uma análise mais completa da marcha do cão (ADAMS, 1998; VAUGHAN, 1992).

Outro modo de verificar a normalidade da marcha do cão é comparando o passo e a passada de cada membro. Em marchas normais há coordenação entre as patas de maneira que o passo e a passada de cada membro são semelhantes, quanto maior a discrepância mais próximo da anormalidade a marcha do animal estará.

Dor, erros posturais, deficiências motoras e até mesmo fraqueza muscular são fontes de anormalidades na marcha do cão (CORRIGAN, 2000), podendo gerar compensações em outras articulações culminando uma sobrecarga por fadiga na região em que há compensação, diminuindo assim a qualidade de vida do animal.

### **2.1.3 Cinemática e cinética da locomoção dos animais quadrúpedes de pequeno porte**

É certo que análises qualitativas do padrão de marcha de cães, se feitas por um profissional experiente, são bons exames e identificam uma série de problemas em relação a marcha e são ótimos métodos para uma avaliação inicial do animal. Porém – como a maioria dos exames qualitativos e visuais – esta inspeção visual da marcha do cão, mesma se feita por um profissional experiente, tem diversas limitações em relação a interpretação e precisão dos dados cinemáticos e dinâmicos da marcha do cão que são processados de maneira intuitiva pelo profissional que o examina.

Deste modo, a análise quantitativa da marcha dos cães tem dois principais métodos de abordagem: A análise cinemática e a cinética ou dinâmica.

Na análise cinemática, são medidos através de câmeras, marcações e outros aparatos, dados sobre a posição, velocidade, aceleração e deslocamento angular do cão. Um sistema de referência tridimensional ortogonal é fixado na origem do movimento, sendo o eixo do movimento o eixo X, o eixo transversal e paralelo a força peso o eixo Y e o eixo horizontal e transversal ao movimento o eixo Z.

Os planos XY, ZY e XZ são registrados por câmeras e marcações onde os dados cinemáticos serão processados por um software apropriado que retornarão outros dados que irão facilitar a identificação de anormalidades e assimetrias na marcha do cão (SILVA, 2006).

Na análise cinética ou dinâmica os dados a serem obtidos são em relação à causa do movimento, isto é, às forças e torques envolvidos na marcha. Ela é útil não só para o diagnóstico de anormalidades e assimetrias na marcha, mas também na avaliação da sustentação do peso do animal, o que é especialmente relevante para avaliar a sobrecarga por compensação em animais com amputações de um ou mais membros (DAL CORSO, 2019).

Neste método, sensores como placas medidoras de tensão são usadas durante a marcha do cão o que possibilita medir como se comporta as tensões aplicadas pelo animal em diversos estágios da fase do apoio.

A equação que correlaciona a cinética e dinâmica abordadas na marcha canina é a segunda lei de Newton (WEIGEL; MILLIS, 2014) uma vez que a aceleração é a primeira derivada temporal da velocidade e a segunda da posição e o mesmo pode ser aplicado para a segunda lei de Newton para rotação na análise de deslocamentos

angulares.

Tanto a análise cinemática, quanto dinâmica da marcha são importantes no projeto e fabricação de próteses e órteses caninas. Determinar os graus de liberdade da peça projetada para auxiliar na locomoção, bem como analisar se as tensões aos quais são submetidas as órteses e próteses são suficientemente menores do que as tensões limite de escoamento dos materiais escolhidos e suas respectivas zonas críticas de tensão são fundamentais para o projeto.

#### **2.1.4 Forças e cargas nos membros dos cães**

Compreender como funciona a distribuição de forças nas patas caninas é essencial para entendermos como os cães se movimentam e como a biomecânica do seu corpo funciona durante diferentes atividades físicas (HALL, 2012).

As patas caninas são projetadas para suportar o peso do animal e, ao mesmo tempo, proporcionar mobilidade e estabilidade. Cada pata é composta por várias estruturas, como ossos, músculos, tendões e ligamentos, que trabalham juntos para distribuir e amortecer as forças que agem sobre ela.

Durante a caminhada, a pata canina faz contato com o solo e recebe uma carga de peso. As forças são distribuídas principalmente entre os dedos e a almofada plantar, que é a área que fica em contato direto com o solo. As unhas também ajudam na distribuição da carga, mas em menor proporção.

Ao contrário do que muitas pessoas pensam, a força não é distribuída de forma uniforme entre as quatro patas do cão durante a caminhada. Normalmente, o peso é distribuído em torno de 60% na parte da frente do corpo e 40% na parte de trás, o que significa que as patas dianteiras suportam mais carga do que as patas traseiras (GILLETE; ANGLE, 2008). Quando os cães correm, a distribuição de forças nas patas muda significativamente. Durante a corrida, o cão utiliza as patas traseiras para gerar impulso, enquanto as patas dianteiras são usadas para absorver o impacto. Isso significa que as patas traseiras são responsáveis por mais força, enquanto as patas dianteiras são mais importantes para proporcionar estabilidade.

Outro conceito muito importante para compreensão da distribuição de forças nas patas de um cão é a abordagem do ponto de vista mais energética que trata dos conceitos de trabalho junto ao corpo e trabalho junto ao ambiente.

Quando um cão está em movimento, as forças que atuam em suas patas são

distribuídas de acordo com a interação entre seu corpo e o ambiente ao seu redor. O trabalho junto ao corpo se refere à força que o cão exerce internamente para movimentar suas patas, enquanto o trabalho junto ao ambiente se refere à força que o ambiente exerce sobre as patas do cão.

O trabalho junto ao corpo é influenciado pela massa corporal, comprimento e flexibilidade das patas, músculos, tendões e ligamentos. Já o trabalho junto ao ambiente é influenciado pela textura, aderência e inclinação da superfície em que o cão está caminhando, além de outros fatores externos, como a presença de obstáculos. Para cães, o trabalho junto ao ambiente representa uma parcela menor de gasto energético do que para animais que se deslocam em altas velocidades como cavalos e falcões por exemplo, onde o atrito dissipativo entre as patas do cavalo e a resistência do ar sobre o corpo do falcão são gastos energéticos relevantes.

Em resumo, a distribuição de forças nas patas caninas é complexa e depende do tipo de atividade que o cão está realizando. Compreender como essas forças são distribuídas é essencial para entendermos como o corpo do cão funciona e como podemos ajudá-lo a manter uma boa saúde e bem-estar, além de ser fundamental no projeto de órteses e próteses, tanto para membros deficientes, como para membros amputados.

## 2.2 PRÓTESES E ÓRTESES

Próteses e órteses são dispositivos amplamente utilizados na área de reabilitação, com o objetivo de auxiliar indivíduos que apresentam perda ou comprometimento de funções corporais. A prótese refere-se a um dispositivo artificial desenvolvido para substituir partes do corpo perdidas em decorrência de amputações, traumas ou condições patológicas. Esses dispositivos são projetados para reproduzir, tanto quanto possível, a forma e a função do membro ou órgão ausente, favorecendo maior independência e qualidade de vida ao paciente. Em contrapartida, a órtese é utilizada para oferecer suporte, estabilização ou correção funcional de partes do corpo que, apesar de presentes, apresentam comprometimentos funcionais causados por condições médicas, lesões ou deficiências.

### 2.2.1 Corpos rígidos e móveis

Em mecânica, um corpo rígido é um objeto que mantém a sua forma e tamanho mesmo quando submetido a forças externas (BEZERRA, 2010). Isso significa que a distância entre dois pontos quaisquer no corpo é descrita analiticamente por:

$$d = \sqrt{(\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)}$$

Onde  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  e  $\Delta z$  são as distâncias das abcissas, ordenadas e cotas num sistema de referência tridimensional ortogonal entre dois pontos quaisquer num corpo rígido. Isto significa que ele não sofre deformações, uma vez que  $d$  é invariável. Em corpos reais a distância  $d$  varia de acordo com uma infinidade de parâmetros, dentre eles: os módulos das tensões aplicadas ao corpo bem como a orientação delas, o tempo e a temperatura.

O concreto armado é um exemplo de material anisotrópico, isto é, que pode sofrer deformações diferentes de acordo com a orientação da tensão aplicada. Para o concreto, são usados usualmente dados como limite de escoamento para compressão e a direção da tensão aplicada é normal a seção transversal do corpo de prova, porém, para tensões de tração e orientações diversas, o limite de escoamento do concreto pode assumir valores substancialmente diferentes, sendo  $d$  uma função da inclinação das tensões aplicadas no concreto além de, evidentemente, sua magnitude.

Já um corpo móvel é aquele que pode se movimentar em relação a outros corpos ou em relação a um referencial. Esses corpos podem ter diferentes tipos de movimento, tanto de translação quanto de rotação.

A translação é um movimento linear em que um corpo se desloca em linha reta, enquanto a rotação é um movimento angular em que um corpo gira em torno de um eixo. Esses movimentos podem ocorrer em diferentes direções, dando origem a uma grande variedade de movimentos tridimensionais.

Um corpo pode ter movimento de translação em uma ou mais direções, sendo classificado como um corpo rígido com movimento retilíneo ou com movimento plano. Já o movimento de rotação pode ocorrer em torno de um ou mais eixos, dando origem a um corpo rígido com movimento plano ou espacial.

Quando se combina esses movimentos de translação e rotação, obtém-se movimentos tridimensionais mais complexos. Por exemplo, um corpo rígido pode ter movimento de translação em uma direção e movimento de rotação em torno de outro

eixo, gerando um movimento de helicóide.

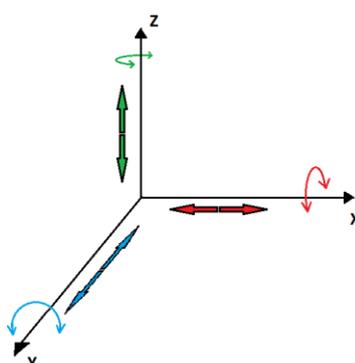
Os corpos rígidos e móveis são elementos fundamentais em diversos sistemas mecânicos, desde engrenagens até máquinas complexas. A análise desses corpos é essencial para entender como as forças agem sobre eles e como eles respondem a essas forças. Para analisar corpos rígidos e móveis, é importante entender os graus de liberdade de um sistema mecânico.

### 2.2.2 Graus de liberdade de um sistema mecânico

O grau de liberdade de um sistema mecânico qualquer é o número mínimo de coordenadas independentes para modelar o sistema matematicamente. Isto é, a quantidade de direções independentes em que um objeto pode se mover sem infringir nenhuma restrição (BEZERRA, 2010).

Por exemplo, um ponto material livre no espaço tem três graus de liberdade translacionais e três graus de liberdade rotacionais, totalizando seis graus de liberdade. Já em um sistema bidimensional, como um objeto em um plano, os graus de liberdade se reduzem para três, sendo dois graus de liberdade de translação e um de rotação.

Figura 3: Representação esquemática dos 6 graus de liberdade



Fonte: Autoria própria

No que se refere ao grau de liberdade de um sistema mecânico, é possível encontrar exemplos que ilustram sistemas com diferentes quantidades de graus de liberdade. Um exemplo de sistema com um grau de liberdade é o movimento de um trem em um trilho, que pode ser descrito por uma única coordenada, representando a posição do trem ao longo do trilho. Outro exemplo de sistema com um grau de liberdade é o movimento de um pêndulo simples, que pode ser descrito por uma única

coordenada, representando o ângulo de deslocamento do pêndulo em relação à vertical. Um outro exemplo é o pistão de um carro, que se move em linha reta dentro do cilindro, o que é suficiente para descrever o movimento do sistema. Já um sistema com dois graus de liberdade pode ser ilustrado pelo movimento de uma escavadeira, que possui um braço que se move para cima e para baixo, e uma caçamba que se estende para a frente e para trás.

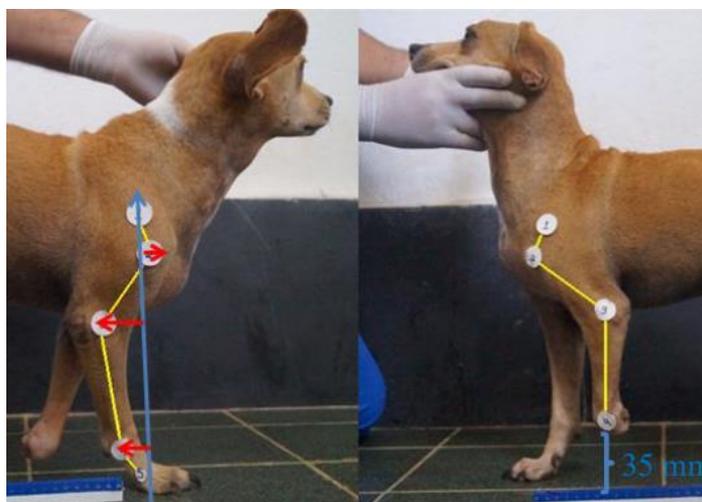
Figura 4: Deere & Company. Escavadeiras Hidráulicas 160G LC



Fonte: Adaptado de <https://www.deere.com.br/pt/escavadeiras-hidr%C3%A1ulicas/160g-lc/>. Acesso em: 27 mar. 2023.

Na biomecânica, também é possível observar os graus de liberdade, como nos mecanismos articulados do braço, antebraço e mão. Esses sistemas possuem vários graus de liberdade, que permitem movimentos complexos e precisos.

Figura 5: A diferença entre a pata normal e amputada é de 1 grau de liberdade que foi perdido pela amputação. No total, sem amputações, o cão tem 4 graus de liberdade mecânicas.



Fonte: Adaptado de Lage (2018)

Em resumo, entender os graus de liberdade de um sistema mecânico é essencial para modelá-lo e analisá-lo matematicamente. O conhecimento dos graus de liberdade é importante tanto em aplicações práticas, como na engenharia automotiva, quanto em áreas mais teóricas, como na biomecânica e na física mecânica em geral. No caso de sistemas biomecânicos, como os membros de um animal, as articulações desempenham um papel crucial, pois adicionam graus de liberdade, permitindo diferentes movimentos e aumentando a complexidade dos padrões de mobilidade.

### 2.3 PROTOTIPAGEM MECÂNICA

A prototipagem mecânica é um processo fundamental no desenvolvimento de projetos de engenharia, pois permite a criação de modelos físicos para testar e validar conceitos e soluções. Essa etapa ocorre após a fase de concepção, onde o projeto é desenhado e simulado virtualmente, e tem como objetivo verificar se o comportamento prático do sistema corresponde às expectativas teóricas. A fabricação de protótipos possibilita a avaliação de componentes, o ajuste de parâmetros de design e a detecção de falhas ou limitações que podem não ter sido previstas nas simulações digitais.

Esse processo é essencial para a otimização de produtos e sistemas mecânicos, uma vez que permite testar materiais, métodos de fabricação e a funcionalidade geral de um mecanismo. A prototipagem pode ser realizada de diversas maneiras, como a modelagem em escala reduzida, o uso de impressoras 3D ou a fabricação de componentes de forma artesanal. A escolha da metodologia depende do tipo de sistema a ser desenvolvido e dos recursos disponíveis, sendo uma fase crucial para identificar pontos de melhoria antes da produção em massa ou implementação definitiva.

A prototipagem mecânica possibilita ajustes rápidos e precisos, otimizando tanto o tempo de desenvolvimento quanto os recursos empregados no processo. Dessa forma, ela assume um papel estratégico no desenvolvimento de produtos, garantindo que a versão final seja mais eficiente, confiável e adequada às especificações desejadas.

### 2.3.1 Impressão 3D

A impressão 3D, também conhecida como fabricação aditiva, é uma tecnologia que permite a criação de objetos tridimensionais a partir de um modelo digital. Essa tecnologia tem ganhado muita popularidade nos últimos anos, devido à sua capacidade de produzir objetos personalizados de forma rápida e eficiente.

Existem vários métodos de impressão 3D disponíveis, incluindo a estereolitografia (SLA), a fusão seletiva a laser (SLS), a deposição de material fundido (FDM) e a sinterização direta de metal (DMLS), entre outros. Cada método tem suas próprias vantagens e desvantagens, dependendo do tipo de objeto que está sendo produzido e dos materiais utilizados (VOLPATO, 2017).

Na veterinária, a impressão 3D tem sido usada para produzir órteses personalizadas para animais com deficiências físicas, como cães com membros amputados ou deformidades congênitas. A tecnologia permite que as órteses sejam projetadas e fabricadas com precisão, para garantir um ajuste confortável e seguro para o animal.

Entre os métodos de impressão 3D disponíveis, a deposição de material fundido (FDM) e a estereolitografia (SLA) seriam os mais apropriados para aplicações na veterinária. O método FDM é relativamente fácil de usar e acessível, e pode ser usado com uma ampla variedade de materiais, incluindo plásticos e materiais biocompatíveis. Já o método SLA oferece uma precisão muito alta e é especialmente adequado para produzir objetos com detalhes finos e superfícies lisas. Ambos os métodos são capazes de produzir órteses caninas personalizadas com precisão e eficiência (VOLPATO, 2017).

O processo de impressão 3D geralmente envolve cinco etapas principais: modelagem 3D, preparação do arquivo, preparação da impressora, impressão e pós-processamento (CUNIDO, 2015).

A primeira etapa do processo é a modelagem 3D, que envolve a criação de um modelo digital do objeto que será impresso. Isso pode ser feito por meio de softwares de modelagem 3D, escaneamento 3D ou arquivos CAD. A qualidade do modelo 3D é um fator importante para garantir a precisão e a qualidade da impressão.

Após a modelagem 3D, o arquivo precisa ser preparado para a impressão. Isso pode incluir a verificação de erros de modelagem, a divisão do modelo em peças menores (se necessário), a definição de parâmetros de impressão, como resolução e

velocidade, e a geração do arquivo de instrução para a impressora. A qualidade do arquivo de instrução também é importante para garantir uma impressão precisa e de qualidade.

Antes de iniciar a impressão, a impressora precisa ser preparada e configurada de acordo com as especificações do arquivo de instrução. Isso pode incluir a inserção do material de impressão, a verificação da temperatura e do nível da plataforma de impressão, entre outros. A calibração adequada da impressora é fundamental para garantir a precisão da impressão.

Com a impressora pronta e o arquivo de instrução carregado, o processo de impressão começa. Dependendo do método de impressão, o material é depositado ou fundido em camadas, com a impressora se movendo de forma controlada para criar o objeto desejado. A precisão e a qualidade da impressão dependem do método de impressão escolhido, da qualidade do material e do arquivo de instrução.

Após a impressão, pode ser necessário fazer algum pós-processamento, como remoção de suportes de material, acabamento da superfície ou tratamento térmico, dependendo do material e da finalidade do objeto. O pós-processamento é uma etapa importante para garantir a qualidade final do objeto impresso.

### **2.3.2 ESCANEAMENTO 3D**

O escaneamento 3D de objetos é uma tecnologia que permite a captura detalhada da forma e das dimensões de um objeto físico, gerando uma representação digital precisa. Existem diferentes métodos para realizar essa tarefa, cada um com suas vantagens e aplicações específicas. Entre os mais utilizados estão a fotogrametria, o time of flight, o LiDAR e a varredura de pontos. Esses métodos se diferenciam pelo tipo de sensor, a precisão das medições e as condições em que podem ser aplicados.

A fotogrametria é um método que utiliza imagens 2D para gerar um modelo tridimensional. Nesse processo, são capturadas múltiplas fotos do objeto a partir de diferentes ângulos, e algoritmos especializados são usados para calcular a posição espacial dos pontos com base nas diferenças de perspectiva entre as imagens. Esse método é amplamente utilizado em projetos de mapeamento, arqueologia e design, por ser relativamente acessível e não exigir equipamentos complexos. No entanto, a precisão da fotogrametria depende da qualidade das imagens e das condições de

iluminação.

O time of flight (ToF) é uma técnica de escaneamento 3D que utiliza um sensor para medir o tempo que um feixe de luz, geralmente infravermelho, leva para ir até o objeto e retornar ao sensor. A partir dessa medida de tempo, a distância entre o sensor e o objeto é calculada, gerando uma nuvem de pontos que descreve a superfície do objeto. Essa técnica é conhecida pela rapidez na coleta de dados e pela capacidade de escanear grandes áreas. Contudo, a precisão pode ser afetada por fatores como a reflexão da luz e as características da superfície do objeto.

O LiDAR (Light Detection and Ranging) também é uma tecnologia baseada na medição da distância entre o sensor e o objeto, mas, ao contrário do ToF, utiliza pulsos de laser para realizar essas medições. O LiDAR é amplamente utilizado em mapeamentos de grande escala, como a modelagem de terrenos e construções, graças à sua alta precisão e capacidade de operar em diversas condições ambientais.

Por fim, a varredura de pontos refere-se a um método em que um feixe de luz ou laser é projetado ponto a ponto sobre a superfície do objeto, e a posição de cada ponto é registrada. Esse método é extremamente preciso, sendo utilizado em aplicações onde é necessário captar detalhes minuciosos, como na engenharia reversa e em indústrias que exigem tolerâncias muito baixas em seus processos de manufatura.

### **2.3.3 CRITÉRIOS DE FALHA MECÂNICA**

Os critérios de falhas mecânicas são utilizados na engenharia para determinar quando um material ou componente está prestes a falhar sob determinadas condições de carregamento. Esses critérios são essenciais no projeto de máquinas e estruturas, pois ajudam a prever o comportamento dos materiais em diferentes situações de estresse e deformação. Entre os critérios mais utilizados estão os de Tresca e von Mises, ambos amplamente aplicados em análises de falha de materiais dúcteis. Apesar de suas semelhanças, eles diferem na forma como tratam o estado de tensões.

O critério de falha de Tresca baseia-se na teoria da máxima tensão cisalhante, que afirma que a falha ocorre quando a tensão cisalhante máxima no material atinge um valor crítico. Segundo esse critério, a falha acontece quando a diferença entre as tensões principais (máxima e mínima) atinge um valor limite, equivalente à resistência

ao escoamento do material sob cisalhamento puro. O critério de Tresca é considerado mais conservador, pois tende a prever falhas em níveis de tensões mais baixos, o que pode resultar em projetos mais robustos, porém mais pesados ou superdimensionados (SHIGLEY, 2011).

Por outro lado, o critério de falha de von Mises baseia-se na teoria da energia de distorção, que sugere que a falha ocorre quando a energia de distorção elástica acumulada no material atinge um valor crítico. Esse critério considera uma combinação das três tensões principais e é mais preciso ao prever a falha de materiais dúcteis sob estados de tensões complexos. O critério de von Mises é menos conservador que o de Tresca, permitindo um aproveitamento mais eficiente dos materiais, especialmente em situações em que o estado de tensões é multiaxial.

Nas simulações de CADs mecânicos, o critério de von Mises é amplamente utilizado devido à sua maior precisão em descrever o comportamento de materiais dúcteis em estados de tensão triaxial, que são comuns em componentes submetidos a cargas complexas. Além disso, o critério de von Mises reflete melhor a realidade dos materiais sob carregamento multiaxial, sendo capaz de prever com maior confiabilidade os pontos de escoamento e as falhas. Isso torna as simulações mais precisas, garantindo que os componentes projetados sejam suficientemente seguros sem serem excessivamente superdimensionados, o que é crucial em projetos de engenharia que buscam otimização de peso, custos e desempenho (SHIGLEY, 2011).

#### **2.3.4 MATERIAIS DE IMPRESSÃO 3D**

Os polímeros desempenham um papel fundamental na impressão 3D, oferecendo uma variedade de propriedades que atendem a diferentes necessidades e aplicações. Dentre os polímeros mais utilizados nesse contexto, destacam-se o TPU, o PETG e o PLA. Cada um desses materiais possui características específicas que os tornam adequados para diferentes tipos de impressões e finalidades.

O TPU (poliuretano termoplástico) é um material altamente flexível e elástico, tornando-o ideal para aplicações que exigem resistência ao impacto e à abrasão. Sua capacidade de se esticar e retornar à sua forma original o torna perfeito para a impressão de peças como capas de telefone, pneus de brinquedos e componentes que necessitam de flexibilidade e durabilidade. Além disso, o TPU é resistente a produtos químicos, o que amplia sua aplicabilidade em ambientes industriais e

automotivos.

O PETG (polietileno tereftalato glicol) é um material que combina a facilidade de impressão do PLA com a resistência e durabilidade do ABS. Ele é amplamente utilizado em aplicações que exigem um equilíbrio entre resistência mecânica e clareza, sendo popular na impressão de peças funcionais, protótipos e até mesmo em embalagens. O PETG é resistente a impactos e apresenta boa adesão entre camadas, resultando em peças impressas com excelente qualidade. Além disso, é um material reciclável, o que o torna uma opção mais sustentável em comparação a outros polímeros.

O PLA (ácido polilático) é um dos polímeros mais populares na impressão 3D, especialmente entre iniciantes. Fabricado a partir de fontes renováveis, como amido de milho, o PLA é fácil de imprimir e oferece uma boa adesão entre as camadas. Ele possui um acabamento superficial atraente e está disponível em uma ampla gama de cores. No entanto, embora seja biodegradável e ambientalmente amigável, o PLA não é tão resistente a altas temperaturas quanto o PETG ou o ABS, o que limita sua utilização em aplicações que exigem maior resistência térmica. De qualquer forma, sua facilidade de uso e versatilidade fazem do PLA uma escolha preferida para protótipos, modelos e projetos de arte.

### **2.3.5 MÉTODOS DE IMPRESSÃO 3D**

A impressão 3D, ou fabricação aditiva, transformou a produção ao possibilitar a criação de objetos tridimensionais a partir de modelos digitais. Entre os métodos mais utilizados estão a FDM (Fused Deposition Modeling), que extruda filamentos termoplásticos em camadas, e a SLA (Stereolithography Apparatus), que utiliza um feixe de luz UV para solidificar resina líquida. A FDM é valorizada pela sua acessibilidade e versatilidade, enquanto a SLA se destaca pela precisão e pela capacidade de produzir detalhes finos, sendo ideal para aplicações que exigem alta qualidade, como na odontologia e na joalheria.

FDM (Fused Deposition Modeling), também conhecido como FFF (Fused Filament Fabrication), é um dos métodos mais populares de impressão 3D atualmente. Neste método, um filamento de plástico é aquecido até que se torne líquido e, em seguida, é depositado camada por camada em uma plataforma de impressão, solidificando-se à medida que esfria.

O filamento de plástico utilizado pode ser de diferentes materiais, como ABS, PLA, Nylon, PETG, entre outros. A escolha do material depende do uso final do objeto impresso, já que cada material tem suas próprias características de resistência, flexibilidade, durabilidade, entre outras propriedades.

Uma das vantagens do método FDM é sua acessibilidade e facilidade de uso. As impressoras FDM são relativamente baratas em comparação com outros métodos de impressão 3D e, com o uso de softwares de modelagem 3D e instruções simples, mesmo usuários iniciantes podem produzir objetos em pouco tempo.

No entanto, é importante ressaltar que a qualidade da impressão depende de vários fatores, como a calibração da impressora, a qualidade do filamento e a precisão do modelo 3D. Além disso, devido à natureza do método FDM, a superfície do objeto pode apresentar camadas visíveis ou rugosidades, o que pode afetar sua aparência e usabilidade.

Na veterinária, o método FDM pode ser útil para produzir órteses e próteses para animais com necessidades especiais, como cães com deficiências ou lesões nas patas. Esses dispositivos podem ser personalizados de acordo com a anatomia e as necessidades individuais de cada animal, permitindo um ajuste preciso e confortável. Além disso, a produção rápida e acessível de órteses e próteses através do método FDM pode proporcionar uma alternativa mais econômica e viável em comparação com as opções convencionais (VOLPATO, 2017).

SLA (Stereolithography) é um método de impressão 3D que utiliza um processo de fotopolimerização para criar objetos camada por camada a partir de um material líquido. Neste método, um laser é usado para solidificar uma resina fotossensível líquida, transformando-a em um objeto sólido.

Ao contrário do método FDM, o SLA é capaz de produzir objetos com uma precisão extremamente alta, permitindo a criação de peças com detalhes muito finos e superfícies suaves. Isso se deve ao fato de que o laser usado no processo é capaz de focar em pontos muito pequenos, permitindo que cada camada seja construída com uma precisão de até alguns micrômetros.

A escolha do tipo de resina usada no SLA depende do tipo de objeto que está sendo produzido. Existem resinas disponíveis que oferecem diferentes propriedades, como rigidez, flexibilidade, transparência, entre outras características.

Apesar de sua alta precisão, o método SLA tem algumas limitações. Uma delas

é o tamanho máximo do objeto que pode ser produzido, já que o processo de fotopolimerização pode ser demorado para objetos muito grandes. Além disso, a resina usada no processo pode ser cara e tóxica, exigindo cuidados especiais durante o manuseio.

Na veterinária, o método SLA pode ser útil para a produção de modelos anatômicos precisos para planejamento cirúrgico ou para produção de próteses e órteses personalizadas. O alto nível de precisão do método SLA permite a criação de dispositivos que se ajustam perfeitamente à anatomia de cada animal, proporcionando conforto e funcionalidade. Além disso, a produção de modelos anatômicos pode auxiliar no treinamento de estudantes de veterinária ou no planejamento de cirurgias complexas (VOLPATO, 2017).

### **3 METODOLOGIA**

A pesquisa em análise tem como foco a descrição dos fenômenos estudados, utilizando abordagens qualitativas e quantitativas como base metodológica. Procedimentos bibliográficos e experimentais também serão adotados para complementar as técnicas de coleta e análise de dados. O método científico hipotético-dedutivo será empregado para validar as hipóteses levantadas.

As seções subsequentes deste trabalho expõem de forma minuciosa as atividades e procedimentos necessários para gerar, coletar e organizar os dados essenciais à realização da pesquisa, visando alcançar os resultados esperados. Através de análises rigorosas dos dados coletados, pretende-se contribuir para a produção de novos conhecimentos e avanço na área de estudo em questão.

#### **3.1 ESCOPO DO ESTUDO**

O objetivo deste trabalho será desenvolver um protótipo de órtese funcional para animais e que possa ser utilizado como fonte de aprendizado e investigação na área. A partir de uma análise da literatura existente sobre órteses para animais, será criado um protótipo de órtese, que levará em conta as suas necessidades específicas. A órtese será projetada para fornecer o suporte necessário, permitindo que cães de pequeno porte com má formação congênita em membro torácico possam se movimentar com mais facilidade e conforto, além de reduzir as dores e incômodos.

Serão realizados testes e coleta de dados para avaliar a eficácia do protótipo, e a partir desses resultados, serão feitas melhorias e ajustes necessários.

O desenvolvimento dessa órtese poderá ser utilizado como uma fonte de aprendizado e investigação acadêmica, abrindo caminho para futuros estudos e pesquisas na área de órteses para animais.

### 3.2 ISENÇÃO DE APROVAÇÃO DO COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA

O presente estudo, que envolve o desenvolvimento e fabricação de órteses para animais com deficiência motora, não realizou experimentação científica com animais nem testagens sob o controle da equipe acadêmica. Toda a demanda pela órtese surgiu a partir da solicitação do veterinário responsável pelo caso clínico, dr. Alan Gleison (CRMV 2804 PE), que acompanhou o cão mencionado no estudo dentro da sua rotina normal de atendimento em uma clínica veterinária.

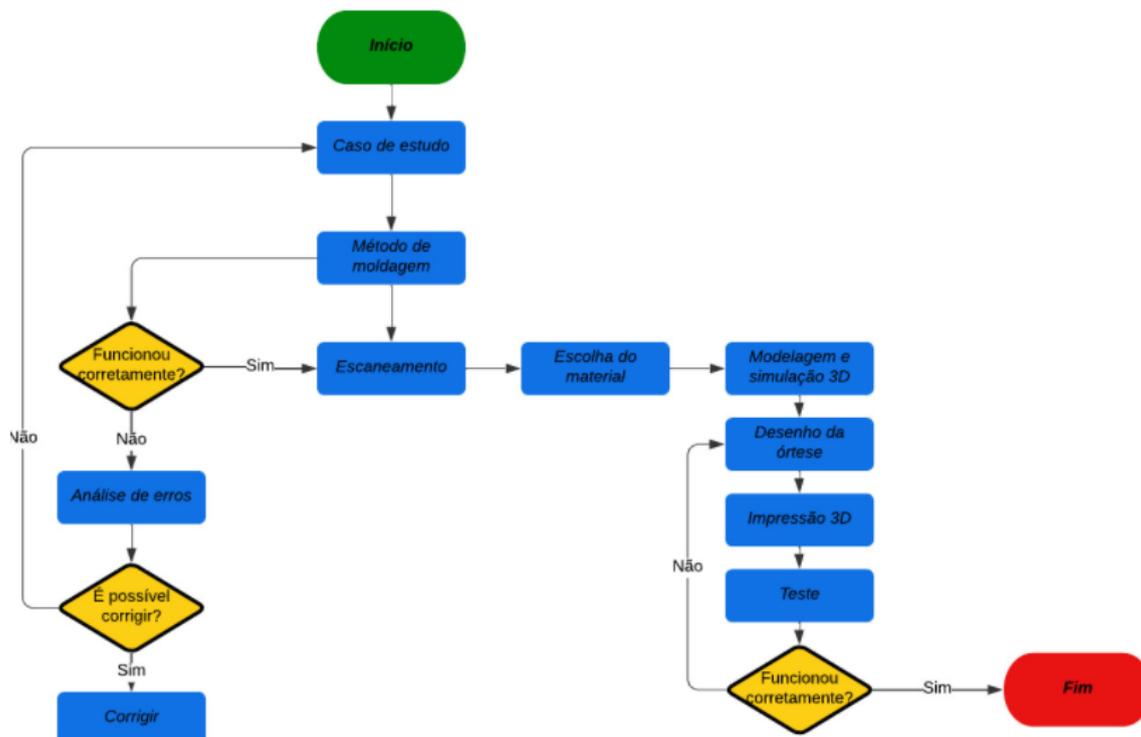
Ressalta-se que o envolvimento do aluno foi limitado à fabricação técnica do dispositivo ortopédico com base nas especificações fornecidas pelo veterinário, conforme práticas já estabelecidas na clínica. O processo foi realizado exclusivamente para o tratamento e bem-estar do animal, sem a intenção de realizar experimentação ou coleta de dados científicos que possam configurar um estudo experimental.

Portanto, não houve intervenção experimental, nem qualquer manipulação do animal fora daquilo que já ocorre rotineiramente no ambiente clínico. O desenvolvimento da órtese e o acompanhamento da sua utilização foram realizados pelo veterinário dentro do escopo do seu trabalho clínico habitual, sem qualquer caráter de pesquisa que demande aprovação do Comitê de Ética no Uso de Animais (CEUA).

O aluno teve como única função o desenvolvimento do protótipo mecânico, sem qualquer interação direta com o animal para fins científicos. Assim, a presente pesquisa não se enquadra nas normas previstas pela Lei nº 11.794/2008 (Lei Arouca), uma vez que o animal já estava em tratamento e sob os cuidados do veterinário dentro de sua prática clínica.

A Figura 6 mostra um fluxograma dos processos utilizados neste trabalho e sua estruturação do início ao fim.

Figura 6: Fluxograma



Fonte: Autoria própria

### 3.3 CASO DE ESTUDO

Através de um caso clínico do consultório do médico ortopedista veterinário Dr. Alan Gleison (CRMV 2804 PE), foi requerido o desenvolvimento de uma órtese com um grau de liberdade e 10 cm de altura que satisfizesse as solicitações mecânicas de uma órtese para membro torácico de um cão de pequeno porte.

Toda e qualquer intervenção clínica nesse caso foi conduzida pelo médico ortopedista veterinário Dr. Alan Gleison (CRMV 2804 PE). Sua análise resultou na escolha entre a utilização de órtese ou prótese para melhorar a qualidade de vida do cão. Essa decisão foi baseada em considerações clínicas específicas.

Este relato de caso segue o modelo de estudo adotado, destacando de maneira objetiva a condição do cão, as características físicas relevantes e a intervenção clínica realizada.

### 3.4 ESTRUTURA METODOLÓGICA

#### 3.4.1 Método de moldagem do membro anômalo

No método de moldagem adotado, o negativo foi confeccionado por meio da mistura de alginato Hydrogum e água, enquanto o positivo, o molde propriamente dito, foi elaborado com gesso tipo IV e água.

Nesta etapa, a técnica consistiu em misturar o alginato com água, imergir uma patela de boi na solução e, após alguns segundos retirá-la, momento em que a mistura se solidificou por cristalização. Com o molde negativo em alginato concluído, realizou-se a mistura de gesso e água, despejando essa combinação no molde negativo para criar o molde positivo em gesso.

É relevante salientar que essa fase contou com o apoio e a consulta do Odontologista Renan Cutrim, especialista em fabricação de órteses e próteses ortodônticas por meio de usinagem e impressão 3D. A contribuição do especialista enriqueceu o processo, garantindo uma abordagem técnica e precisa na elaboração dos moldes, essenciais para a continuidade do projeto.

Embora diversas técnicas tenham sido consideradas para a confecção do negativo, como a utilização de ataduras ou o emprego de tomografia computadorizada, a opção pelo alginato foi fundamentada em critérios específicos.

A escolha desse material se deu em razão de sua precisão na moldagem, diferenciando-se, por exemplo, das ataduras em gesso, conforme destacado por Dal Corso (2019). Além disso, o alginato apresenta a vantagem de ser uma alternativa de baixo custo em comparação com a tomografia computadorizada, tornando-se uma opção economicamente viável para a fase de moldagem do projeto em questão. Essa abordagem equilibrada entre eficácia e economia reforça a assertividade na escolha do alginato como componente central do método adotado.

#### 3.4.2 Escaneamento do molde

Após a conclusão do molde, procedeu-se ao escaneamento por meio da técnica de fotogrametria. Essa abordagem envolve a captura de imagens de diversos ângulos, a partir das quais a topografia da região analisada é determinada.

Vale ressaltar que, embora outras técnicas, como LiDAR (Light Detection and Ranging) ou ToF (Time of Flight), possam ser empregadas com precisão similar à

fotogrametria, a escolha desta última se deu por limitações da máquina de scanner em questão. A técnica de fotogrametria apresenta-se como uma alternativa eficaz, permitindo uma representação tridimensional com precisão satisfatória para esta aplicabilidade.

Dessa forma, a etapa de escaneamento é importante para a obtenção de dados precisos que, posteriormente, serão utilizados na etapa de projeto da órtese.

### **3.4.3 Projeto mecânico da órtese**

Neste tópico, será abordada a etapa crucial da elaboração do projeto mecânico da órtese para o cão. Nessa fase, serão determinados tanto a geometria da peça quanto o material a ser utilizado.

A escolha da geometria será embasada em uma simulação de carga aplicada ao membro do cão. O objetivo primordial consiste em garantir que a geometria selecionada desempenhe eficazmente o papel anatômico de compensar os 10 cm de diferença de comprimento, ao mesmo tempo em que alivia concentrações de tensões prejudiciais ao membro do animal.

No que se refere ao material, a decisão será fundamentada em uma análise gráfica da curva Tensão versus Deformação dos polímeros selecionados, obtidos por meio de ensaios de compressão. Esses dados proporcionarão uma compreensão aprofundada do comportamento mecânico dos materiais sob as condições específicas de aplicação.

A integração dessas considerações, desde a simulação de carga até a análise gráfica dos materiais, delineará o projeto mecânico da órtese. Este enfoque integrado visa não apenas a eficácia funcional, mas também a segurança e o conforto do paciente canino. Essa abordagem técnica e metodológica é essencial para a efetividade do projeto como um todo.

### **3.4.4 Impressão e teste das órteses**

Nesta última etapa, o enfoque será na materialização das órteses por meio da impressão 3D, seguida por avaliações específicas de compatibilidade e adaptação no molde.

O processo consistirá na impressão das órteses conforme as especificações do projeto mecânico previamente desenvolvido. Posteriormente, serão conduzidos testes

detalhados para verificar a compatibilidade da órtese com o molde.

É fundamental ressaltar que uma avaliação definitiva do impacto de uma órtese na marcha de um cão ocorrerá após um período prolongado de fisioterapia adaptativa, o que foge do escopo deste trabalho.

## 4 RESULTADOS

A seguir, será apresentado em detalhes todo o procedimento proposto no subtópico anterior, bem como seus resultados e a interpretação deles. Após o tópico anterior, as etapas da pesquisa foram: Molde do membro torácico anômalo, escaneamento do molde, elaboração do projeto mecânico da órtese, impressão e testes das órteses.

### 4.1 MOLDE DO MEMBRO TORÁCICO ANÔMALO

Na etapa da fabricação do molde do membro anômalo do cão, utilizou-se um procedimento composto por três ensaios teste e o molde definitivo no cão. Por questões de custo, os ensaios foram conduzidos com Alginato tipo 2 e gesso tipo III, enquanto o molde do membro do cão foi realizado com alginato tipo 1 e gesso tipo IV, embora o ideal fosse a uniformidade dos materiais, apesar das diferenças não serem tão significativas. As proporções de Alginato, gesso e água foram de acordo com as sugestões dos respectivos fabricantes.

Os ensaios em patela de boi foram realizados para sugerir um procedimento de moldagem definitivo no membro do cão. Em cada ensaio, uma mistura aquosa de alginato foi despejada em um recipiente de moldagem composto por um cano de esgoto de 70mm de diâmetro e 20cm de comprimento, vedado no fundo com silvertape e papel manteiga.

Figura 7: Recipiente de moldagem



Fonte: Autoria própria

No primeiro ensaio, utilizando 66g de alginato tipo 2 e 120ml de água para o molde negativo, e 150g de gesso tipo III e 44ml de água para o molde positivo, a patela de boi foi untada com lubrificante hipoalergênico à base de água. A mistura de alginato foi despejada no recipiente enquanto a água era adicionada e misturada manualmente por cerca de 1 minuto. Em seguida, a patela de boi foi mergulhada no alginato por 3 minutos, após os quais foi retirada. O gesso e a água foram misturados manualmente e despejados no molde negativo de alginato. Após 1 hora, o molde negativo foi retirado, resultando em falhas devido a uma má formação durante a mistura e cristalização inadequada, comprometendo a precisão do molde positivo em gesso.

Os resultados do primeiro ensaio foram insatisfatórios, evidenciando imprecisões no molde negativo e falhas no molde positivo. A má formação do molde negativo influenciou negativamente o processo como um todo.

Figura 8: Primeiro ensaio de moldagem



Fonte: A autoria própria

Como solução para as imprecisões identificadas, implementou-se uma modificação na técnica de mistura do alginato, utilizando um misturador portátil de cozinha com 300W de potência. Além disso, a preparação do gesso foi aprimorada com o uso de batedeiras de bolo, reduzindo significativamente o tempo de mistura do alginato para aproximadamente 20 segundos antes da imersão da patela.

Após o despejo da solução aquosa de gesso no molde negativo, o recipiente de moldagem foi acoplado a uma placa vibratória específica para gesso, com o intuito de eliminar bolhas presentes na solução. Essa abordagem visava garantir uma moldagem mais homogênea e precisa.

Figura 9: Vibrador mecânico odontológico



Disponível em: <https://www.dentalcaliari.com.br>

No segundo ensaio, foram utilizados 120g de alginato tipo 2 e 218ml de água, bem como 200g de gesso tipo III e 60ml de água. O molde resultante desse ensaio apresentou-se satisfatório, com ótima precisão e uma moldagem homogênea, embora tenha sofrido com a limitação de comprimento devido à escassez de material.

Figura 10: Segundo ensaio de molde



Fonte: Autoria própria

No terceiro ensaio, optou-se por 275g de alginato tipo 2 e 500ml de água, juntamente com 300g de gesso tipo III e 88ml de água, seguindo os mesmos métodos de mistura do segundo ensaio. Nesse caso, o terceiro molde atingiu o comprimento adequado, além de exibir boa precisão e homogeneidade na moldagem.

As adaptações nas técnicas de mistura e a utilização de equipamentos especializados contribuíram significativamente para melhorar a qualidade dos moldes, superando os desafios identificados nos ensaios anteriores.

Após a definição de um método adequado para a fabricação de moldes com proporções apropriadas, esse método foi sugerido ao médico veterinário, que se

encarregou de realizar o molde do membro torácico do cão.

Figura 11: Molde em gesso do membro torácico anômalo do cão



Fonte: Autoria própria

## 4.2 ESCANEAMENTO

A técnica adotada para a digitalização do molde foi a fotogrametria, uma abordagem topográfica que se baseia na captura de imagens de diferentes ângulos. A escolha por essa metodologia foi motivada pela sua capacidade de gerar representações tridimensionais com precisão satisfatória para a finalidade deste trabalho. Além disso, sua facilidade de execução e custo acessível, permite a utilização de praticamente qualquer smartphone. Esses fatores foram determinantes para a opção por essa abordagem.

A fotogrametria se destaca por sua eficiência na reconstrução de modelos tridimensionais a partir de imagens bidimensionais, tornando-se uma ferramenta valiosa para a digitalização do molde do membro do cão. Essa escolha metodológica, além de oferecer precisão nas representações, também contribui para a viabilidade econômica e operacional do projeto, alinhando-se às necessidades práticas do desenvolvimento da órtese.

Durante essa etapa, foi utilizada uma mesa rotatória, o molde em gesso foi posicionado no centro da mesa, proporcionando uma rotação controlada. Cerca de 500 fotografias foram capturadas, mantendo a câmera fixa enquanto a mesa era rotacionada. Essa estratégia visou obter uma diversidade de ângulos abrangente, possibilitando uma reconstrução detalhada e tridimensional do molde. O software utilizado foi o Polycam.

É fundamental ressaltar que a ausência de sombras e a escolha de um fundo

opaco e preto (ou verde) foram critérios cruciais para otimizar a precisão do escaneamento. Essas considerações visavam minimizar interferências e garantir uma representação fiel da geometria do molde.

Este procedimento, embora técnico em sua natureza, desempenha um papel crucial na transcrição da geometria física para a digital, proporcionando uma base precisa para as etapas subsequentes do projeto. O uso da fotogrametria é tido como uma escolha metodológica estratégica para a captura precisa das características tridimensionais do molde, contribuindo significativamente para o desenvolvimento do projeto de órtese.

#### 4.3 PROJETO DA ÓRTESE

No estágio inicial do processo de elaboração do projeto mecânico da órtese, a escolha do material desempenha um papel crítico. Os materiais flexíveis, nomeadamente TPU, PETG e PLA, emergiram como os principais candidatos para a confecção da órtese.

Uma análise cuidadosa do módulo de Young, indicador da elasticidade e rigidez do material, foi conduzida para cada opção. O TPU, ao revelar o menor valor entre os materiais selecionados, mostrou-se a escolha mais apropriada para atender às exigências do projeto. Essa decisão foi fundamentada na necessidade de proporcionar à órtese a flexibilidade necessária para se ajustar ao membro do cão, garantindo conforto e eficácia no suporte durante a locomoção.

A seguir, será apresentada uma tabela comparativa dos módulos de Young para TPU, PETG e PLA, destacando as propriedades fundamentais que respaldaram a escolha do material para o desenvolvimento da órtese.

Tabela 1: Tabela comparativa para escolha do material

<b>Comparação dos módulos de Young dos materiais selecionados (Mpa)</b>			
<b>Materiais</b>	<b>TPU</b>	<b>PETG</b>	<b>PLA</b>
Módulo de Young	15,429	769,48	1290,7
Custo (R\$/Kg)	R\$ 149,90	R\$ 144,90	R\$ 131,00
Observações	Valores retirados com base em teste de tração de corpos de prova padronizados dos materiais selecionados. Por apresentarem propriedades mecânicas similares tanto em tração como em		

	compressão, é possível fazer essa comparação mesmo os testes sendo de tração.
Dados	Os ensaios foram feitos com 40% de preenchimento.

Fonte: Autoria própria

A seleção da geometria da órtese surge como um ponto crucial do projeto mecânico. Para realizar essa escolha, foi empregada uma simulação do membro do cão no software Solid Edge. Devido à complexidade da geometria escaneada, optou-se por desenvolver um modelo tridimensional simplificado, mantendo funcionalidade anatômica similar ao modelo original.

Após a conclusão da modelagem, uma simulação estática foi conduzida, utilizando o critério de Von Mises. Nessa análise, uma carga equivalente a 30% do peso do cão (3,45 kgf) foi aplicada na superfície de corte logo acima do cotovelo. As forças reacionárias do solo no cão foram consideradas, e uma restrição foi imposta na superfície de corte acima do cotovelo.

Figura 12: Simulação de carga estática na simplificação geométrica do membro



Fonte: Autoria própria

A análise revelou concentrações de tensões mais significativas na articulação entre rádio/ulna e metacarpos, bem como na parte interna do cotovelo. Destaca-se que a região da articulação rádio/ulna e metacarpos apresentou a maior concentração de tensões de aproximadamente 1,62 Mpa, bem abaixo da tensão limite de escoamento de 110 Mpa do osso, reforçando que há possibilidade de desconforto na

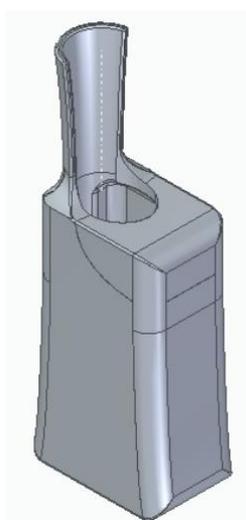
região de apoio e não necessariamente uma sobrecarga estrutural do membro anômalo do cão.

#### 4.3.1 Protótipo 1

Diante desse resultado, tornou-se evidente a necessidade de uma geometria capaz de suavizar as tensões nessa região, ao mesmo tempo em que atende à exigência anatômica da diferença de comprimento de 10cm entre o membro sadio e o anômalo.

Considerando esses requisitos, o design geométrico da órtese foi projetado conforme apresentado na figura abaixo, buscando uma configuração que harmonize a funcionalidade biomecânica com a adaptação anatômica necessária; sendo uma tornoeleira a responsável pela fixação da órtese no membro do cão.

Figura 13: Desenho de órtese (geometria 1) em Solid Edge.



Fonte: Autoria própria

#### 4.3.2 Protótipo 2

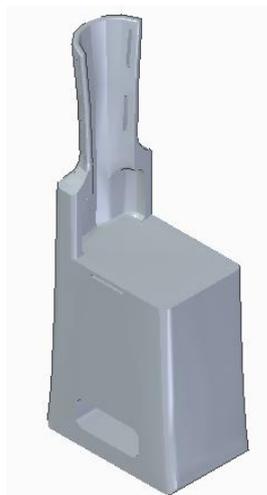
Na geometria anterior, foram identificados alguns efeitos práticos indesejáveis. A utilização de uma tornoeleira como dispositivo de fixação da órtese ao molde do membro do cão mostrou-se pouco prática, resultando em um aumento no tempo de aplicação da órtese e, conseqüentemente, em um possível estresse para o animal. Este fator foi considerado o principal problema.

Adicionalmente, tanto a tornoeleira quanto o design fechado na face dorsal do molde do membro do cão impediam a adequada visualização do membro, o que é

prejudicial em casos de rotações indevidas nas articulações. Para mitigar esses problemas, optou-se por um sistema de cintas de velcro e por uma geometria aberta na face dorsal do membro, abandonando, assim, a suavização na articulação entre rádio/ulna e metacarpos.

Dado que a tensão máxima nesse ponto é muito baixa em relação aos limites de escoamento dos ossos e tecidos do cão, essa alternativa não causaria desconforto; pelo contrário, ela manteria as superfícies do membro do cão mais arejadas, o que é uma característica desejável. Deste modo, a Figura 14 mostra a geometria adotada para órtese do cão.

Figura 14: Desenho de órtese (geometria 1) em Solid Edge.



Fonte: Autoria própria.

#### 4.4 IMPRESSÃO E TESTES DAS ÓRTESES

Nesta etapa, o material foi impresso em impressora 3D Ender 3 V.2, utilizando o método FDM com 40% de preenchimento em material flexível (TPU).

##### 4.4.1 Fabricação da órtese (protótipo 1)

Para aumentar o atrito com a superfície de contato, foi colado um solado de borracha que é muito comum em tênis e inclusive tem a mesma finalidade na órtese. Além do solado, foi acrescentado uma palmilha de material flexível TPE hipoalergênico, o mesmo material usado em simuladores de pele para prática de sutura.

Figura 15: Órtese (geometria 1) do cão em diversas vistas



Fonte: Autoria própria

A órtese foi aplicada ao molde do membro do cão com a finalidade de testar sua compatibilidade geométrica, uma vez bem sucedido o teste, a órtese foi considerada viável como protótipo para um possível teste no cão.

#### 4.4.2 Fabricação da órtese (protótipo 2)

A segunda órtese foi desenvolvida com características semelhantes à primeira utilizando-se dos mesmos materiais, com exceção da palmilha sendo, desta vez, desenvolvida em gel hipoalergênico e da cinta em velcro que substituiu a tornozeleira.

Figura 16: Cão do estudo utilizando a órtese (geometria 1).



Fonte: Autoria própria

## 5 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos neste estudo dedicado ao Desenvolvimento e Fabricação de Órteses para indivíduos com deficiência motora, é possível afirmar que

as intervenções propostas demonstraram ser promissoras. A avaliação de um protótipo de órtese confeccionada em TPU por meio de impressão 3D é um projeto viável, exibindo integridade mecânica satisfatória.

A compatibilidade do molde do membro do cão ao dispositivo ortopédico revelou-se promissora, sugerindo que a abordagem adotada pode contribuir significativamente para melhorar a qualidade de vida de indivíduos com deficiência motora. Destaca-se que o material utilizado, TPU, apresentou-se como uma opção de baixo custo e viável para a fabricação de órteses, o que pode ter implicações positivas para a acessibilidade desses dispositivos em diferentes contextos.

O emprego de alginato e gesso na fabricação do molde mostrou-se uma estratégia eficaz, proporcionando precisão adequada para a confecção das órteses. Além disso, o custo associado a esses processos mostrou-se substancialmente inferior quando comparado aos métodos convencionais, como a tomografia por exemplo. Essa consideração torna o projeto e a fabricação de órteses mais acessíveis, especialmente em comunidades economicamente desfavorecidas.

Os processos de moldagem e impressão utilizados neste trabalho demonstraram ser eficazes na produção de órteses, indicando que essas abordagens podem ser implementadas com sucesso para atender às necessidades de animais com deficiência motora. No que diz respeito ao escaneamento realizado por meio de fotogrametria, embora tenha atendido eficazmente às necessidades do trabalho, é importante ressaltar que o método LiDAR ofereceria uma precisão e praticidade ainda maiores, especialmente para usuários de smartphones dotados dessa tecnologia.

Em suma, os resultados deste estudo corroboram a viabilidade e eficácia das técnicas propostas, destacando a importância do uso de materiais acessíveis e métodos inovadores na fabricação de órteses para animais com deficiência motora. O presente trabalho contribui não apenas para o avanço técnico-científico, mas também para propor soluções acessíveis em benefício da saúde e bem-estar animal. Para trabalhos futuros, sugere-se investigar a fadiga em órteses ou próteses de cães de grande porte, um tópico que pode fornecer informações valiosas sobre a durabilidade e eficácia desses dispositivos em aplicações mais exigentes e situações mais adversas do ponto de vista de solicitações mecânicas.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, J. M.; PERRY, J. **Análise da marcha: aplicação clínica**. In: ROSE, J;

ANSELMO, Eduardo Diniz; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. MM editora, 1999.

BEER, Ferdinand Pierre; JOHNSTON, E. Russell. **Mecânica dos materiais**. 5. ed. São Paulo: McGraw Hill, 2012.

Bissani, R. H. **Projeto de uma prótese para membros torácicos para cães utilizando conceitos de DFAM**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de Caxias do Sul, 2021.

Dal Corso, M. S. **Desenvolvimento de prótese para membro anterior de um canino por meio de impressão 3D**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de Caxias do Sul, 2019.

FECCHIO, Roberto Silveira et al. **Estudo da biomecânica oclusal e da aderência da resina acrílica auto-polimerizável (polimetilmetacrilato) em fraturas de rinoteca de tucanos (Ramphastos toco)**. Pesquisa Veterinária brasileira, v. 28, n. 7, p. 335-340, 2008.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. Editora Edgard Blucher LTDA, 1969.

FIGUEIREDO, Beatriz Beca; CESAR, Francisco Ignácio Giocondo. **Um estudo da utilização da impressora 3D na engenharia e na medicina**. Revista Científica Saúde e Tecnologia, v. 2, n. 1, p. 1-12, 2022.

GAMBLE, J.G. **Marcha humana**, 2.ed. São Paulo: premier,1998. p.147-164.

GROSS, J.; FETTO, J.; ROSEN, E. **Exame músculoesquelético**. Porto Alegre: Artmed, 2000. p.420.

HALL, Susan J. **Basics biomechanics**. 6th ed. New York: McGraw Hill, 2017.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2012.

KÖNIG, Horst Erich; LIEBICH, Hans-Georg. **Anatomia dos Animais Domésticos**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2016.

MADANÇOS TEIXEIRA, Mariana Filipa. **Simulação biomecânica de próteses para cães**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Biomédica) - Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2021.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada**. Bookman, 2011.

RAO, Singiresu S. **Vibrações mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SCHNECK, Daniel J.; BRONZINO, Joseph D. **Biomechanics: principles and applications**. Boca Raton: CRC Press, 2003.

SERRÃO, Júlio Cerca; AMADIO, Alberto Carlos. **Contextualização da biomecânica para a investigação do movimento: fundamentos, métodos e aplicações para análise da técnica esportiva**. *Revista Brasileira de Educação Física e Esporte*, v. 21, n. 1, p. 61-85, 2007.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de Engenharia Mecânica**. Bookman, 2005.

SILVA, Gabriela Correia de Almeida e. **Análise cinemática da marcha de cães da raça golden retriever saudáveis**. Dissertação (Mestrado em Medicina Veterinária) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

VAUGHAN, C.L.; DAVIS, B.; O'Connor, J. **Dynamics of human gait**. United States:

Human kinetics publisher, Champaign Illinois, 1992. p.1-13.

VOLPATO, N. **Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações**. São Paulo: Blucher, 2007.

WONG, Iok Teng; VARELA, Samantha; LIANG, Vivian. **Design of a prosthetic flipper for a Kemp's ridley sea turtle**. Thesis (Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering) - Worcester Polytechnic Institute, Worcester, 2016.