

Fabricação de prótese personalizada para um cão utilizando a tecnologia de manufatura aditiva FDM

Francys Marcel Rodriguez Jimenez (Universidade Federal de Minas Gerais) francysmarcel12332@gmail.com

Andrea Del Pilar Fabra Rivera (Universidade Federal de Minas Gerais) andreadelpilar65@gmail.com

Fayson Marques Martins (Universidade Federal de Minas Gerais) faysonmarques@gmail.com

Juan Carlos Campos Rubio (Universidade Federal de Minas Gerais) juan@ufmg.br

Paulo Henrique Rodrigues Guilherme Reis (Universidade Federal de Minas Gerais)

paulohrodriguesgr@hotmail.com

Resumo:

A manufatura aditiva é a produção de objetos tridimensionais através da adição de um material depositado em camadas com dimensões micrométricas. O processo começa com o design de um modelo 3D utilizando a ferramenta computacional CAD (computer-aided design). Este modelo é exportado para um software específico que permite estabelecer os parâmetros de impressão segundo o material. Este artigo apresenta o desenvolvimento de uma prótese personalizada para uma cadela de raça York Shire utilizando a tecnologia FDM (Fused Deposition Modeling) de manufatura aditiva. O modelo foi projetado no software Rhinoceros®, levando em consideração a anatomia e as medidas exatas do animal. Uma vez obtido o modelo, foi executada uma análise estática de força pelo método dos elementos finitos usando o software SolidWorks®. Finalmente, foram estabelecidos os parâmetros de impressão de acordo com o material usado e o peso requeridos para a prótese final.

Palavras chave: Manufatura aditiva, FDM (Modelagem por deposição fundida), Prótese.

Manufacture of custom prosthesis for a dog using FDM additive manufacturing technology

Abstract

Additive manufacturing is the production of three-dimensional objects through the addition of layered material with micrometric dimensions. The process begins with the design of a 3D model using a CAD computational tool. This model is exported to a specific software that allows us to establish the printing parameters according to the material. This article presents the development of a personalized prosthesis for a York Shire breed bitch using the additive manufacturing FDM technology. The model was developed in the software Rhinoceros, considering the anatomy and the exact dimensions of the animal. Once the model was obtained, a static force analysis by finite elements method was performed using Solidworks software. Finally, the printing parameters were established according to the material used and the weight that the final prosthesis should have.

Key-words: Additives manufacturing, FDM (Fused Deposition Modeling), Prosthetics.

1. Introdução

Os cães podem sofrer acidentes, passar por doenças ou apresentar malformações congênitas que causam lesões graves nas extremidades ou a perda total delas. Isso gera a necessidade de elaborar órteses ou próteses que substituam os membros afetados, permitindo que o cão desenvolva suas atividades diárias com normalidade. A manufatura aditiva na área da veterinária apresenta-se como uma alternativa de baixo custo para a elaboração e obtenção de órteses e próteses, possibilitando solução a casos de alta recorrência nos hospitais veterinários. Além disso, nas técnicas de manufatura aditiva, é possível realizar o processo de design tridimensional de forma rápida e exata de acordo com a necessidade específica do caso e posteriormente realizar impressão 3D dos modelos. Outra vantagem desta técnica é que as próteses ou órteses podem ser fabricadas de forma personalizada, por meio do escaneamento do membro afetado e posterior desenvolvimento do design com suas medidas exatas. Por outro lado, estes modelos podem ser padronizados com o fim de acelerar o processo, somente adaptando as medidas de acordo com o cão.

A manufatura aditiva consiste na fabricação de um sólido por meio da manipulação controlada de um material que é depositado camada a camada de maneira precisa até a obtenção da geometria final da peça, previamente modelada no software de design CAD. O termo manufatura aditiva engloba diferentes processos e tecnologias.

Enfatizando a modelagem de deposição fundida (FDM), este é um processo de fabricação para protótipos ou peças de aplicações com menores solicitações onde o material é depositado em camadas até a geometria final ser obtida. Esta deposição ocorre quando um filamento de um termoplástico armazenado em rolos é forçado por um bocal que está a uma temperatura superior à temperatura de fusão do material. Este processo começa com o design de um modelo em um software de design CAD, que é exportado para o software de impressão em formato STL, no qual os parâmetros de impressão básicos são estabelecidos, como o tipo de material, porcentagem de preenchimento, velocidade de impressão e outros. Na Figura 1 podem ser observados diferentes aspectos do processo FDM.

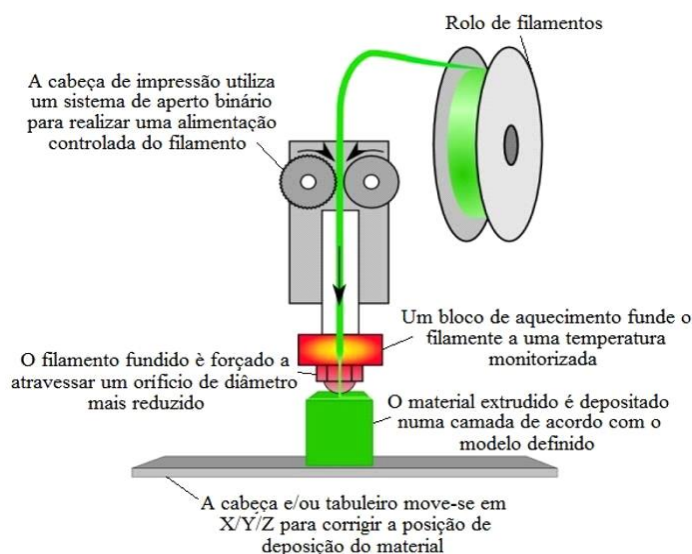


Figura 1- Funcionamento de uma impressora 3D com tecnologia FDM

O crescimento desta tecnologia deve-se aos benefícios que gera em diferentes setores industriais, como automotivo, eletrônico, aeroespacial, médico, arquitetônico e outros. Enfatizando o setor veterinário, com o uso da manufatura aditiva, é possível realizar planejamentos cirúrgicos usando modelos anatômicos gerados a partir de imagens tomográficas do animal. Além disso, pode-se desenvolver implantes ortopédicos e próteses adaptadas às necessidades do cão. (Zahera, 2012).

O objetivo deste projeto foi solução de um caso real por meio do desenvolvimento de uma prótese personalizada para um cão York Shire que sofreu uma amputação transradial causada por degeneração óssea. O modelo foi projetado através da aplicação de técnicas de digitalização 3D e manufatura aditiva a fim de obter-se uma prótese personalizada com as medidas exatas do animal. A análise preliminar, com a ajuda de ferramentas computacionais, permitiu avaliar o desempenho mecânico e a adaptabilidade do produto.

2. Revisão bibliográfica

A prototipagem rápida é uma tecnologia que permite transformar modelos elaborados digitalmente por meio de um software de design em objetos físicos tridimensionais, sendo utilizada para a fabricação de peças para máquinas, protótipos, modelos e moldes. Estes modelos são fabricados pela adição camada por camada de um material até obter-se o objeto físico com as dimensões estabelecidas. A prototipagem rápida está composta por diversas técnicas das quais podemos mencionar: estereolitografia (SLA), sinterização seletiva a laser (SLS), fabricação de objetos laminados (LOM), modelagem de deposição fundida (FDM), produção direta de casca (DSP), impressão 3D, sendo estas as mais usadas.

A estereolitografia (SLA) é uma técnica que utiliza, basicamente, uma resina líquida fotossensível, uma base para a fabricação dos modelos e um laser ultravioleta (UV) que efetua a cura a resina. As camadas são unidas depois de serem curadas pelo laser progressivamente, formando o objeto desejado. Esta técnica é utilizada principalmente na área odontológica para a elaboração de implantes ou o planejamento cirúrgico, permitindo determinar a área ferida e a inserção de implantes dentários. É uma técnica que fornece precisão para a realização prévia de uma cirurgia e o reconhecimento das áreas que devem ser tratadas, baseada nos modelos elaborados da área afetada (Torabi, Farjood e Hamedani, 2015).

O método de sinterização seletiva a laser (SLS) é composto por um laser controlado por um computador realizando a varredura da geometria da camada. O material é depositado camada por camada na superfície de construção por meio de um rolo, então a superfície do material é exposta a um feixe de laser que sintetiza a nova camada e as une com as anteriores. A sinterização seletiva a laser pode usar vários materiais termoplásticos, como nylon, cera de fundição, materiais metálicos, materiais cerâmicos e compósitos termoplásticos.

A modelagem de deposição fundida (FDM), inicia seu processo com a alimentação de um material termoplástico advindo de um carretel de filamento a uma cabeça de impressão por meio de um sistema de roletes, o filamento passa pelo bocal extrusor onde é atingida a temperatura de trabalho do material termoplástico, permitindo sua saída para ser depositada em camadas e criar a geometria do modelo tridimensional. O material solidifica em aproximadamente 0,1 s depois de ser ejetado do bocal e junta-se à camada inferior (Torabi, Farjood e Hamedani, 2015).

Segundo (Volpato, 2007) a plataforma em que o material é depositado tem de ser mantida a uma temperatura adequada, garantindo que o termoplástico depositado enrijeça em um tempo adequado. A temperatura deve também garantir que o material não resfrie rápido demais, o que pode levar a distorções na geometria final da peça. Os filamentos usados normalmente vêm em duas espessuras padrão, 1,75 e 3 mm. Os bicos de extrusão aquecem o filamento termoplástico e o material extrudado sai com diâmetros de variam entre 0,10 e 0,70mm. Os parâmetros de fabricação, em geral, podem ser ajustados manualmente. O processo pode contar também com um bico de extrusão auxiliar, que tem por finalidade a deposição de material de suporte. O material de suporte pode ser necessário para a manufatura de objetos com geometrias complexas ou que não possam ser apoiados nas camadas anteriores. Na escolha do material de suporte, deve-se levar em conta a sua necessidade posterior de remoção. O uso de materiais menos resistentes que o de modelagem ou solúveis em água à altas temperaturas é conveniente. A afinidade entre os materiais de suporte e modelagem deve ser pequena (Minetola e Eysers, 2017).

No momento de realizar o design de uma prótese para um determinado cão, deve-se levar em consideração sua anatomia. Nem todos os cães reagem da mesma maneira a uma amputação de um membro. Por exemplo, em cães de raças pequenas, o nível de amputação do membro deve ser alto, porque se o membro amputado exceder as medidas adequadas, o animal começará a se apoiar nele, gerando lesões no coto e feridas difíceis para tratar.

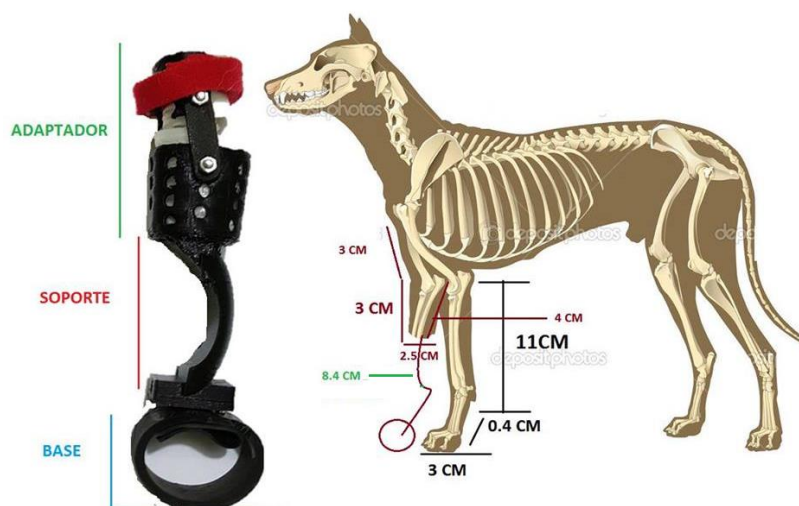


Figura 2- Exemplo de prótese desenvolvida para um cão

Além disso, é importante salientar que o aparelho locomotor dos cães tem por função realizar trabalhos mecânicos. O aparelho locomotor é constituído por músculos e pelo esqueleto. A locomoção, por sua vez, é o conjunto de movimentos dos membros do cão, onde um dos membros suporta o peso do corpo quando é elevado do solo para depois reassumir a posição inicial; o alinhamento da postura é dado pela região dorsal e lombar influenciando na biomecânica do cão. Adicionalmente, o modo de andar do animal pode ser dividido em simétrico e o assimétrico. O simétrico é o trote e passo, onde os movimentos feitos por um lado do corpo que imitam os movimentos do lado oposto e, o modo assimétrico, é o galope rotativo e transversal que é o caso contrário do simétrico. Por último, o conjunto dos movimentos ao caminhar é suportado por dois ou três membros e, no trote, é suportado por dois membros em pares diagonais. (Bastian, 2013).

A biomecânica estuda o funcionamento dos sistemas biológicos do corpo humano e animal principalmente a ortopedia focada nas articulações. Para conhecer o comportamento biomecânico das articulações é utilizado o método dos elementos finitos (FEM) devido à flexibilidade com que se pode simular diferentes movimentos. Na área da veterinária, estabelecem-se as condições principais para a elaboração de uma prótese ou órtese, de acordo com o caso de estudo, a quais devem ser resistentes para suportar o peso do animal, ter as medidas exatas de acordo com a anatomia do animal, e além disso apresentar peso mínimo, a fim de possibilitar que animal se mova de maneira correta. (Dalmolin et al, 2013).

Segundo (Barbara, 2006), anteriormente, próteses eram produzidas com base em padrões antropomórficos fornecidos pelos fabricantes. No entanto, há sempre os pacientes que fogem da escala padrão. A aplicação das tecnologias de engenharia reversa e manufatura aditiva possibilita a fabricação de próteses sob medida, que se encaixam com precisão às necessidades do usuário, a um custo razoável. Da mesma maneira que essas tecnologias auxiliam seres humanos, o mesmo conceito pode ser expandido para a fabricação de próteses para animais de estimação. Em média, 35% dos animais de estimação terão deficiências físicas durante sua vida. Este fato, aliado ao crescimento do mercado pet oferece uma ótima oportunidade.

Para determinar a viabilidade dos modelos obtidos por meio da manufatura aditiva é possível realizar uma simulação usando o método dos elementos finitos. Este método de cálculo está baseado na divisão dos elementos discretos de uma estrutura, utilizando diferentes conexões entre cada elemento, gerando um sistema de equações tendo em conta as variáveis estabelecidas de acordo com o processo de estudo, estas equações são resolvidas numericamente. O método também é usado em matemática nodal para resolver equações diferenciais em forma numérica. As subdivisões geradas para a estrutura são chamadas de elementos e as conexões por ponto são chamadas de nodos (Michaleris, 2014).

3. Desenvolvimento

Na avaliação e atendimento do animal, o procedimento começa no hospital veterinário, onde o animal deve ser examinado para detectar qual a sua condição e assim determinar o processo necessário para recuperar sua saúde. Estes quadros de perda de membros podem ser decorrentes de diferentes causas como, por exemplo, malformações congênitas ou acidentes e doenças que prejudicam as extremidades do cão que alteram o uso normal dos membros para o desenvolvimento de sua vida cotidiana. Dependendo do diagnóstico e da gravidade da situação, surge a necessidade de usar uma órtese ou uma prótese para recuperar a qualidade de vida do animal.

Na hora de realizar o design de uma órtese ou uma prótese, foram levados em consideração alguns pontos para garantir que o dispositivo melhorasse efetivamente a qualidade de vida do animal. Um dos principais pontos é a anatomia da raça do caso sendo estudado, levando em conta também a cinemática de sua marcha. Além disso, um fator muito importante é o peso do dispositivo, que deve ser próximo ao peso normal do seu membro.

Depois disso, é necessário considerar a distribuição do peso total de um quadrúpede. No caso de cães de pequeno porte, os membros posteriores suportam o 40% do peso total e os membros anteriores 60%, ou seja, cada membro posterior será responsável por suportar 30% do peso do animal e cada membro anterior responsável por 20%. Com isso em mente, é possível avaliar o design da prótese por meio do método de elementos finitos para verificar se sua resistência mecânica está em conformidade com os parâmetros estabelecidos pelos veterinários.

Neste estudo de caso foi avaliada a criação de uma prótese para uma cadela da raça York Shire pesando 5 quilogramas e com 8 anos de idade que sofreu uma amputação transradial causada por reabsorção óssea. Inicialmente, a cadela foi apresentada com uma fratura no raio do membro anterior esquerdo e, devido a um procedimento errado na cirurgia, originou-se a reabsorção óssea supracitada. Dada a gravidade da infecção, a restauração do osso não foi bem-sucedida e foi necessária a realização de uma amputação. As imagens ilustrativas deste caso podem ser visualizadas na figura 3.



Figura 3-Estudo de caso

O design da prótese foi trabalhado no software Rhinoceros®, o qual, está baseado na tecnologia 3D NURBS. Este tipo de modelagem está fundamentada em B-splines racionais não uniformes, que são representações matemáticas de geometria tridimensionais capacitadas para reproduzir qualquer forma com exatidão, gerando desenhos 2D, círculos, arcos, curva, complexos sólidos ou superfícies orgânicas de formas livres em 3D (Gregolin, Zavaglia, Tokimatsu e Pereira, 2014). As considerações para o design da prótese foram determinadas de acordo com a biomecânica da cadela, a fim de restaurar o membro amputado e permitir sua funcionalidade; da mesma maneira, a prótese foi projetada para ter a resistência mecânica necessária para suportar o peso total da cadela sem apresentar rachaduras ou fratura. Além de isso, o peso é uma parte fundamental na hora de obter uma prótese, sendo o mais leve possível em função do peso do animal. O modelo obtido no software Rhinoceros®, pode ser observado na figura 4



Figura 4- Design da prótese no software Rhinoceros

Depois de obter o design do modelo da prótese, foi executado uma análise estática de cargas externas, por meio do método dos elementos finitos usando o software SolidWorks®. A análise começa com a seleção do material. Neste caso foi selecionado o ABS (acrilonitrila butadieno estireno), por este material atender às características necessárias. O software SolidWorks® tem em seus bancos de dados as propriedades dos diferentes materiais que podem ser usados na hora de realizar uma simulação. As propriedades fornecidas pelo software podem ser observadas na tabela 1.

Propiedades	Valor	Unidades
Densidade de masa	1020	Kg/m ³
Límite de tração	30	N/mm ²
condutividade térmica	0,2256	W/(m.K)
ñcalor específico	1386	J/(Kg.K)
Modulo elástico	2000	N/mm ²
Coeficiente de Poisson	0,394	N/D
Módulo de corte	318,9	N/mm ²

Tabela 1- Propriedades do material polimérico ABS

Em seguida, foi feita a análise de cargas estáticas para a geometria importada no software, considerando uma parte fixa da geometria com uma carga externa de pressão por elemento com um valor de 25 N/mm². Posteriormente, foi gerada a malha de acordo aos parâmetros fornecidos pelo software SolidWorks® para a geometria desenhada da prótese. Na tabela 2 pode-se observar as considerações estabelecidas para gerar a malha da geometria.

Tipo de malha	Malha Sólida
Malha usada	Malha baseada na curvatura
Pontos jacobinos	4 pontos
Tamanho máximo do elemento	2,08301 mm
Tamanho mínimo do elemento	0,10415 mm
Qualidade de malha	Elementos quadráticos de alta ordem
Número total de nós	457362
Número total de elementos	289937
Proporção máxima	421.45
% de elementos cuja proporção é <3	98.7
% de elementos cuja taxa de proporção é > 10	0.0779

Tabela 2 - parâmetros de malha

Na figura 5, podem ser observados os resultados da malha na geometria do objeto, de acordo com os parâmetros estabelecidos acima.

Nome do modelo: Solidsoft

Nome de estudo: Análise estático (padrão)

Tipo de Malha: Malha sólida



Figura 5- Malha de geometria

As tensões no material foram determinadas para estabelecer a pressão máxima que o design da prótese poderia suportar antes de sofrer uma deformação, e assim definir se a prótese poderia ser utilizada pela cadela e suportar as cargas dinâmicas a que estariam submetidas quando ela desenvolvesse suas atividades normais. Na tabela 3 podem ser observados os parâmetros que foram utilizados para executar a análise de cargas estáticas.

Propiedades de estudo	
Nome de estudo	Análise estático 1
Tipo de análise	Análise estático
Tipo de malha	Malha sólida
opção térmica	incluem cargas térmicas
temperatura de tensão zero	298 Kelvin
Tipo de Solver	FFEPlus
Sistema de unidades	Métrico
Pressão / tensão	N/mm^2
Valor	$25 N/mm^2$
Força de reação resultante (N)	2,33217

Tabela 3- Parâmetros de estudo

O processo de impressão foi realizado na impressora Gtmax que possui o software Markerbot, onde é possível estabelecer os parâmetros de impressão do modelo. Neste caso os parâmetros foram baseados nas exigências dos professores do Hospital Veterinário da Universidade Federal de Minas Gerais. A prótese foi impressa com um preenchimento de 30%, tipo de trajetória octogonal, espessura da camada de 0,3 mm, a relação de velocidade e precisão em 50% cada.

O modelo da prótese no software Markerbot pode ser visualizado na figura 6, onde é possível observar os suportes desenhados pelo software. A técnica utilizada para a impressão foi a modelagem de deposição fundida (FDM). O filamento do material utilizado tem uma espessura de aproximadamente 1,25mm,

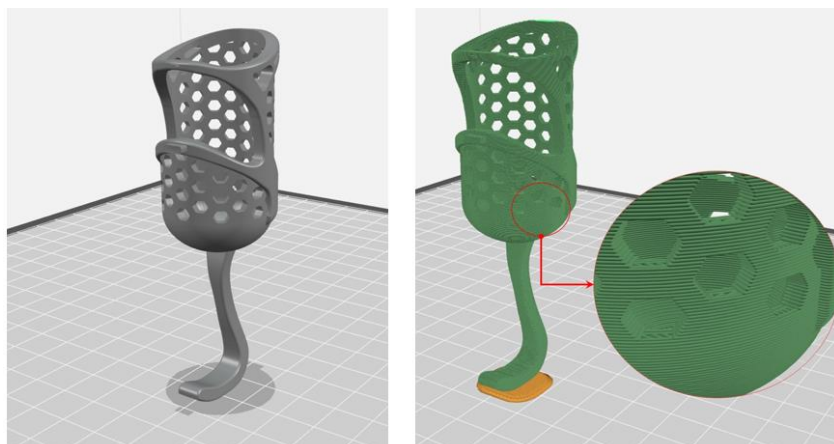


Figura 6- Prótese no software Markerbot e suportes gerados para impressão 3D

4. Resultados

Na Figura 7, é possível observar o resultado obtido na análise de cargas estáticas executado no software SolidWorks®, de acordo aos parâmetros estabelecidos. O resultado obtido determina que a pressão de 25 N/mm^2 pode ser suportada sem que ocorra deformação na prótese. Este resultado garante que a resistência necessária quando considerados o peso do animal e a dinâmica que o cão pode exercer sobre a prótese sejam atendidos. Pode-se observar também na Figura 7, a localização da maior concentração de tensões apresentada.

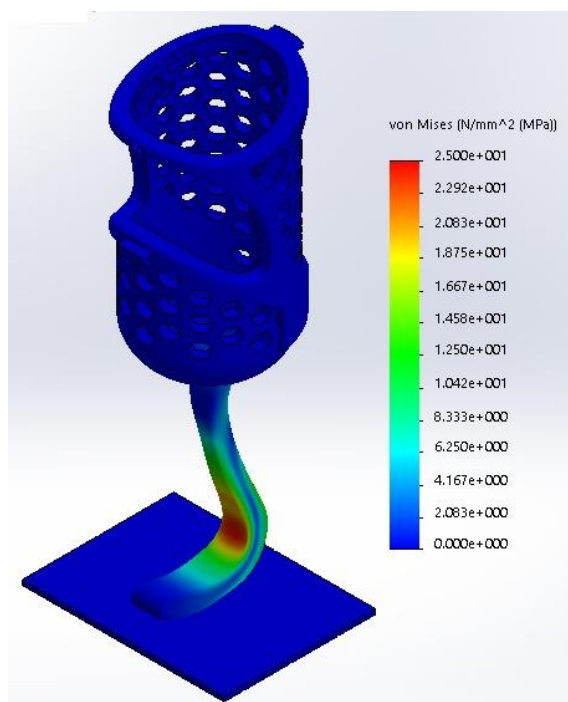


Figura 7 - Resultado do análise

O peso final da prótese foi de 7 gramas, sendo ideal para que o cão possa desenvolver os movimentos simétrico e assimétrico corretamente sem gerar esforços desnecessários. Além disso, as dimensões da prótese foram as indicadas de acordo com as medidas do corpo real do animal. O tempo total de impressão foi de 1 hora e 12 minutos. Foram gastos 7,12 gramas de material. O resultado da prótese pode ser visualizado na figura 8.



Figura 8 - Prótese impressa

5. Considerações Finais

Uma vez apresentado o modelo de prótese aos especialistas do caso clínico, pôde-se observar que este desenho foi o adequado para o animal, por apresentar as medidas exatas e os requisitos estabelecidos pelos médicos veterinários. Além disso, o material ABS determinado para a impressão do modelo foi o adequado considerando sua resistência aos possíveis esforços que o animal pode exercer durante o uso normal da prótese. Adicionalmente, os parâmetros estabelecidos para a impressão do modelo foram os suficientes para a obtenção de uma prótese leve, sendo este um dos requisitos mais importantes. O desenho elaborado para a prótese pode ser modificado diante de novos casos clínicos que possuam diferentes requerimentos e especificidades já que o software Rhinoceros®, utilizado para modelagem, permite ajustes do modelo por meio de pontos de controle em função das medidas relevantes dos pacientes.

Referencias

- DALMOLIN ET AL.** (2013). *Biomecânica óssea e ensaios biomecânicos - fundamentos teóricos*. Ciência Rural.
- BARBARA, S.** (2006). *Processamento de imagens médicas tomográficas para modelagem virtual e física-o software invensalius*.
- BASTIAN, N.** (2013). *Distribuição de força estática em cães com membros amputados*. Fonte: DISTRIBUIÇÃO DE FORÇA ESTÁTICA EM CÃES COM MEMBROS AMPUTADOS .
- BIKAS, H. STAVROPOULOS, P., & CHRYSSOLOURIS, G.** (2015). *Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 389-405.
- GREGOLIN, ZAVAGLIA, TOKIMATSU E PEREIRA.** (2014). *Geração de imagem tridimensional biomecânica para desenvolvimento de projetos de implantes personalizados em liga de titânio*. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais .
- MICHALERIS, P.** (2014). *Modeling metal deposition in heat transfer analyses of additive manufacturing processes*. Elsevier B.V. .
- MINETOLA E EYERS.** (2017). *Energy and cost assessment of 3D printed mobile case covers*. ELSEVIER.
- TORABI, FARJOOD E HAMEDANI.** (2015). *Rapid Prototyping Technologies and their Applications in Prosthodontics, a Review of Literature* . J Dent Shiraz Univ Med Sci, 1-9.
- VOLPATO, N.** (2007). *Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações*. Edgard Blücher.
- ZAHERA, M.** (2012). *La fabricación aditiva, tecnologia avanzada para el diseño y desarrollo de productos*.