

**UFRRJ
INSTITUTO DE VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEDICINA
VETERINÁRIA**

DISSERTAÇÃO

**Estudo da viabilidade técnica da customização por
impressão tridimensional de placa metálica e método de
fixação: aplicação em fratura de úmero de gavião-carijó
(*Rupornis magnirostris*)**

Clarice Gonring Corrêa

2017



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEDICINA
VETERINÁRIA (PATOLOGIA E CIÊNCIAS CLÍNICAS)**

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DA CUSTOMIZAÇÃO POR
IMPRESSÃO TRIDIMENSIONAL DE PLACA METÁLICA E MÉTODO
DE FIXAÇÃO: APLICAÇÃO EM FRATURA DE ÚMERO DE GAVIÃO-
CARIJÓ (*Rupornis magnirostris*)**

CLARICE GONRING CORRÊA

Sob a Orientação da Professora
Marta Fernanda Albuquerque da Silva

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Programa de Pós-Graduação em Medicina Veterinária, Área de Concentração em Ciências Clínicas.

Seropédica, RJ
Agosto de 2017

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C824e Corrêa, Clarice Gonring, 1987-
 Estudo da viabilidade técnica da customização por
impressão tridimensional de placa metálica e método
de fixação: aplicação em fratura de úmero de gavião
carijó (Rupornis magnirostris) / Clarice Gonring
Corrêa. - 2017.
 53 f.: il.

 Orientadora: Marta Fernanda Albuquerque da Silva.
 Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal Rural
do Rio de Janeiro, Programa de pós-graduação em
medicina veterinária, 2017.

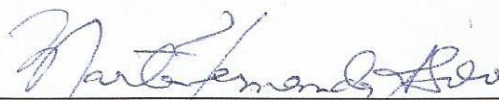
 1. Ave. 2. Osteossíntese. 3. Manufatura
aditiva. 4. Ossos longos. I. da Silva, Marta
Fernanda
Albuquerque, 1962-, orient. II Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de pós-
graduação em medicina veterinária III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEDICINA VETERINÁRIA

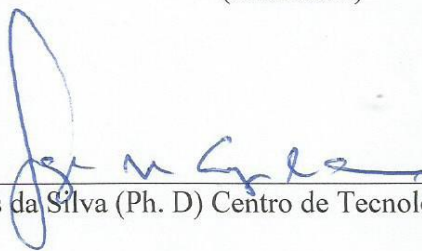
CLARICE GONRING CORRÊA

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Programa de Pós-Graduação em Medicina Veterinária, área de Concentração em Ciências Clínicas.

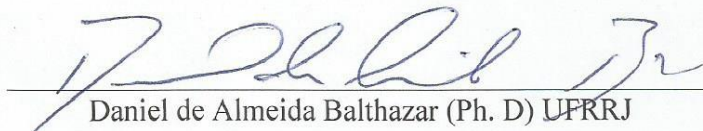
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 30/08/2017



Marta Fernanda Albuquerque da Silva (Ph. D) UFRRJ
(orientador)



Jorge Vicente Lopes da Silva (Ph. D) Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer



Daniel de Almeida Balthazar (Ph. D) UFRRJ

DEDICATÓRIA

À minha amada avó, Maria Schiffler Gonring, que sentia muito orgulho ao falar de mim e da minha profissão, mas que infelizmente não pôde acompanhar de perto minhas pequenas conquistas. A ela, minha gratidão e meu amor. Tenho certeza que mesmo em outro plano está torcendo para que meu caminho seja brilhante.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Hister Gonring e Alexandre Oliveira, e à minha irmã, Mônica Gonring, por terem me apoiado e investido na minha carreira por tantos anos. À minha irmã e ao meu cunhado, Gladson Dalmonech, pelo incentivo na carreira acadêmica e horas de conversas apreciando as melhores cervejas. Agradeço à minha mãe pelas inúmeras ligações e palavras de conforto, pela amizade e pelos esforços inimagináveis. Agradeço, nos dez anos em que estou distante, por me amar e aguentar todos os momentos difíceis comigo. A toda minha família agradeço as palavras de motivação, apoio e almoços de domingo que aguardavam a minha ida para casa.

Aos meus amigos da pós-graduação, obrigada pelas angústias compartilhadas. Finalmente conseguimos terminar mais essa jornada. Camila Magalhães, Ana Paula Reis, Jorge Gabriel, Juliana Macedo e Carla Caroline, espero que vocês continuem ao meu lado sempre.

Ao “quarteto nada fantástico”, vocês tornaram meu último ano na Rural incrível. Sentirei saudades.

Aos meus amigos da Rural, obrigada pela companhia e carinho.

Aos amigos Daniel Paiva, Rhudson Vilarinho e Bárbara Senra pelo tempo disponibilizado nas correções e ao meu querido Tio Irmo pela paciência na correção final.

Ao meu amigo Ricardo Negri, o engenheiro mais veterinário que eu conheço, pelo apoio e força nos momentos difíceis. Obrigada por tantos anos de amizade, paciência e ajuda em todo o entendimento desse mundo complexo da engenharia.

Ao CRV imagem, Alex Adeodato e Taís Guimarães, pelos exames tomográficos.

Aos médicos veterinários Daniel Marchesi (CETAS, Ibama - RJ), Renan Alves (Clínica Hamaludu - RJ), Nathália Murolo e professor Carlos Roberto Teixeira (CEMPAS, Unesp Botucatu - SP), Jefferson Pires (CRAS, Unesa - RJ) e Daniel Balthazar (Rio Zoo/ UFRRJ) pela colaboração em responder ao questionário.

Ao CTI Renato Archer, especialmente Jorge Vicente Lopes da Silva, pelo grande apoio e confiança no meu projeto. Foi ótimo trabalhar com vocês.

Aos professores Alexandre Miguel Nascimento e Renata Nunes Oliveira pela ajuda nos ensaios biomecânicos; ao professor Paulo Odemar Scherer pela disponibilidade dos estudos anatômicos e ao professor Daniel de Almeida Balthazar pela ideia e ajuda no desenvolvimento deste projeto.

Para a nossa “mamãe Marta”, minha orientadora, líder, exigente, paciente e teimosa, porque acredita em nós muitas vezes mais do que nós mesmas. Agradeço eternamente por estar em minha vida e ser profissionalmente e pessoalmente uma grande referência.

Por fim, obrigada a todos que de pouquinho em pouquinho me ajudaram a construir e concluir mais uma etapa (por sinal, bem difícil) da minha vida.

RESUMO

CORRÊA, Clarice Gonring. **Estudo da viabilidade técnica da customização por impressão tridimensional de placa metálica e método de fixação: aplicação em fratura de úmero de gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*)** 2017. Dissertação (mestrado em medicina veterinária, patologia e ciências clínicas). Instituto de Veterinária, Departamento de Medicina e Cirurgia Veterinária, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2017.

As aves são os animais silvestres mais atendidos nas clínicas veterinárias e os mais frequentemente recebidos nos centros de triagens e zoológicos, provenientes de ações policiais de resgate e contra o tráfico. Entre as afecções mais frequentes encontram-se as fraturas de ossos pneumáticos, desafiadoras para qualquer cirurgião devido ao grande canal medular e corticais ósseas finas e quebradiças, que não suportam muito bem os implantes. Na rotina clínica de pequenos animais existem alternativas tanto clássicas quanto inovadoras para resolução de fraturas, no entanto, ainda não há no mercado implantes produzidos especificamente para aves. Desta forma, são necessárias mais pesquisas sobre as técnicas cirúrgicas e a produção de implantes que atendam às características dos ossos das aves, permitindo o retorno funcional precoce do membro afetado. Nesse contexto, utilizando-se relatos de literatura e questionários, dos quais foram coletados dados de profissionais atuantes na área de clínica e cirurgia de animais selvagens, definiu-se a região médio-distal do úmero como local de grande relevância na ocorrência de fraturas e que, além das particularidades ósseas das aves, apresenta também características anatômicas peculiares que dificultam a osteossíntese. Uma placa de liga de titânio foi produzida por manufatura aditiva, com fixação por cerclagem e hemicerclagem. A partir da imagem tomográfica de um animal formolizado foi realizada a impressão da estrutura óssea da asa da ave, o que permitiu a obtenção de um estudo anatômico mais aprofundado e conferiu praticidade à fase inicial do planejamento do implante (por diminuir o número de cadáveres necessários para o estudo, permitir o deslocamento e manipulação do modelo sem a necessidade de cuidados específicos de conservação e reduzir o risco de contaminação química e biológica). Estudo anatômico em cadáver foi realizado permitindo uma correta visualização dos tecidos moles adjacentes, como nervos, tendões e musculatura, servindo para definição do acesso cirúrgico. O implante, desenvolvido em programa de CAD (*computer aided design*) e impresso com tecnologia tridimensional (tecnicamente conhecida como manufatura aditiva), em metal, foi testado em cadáveres da espécie escolhida e sua resistência avaliada com teste biomecânico. A placa desenvolvida é leve, de material resistente, biocompatível e apresentou boa justaposição ao osso. Na aplicação da hemicerclagem e cerclagem a presença dos sulcos facilitou a fixação da placa ao osso, promovendo estabilidade na posição do fio após o aperto do nó, sendo comprovado com exame radiográfico realizado após aplicação da placa final onde foi evidenciado alinhamento e justaposição dos fragmentos da fratura. Nos ensaios biomecânicos exibiu bons resultados, sendo a carga máxima suportada pelo conjunto osso, placa e fios de aço de aproximadamente dez vezes maior do que a carga suportada pelo osso íntegro. A dificuldade de utilização de placas em úmero de aves está associada à inadequação dos implantes fabricados, adaptados de cães e gatos, e a impressão 3D permitiu o desenvolvimento de um implante leve, com grande ajuste ao osso e com fixação por fio de aço, superando as atuais dificuldades da aplicação de placas em úmero de aves.

Palavras-chave: ave, osteossíntese, manufatura aditiva, ossos longos

ABSTRACT

CORRÊA, Clarice Gonring. **Technical viability study on customized metallic 3D printed plate and its fixation method: practical application on hawk's humerus fracture (*Rupornis magnirostris*)** 2017. Dissertação (Master Degree in Veterinary Medicine, Pathology). Instituto de Veterinária, Departamento de Medicina e Cirurgia Veterinária, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2017.

Birds are the wild animals most attended at veterinary clinics and also the more frequently received at the wild animal sorting centers and zoological centers, coming from rescue and against wildlife trade police actions. Among the most frequent affections are pneumatic bone fractures, challenging for any surgeon due to the large medullary canal and fine and brittle bone cortices that do not support implants very well. In the clinical routine of small animals there are alternatives both classic and innovative for resolution of fractures, however, there aren't still on the market implants produced specifically for birds. Thus, more research is needed on surgical techniques and the production of implants that meet the characteristics of the bones of the birds, allowing the early functional return of the affected limb. In this context, using literature reports and questionnaires, from which data were collected from professionals working in the area of wildlife clinic and surgery, the mid-distal humerus region was defined as a site of great relevance in the occurrence of fractures and that in addition to the bone characteristics of birds, also has unique anatomical features that make it difficult to osteosynthesis. A titanium alloy plate was produced by additive manufacture, with fixation by cerclage and hemi cerclage. From the tomographic image of a formulated animal, the bone structure of the bird's wing was printed, which allowed for a deeper anatomical study and gave practicality to the initial planning phase of the implant (by reducing the number of cadavers needed for the study, allow the model to be moved and manipulated without the need for specific conservation care and reduce the risk of chemical and biological contamination). Anatomical study on cadaver was performed allowing a correct visualization of the adjacent soft tissues, such as nerves, tendons and musculature, serving to define the surgical access. The implant, developed in computer-aided design (CAD) and printed with three-dimensional technology (technically known as additive manufacture) in metal, was tested on cadavers of the chosen species and its resistance evaluated with biomechanical test. The developed plate is light, made of resistant material, biocompatible and presented good juxtaposition to the bone. In the application of the hemi cerclage and cerclage the presence of the grooves facilitated the fixation of the plaque to the bone, promoting stability in the position of the wire after the tie tightening, being proved with radiographic examination performed after application of the final plate, where it was evidenced the alignment and juxtaposition of the fragments of the fracture. In the biomechanical tests it showed good results, the maximum load being supported by bone, plate and steel wires approximately ten times larger than the load supported by intact bone. The difficulty of using humerus plates is associated with the inadequacy of the implants manufactured, adapted from dogs and cats, and the 3D printing allowed the development of a light implant, with great adjustment to the bone and fixation by steel wire, overcoming the current difficulties in the application of humerus plates to birds.

Key words: bird, osteosynthesis, additive manufacturing, long bones

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA..... | 3 |
| 2.1 Fraturas em aves | 3 |
| 2.2 Tratamento das fraturas em aves | 3 |
| 2.3 Uso do titânio como biomaterial | 5 |
| 2.4 Prototipagem rápida na medicina | 5 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS | 8 |
| 3.1 Definição da localização da fratura | 8 |
| 3.2 Planejamento dos implantes | 8 |
| 3.2.1 Animais..... | 8 |
| 3.2.2 Definição das características gerais do implante | 8 |
| 3.2.3 Determinação do formato, dimensões e local de aplicação do implante | 8 |
| 3.2.3.1 Prototipagem do membro torácico de gavião-carijó..... | 8 |
| 3.2.3.2 Estudo anatômico em cadáver | 9 |
| 3.2.3.3 Planejamento virtual, produção e avaliação do modelo-teste..... | 13 |
| 3.3 Avaliação do modelo final da placa de titânio | 16 |
| 3.3.1 Aplicação da placa de titânio em fratura experimental no cadáver | 16 |
| 3.3.2 Exame radiográfico..... | 19 |
| 3.3.3 Preparo das peças para avaliação do ajuste placa-osso e teste biomecânico | 19 |
| 3.3.4 Avaliação do ajuste placa-osso | 20 |
| 3.3.5 Ensaio biomecânico | 20 |
| 3.3.5.1 Ensaio do osso..... | 22 |
| 3.3.5.2 Ensaio do osso fraturado estabilizado por placa e fio de aço | 23 |
| 3.3.5.3 Ensaio da placa de titânio, alumínio e vanádio..... | 24 |
| 4 RESULTADOS | 25 |
| 4.1 Questionários | 25 |
| 4.2 Planejamento do implante | 25 |
| 4.3 Exame radiográfico..... | 26 |
| 4.4 Ajuste placa-osso | 26 |
| 4.5 Ensaio de flexão em três pontos | 28 |
| 4.5.1 Ensaio do osso | 28 |
| 4.5.2 Ensaio do osso fraturado estabilizado por placa e fio de aço | 30 |
| 4.5.3 Ensaio da placa de titânio, alumínio e vanádio..... | 32 |
| 4.6 Comparação dos três ensaios..... | 33 |
| 5 DISCUSSÃO | 35 |
| 6 CONCLUSÕES..... | 39 |
| 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 40 |
| 8 ANEXO..... | 46 |
| Anexo 1 – Respostas ao questionário sobre rotina de atendimento de aves | 46 |

1 INTRODUÇÃO

É crescente a demanda do atendimento de aves pelos médicos veterinários, nos centros de triagem e zoológicos bem como em hospitais e consultórios veterinários. Além da criação “pet”, as aves de “vida livre” são frequentes nos centros de triagem e zoológicos. Aquelas advindas do tráfico e de resgates (rodovias e incêndios, por exemplo) são recolhidas por órgãos governamentais e entregues a centros de reabilitação, porém, devido a graves danos muitas vezes não possuem condições de retorno à natureza. Quanto antes ocorrer a intervenção, para os devidos cuidados, maiores são as chances de reabilitação, soltura e sobrevivência, evitando-se também que ocorra o *imprinting*, relação de socialização entre animais silvestres e humanos, indesejável aos animais destinados à soltura. Com o aumento nos atendimentos a estes animais houve a necessidade de avanços nas pesquisas abordando anatomia, fisiologia e patologia.

O gavião-carijó, *Rupornis magnirostris*, é de grande abundância na fauna brasileira; habita campos abertos, bordas de matas e áreas urbanizadas, sendo bastante comum e bem adaptado aos impactos ambientais e, portanto, grande vítima do tráfico, da perda de habitat e frequente em resgates de áreas de incêndio, zonas urbanas e rodovias. É espécie de aparecimento comum nos centros de reabilitação, usualmente acometida por fraturas em membros.

Dentre as afecções mais comuns e desafiadoras em aves as fraturas destacam-se pelo difícil tratamento e risco de restrição à movimentação adequada dos animais. A correção precisa das fraturas em aves é de extrema importância, principalmente quando o osso em questão for pneumático e em animais destinados à soltura. Estes ossos, como úmero e fêmur, possuem um fator complicador por terem características de auxiliarem na respiração, conferirem leveza ao animal (auxiliando no voo) e ajudarem na termorregulação. As fraturas de úmero ocorrem com frequência em aves e sua anatomia diferenciada, com presença de diversos processos anatômicos, dificulta sobremaneira os procedimentos de fixação cirúrgica. Existem diversas técnicas para correção de fraturas umerais, porém com resultados pouco satisfatórios, o que normalmente resulta em prejuízo ao voo.

Na rotina de pequenos animais, como cão e gato, existem alternativas tanto clássicas quanto inovadoras para resolução de fraturas de membro, e o uso de placas é o método que, sabidamente, confere a recuperação mais rápida, com retorno precoce da função. No entanto, ainda não há placas, nem qualquer outro tipo de implante comercial produzido especificamente para aves. Desta forma, são necessárias pesquisas sobre as técnicas cirúrgicas e a produção de implantes que atendam às características dos ossos das aves, permitindo o retorno funcional precoce do membro afetado.

O uso das ferramentas tecnológicas atuais, como programas de CAD (*Computer Aided Design*), tomografias e impressoras tridimensionais, vem possibilitando grandes avanços na área médica, permitindo o estudo aprofundado de doenças e a resolução mais simples para problemas de grande importância e dificuldade.

A impressão tridimensional a partir de imagens tomográficas ou de ressonância magnética tem sido usada na geração de modelos para estudos anatômicos, planejamento terapêutico e ensino, entre outros. Na medicina de animais selvagens a variação entre as diversas espécies tratadas é enorme, e a quantidade de indivíduos disponíveis em cada espécie é geralmente reduzida, ocasionando, em muitas situações, dificuldade no conhecimento de particularidades dos animais e, conseqüentemente, no desenvolvimento de métodos e produtos para o tratamento das doenças. Nesse contexto é bastante claro o benefício potencial da tecnologia tridimensional, uma vez que permite obter informações que podem ser manejadas virtualmente, replicadas inúmeras vezes e servirem de base para o

desenvolvimento de recursos terapêuticos. Na medicina veterinária em geral é ainda incipiente o uso da tecnologia tridimensional, e o seu maior desenvolvimento pode vir a resolver diversos problemas que apresentam, no momento, grandes limitações.

O presente trabalho teve como objetivos identificar as fraturas mais frequentes em aves e desenvolver uma placa metálica com método alternativo de fixação, pela técnica de manufatura aditiva (impressão tridimensional) com base em imagens tomográficas ósseas, tendo como modelo o gavião-carijó, avaliando sua aplicabilidade por meio de testes em cadáveres e ensaios biomecânicos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Fraturas em Aves

As aves são extremamente abundantes na natureza, sendo grande alvo de acidentes que podem levar a traumas graves, muitas vezes com a presença de fraturas. Segundo Westfall e Egger (1979), são os animais silvestres mais comercializados e mantidos como “pet”. Entre as causas mais comuns de acidentes encontram-se as colisões em janelas e ventiladores de teto e ataques de outros animais (HELMER; REDIG, 2006). A ocorrência de fraturas nos animais traumatizados é alta e em alguns casos necessitam de maiores cuidados até a estabilização e correção cirúrgica (MARTIN; RITCHIE, 1994).

Fraturas em aves são desafiadoras para qualquer cirurgião. A estabilização com fios intramedulares exige uma carga excessiva de peso para o preenchimento do grande canal medular, e corticais ósseas finas e quebradiças (devido à alta densidade óssea de cálcio) não suportam muito bem os implantes (BENNETT; KUZMA, 1992). Fraturas em ossos longos são as mais comuns, sendo o úmero e o tibiotarso os ossos mais acometidos (BUSH, 1977).

O úmero é um osso pneumático, característico por auxiliar na respiração, conferir leveza ao animal (auxiliando no voo) e ajudar na termorregulação. Quando fraturado pode levar a enfisema subcutâneo, com frequência resolvido espontaneamente em poucos dias. Em casos mais graves, na presença de infecção, pode levar à aerossaculite e pneumonia devido à comunicação do osso, pelo forame pneumático na sua extremidade proximal, com o saco aéreo clavicular, que se comunica com o saco aéreo torácico-cranial e o pulmão ipsilateral (WISSMAN, 1999).

A anatomia helicoidal e a presença de diversos processos anatômicos tornam o úmero objeto de estudo de grande importância. As fraturas tendem a ser fragmentadas e, pelo fato de as extremidades distais dos ossos possuírem pouco suporte de tecido mole, coberto apenas por pele e tendões, os fragmentos muitas vezes se separam e perdem a irrigação sanguínea; por isso também é comum ocorrerem fraturas abertas e, ainda, a característica quebradiça das corticais ósseas é um fator contribuinte para o grande índice de fraturas iatrogênicas causadas durante o reparo cirúrgico (BENNETT; KUZMA, 1992).

As fraturas acontecem com maior frequência em terço médio da diáfise e em epífise distal principalmente pela pouca cobertura muscular nessas áreas. Possuem bom prognóstico se houver mínima lesão muscular, do suprimento sanguíneo ou não comprometimento do nervo radial (MACCOY, 1992).

2.2 Tratamento das Fraturas em Aves

A correção de fraturas em aves deve seguir os mesmos princípios utilizados para mamíferos: fixação rígida, bom alinhamento e aposição da fratura, ausência de infecção e retorno precoce do membro acometido à sua função. As forças mecânicas que atuam no foco da fratura devem ser neutralizadas pelo implante (BUSH, 1977; HELMER; REDIG, 2006). Voar impõe grande momento de torção aos ossos das asas (DE MARGERIE et al, 2005), fator que deve ser levado em consideração na escolha do implante, assim como a tração exercida pelo músculo peitoral ao úmero (ALIEVI, 1998).

A cicatrização óssea nas aves ocorre principalmente de forma secundária porque os métodos de fixação dificilmente promovem ótima estabilidade da fratura, com ótimo alinhamento e aproximação dos fragmentos (BENNETT, 1992). Wissman (1999) afirma que ossos pneumáticos, especialmente o úmero, consolidam-se em tempo menor do que os demais ossos. Independentemente da técnica empregada, alguns passos devem ser obedecidos para aumentar a chance de sucesso no reparo das fraturas em aves. De acordo com Martin e Ritchie (1994), feridas infectadas e contaminadas devem ser tratadas, e o tecido mole adjacente

preservado; a rotação e o alinhamento de fraturas devem ser controlados (YAMAZOE et al., 1994) e luxações reduzidas; o foco de fratura deve ser imobilizado e a amplitude de movimento em todas as articulações envolvidas na fratura ou pela técnica de fixação, mantida; o membro afetado deve retornar para sua função normal o mais breve possível (MARTIN; RITCHIE, 1994).

Westfall e Egger relataram, em 1979, a falta de materiais produzidos especificamente para aves, o que torna o trabalho muitas vezes dificultoso e improvisado. Na busca de literatura para o presente estudo não foi encontrado nenhum aparato desenvolvido especificamente para aves até o presente momento. Diversos métodos, adaptados de pequenos animais e humanos, têm sido testados nas últimas décadas com o objetivo de melhor corrigir fraturas em aves. Yamazoe et al. (1994) utilizaram polimetilmetacrilato no canal medular com e sem fixação por placa de neutralização em fraturas umerais de pombos, observando refraturas e não retorno ao voo na maioria dos animais. Tranquilim et al. (2007) fizeram uso de haste plástica (êmbolo de seringa de 1 ml) intramedular na osteossíntese de úmero de tucano. Após trinta dias o animal apresentava reação periosteal e desvio do eixo ósseo; com sessenta dias retornou ao seu local de origem não tendo sido avaliada função de voo. Alievi et al. (2008) aplicaram pino intramedular com polimetilmetacrilato em úmero de pombo doméstico (quatro grupos com variações na utilização de pinos intramedulares lisos e com rosca, com e sem polimetilmetacrilato). Observaram alta taxa de migração dos pinos, com bons resultados apenas na associação de pino com rosca e polimetilmetacrilato. Bolson et al. (2008) associaram pino ósseo homólogo, confeccionado a partir da região de tibiotarso de pombos saudáveis, conservado em glicerina a 98%, à hemicerclagem com fio poliglactina 910 na osteossíntese umeral transversa de pombos domésticos, relatando ter obtido boa cicatrização óssea e retorno da função de voo.

Entre as técnicas mais convencionais, Rocha et al. (2009) fizeram uso de pino intramedular com três fios de cerclagem na osteossíntese de úmero distal de papagaio, obtendo boa cicatrização óssea e retorno funcional do membro afetado. Dalmolin et al. (2007) utilizaram dois tipos de fixador externo modificado para correção de fratura umeral diafisária de pombos obtendo recuperação da atividade de voo dos animais em ambos os grupos. Placas de osteossíntese vêm sendo empregadas com resultados variáveis. Christen et al. (2005) aplicaram miniplacas maxilofaciais para estabilização de ulna e pino intramedular em rádio em fraturas experimentais de ulna de pombos, resultando em falha da placa óssea na maioria dos animais. Sá et al. (2012) fizeram uso de placa neutra e parafusos disponíveis no mercado para cães e gatos para correção de fratura de tibiotarso de ganso; para complementar o método, evitando o deslizamento dos parafusos, fios de cerclagem foram passados entre os parafusos. O animal recuperou a completa função do membro, não conseguindo a responsável identificá-lo no bando. Gouvêa et al. (2011) utilizaram microplacas humanas de titânio, comumente empregadas em cirurgias maxilofaciais, na correção de fraturas de tibiotarso em pombos, apresentando como maior complicação o envergamento da placa, mas mantendo a deambulação satisfatória dos animais. Dal-Bó et al. (2011) aplicaram miniplaca humana de titânio para osteossíntese de tibiotarso em Arara Canindé, com alinhamento satisfatório do membro e seu retorno funcional. Gull et al. (2012) fizeram uso de miniplacas humanas para estabilização da ulna, após fratura experimental de rádio e ulna em pombos, obtendo retorno da função de voo apenas em um dos três grupos utilizados.

Ferraz (2008) descreveu, dentre as técnicas mais empregadas para a correção de fraturas em aves, vantagens e desvantagens da aplicação de cada uma delas. Fixadores de Kirshner e Ehmer podem causar fissuras nas corticais finas das aves, com consequente migração dos pinos e hastes; também não devem ser usados em fraturas próximas às articulações, nem em fraturas altamente cominutivas. Fixadores externos possuem boa

aplicação para feridas contaminadas, promovem baixa destruição do suprimento sanguíneo e são mais adequados para aves de médio e grande porte (BUSH, 1977).

Talas e pinos podem apresentar bons resultados em aves de pequeno porte. Nas aves de grande porte podem dificultar ou impedir o movimento da articulação, levar à necessidade de imobilização prolongada, formação de hematomas e de calo ósseo exuberante, resultando em aderências musculares, atrofia e anquilose da articulação (BUSH, 1977; MARTIN; RITCHIE, 1994). Além de necessitarem de métodos adicionais como cerclagens ou talas, pinos intramedulares podem se tornar pesados demais devido ao grande canal medular de alguns ossos, como o úmero, podendo prejudicar ou evitar a formação de calo ósseo intramedular (WITHROW, 1982). A metafise óssea das aves possui pouca densidade óssea, dificultando boa ancoragem dos pinos (WEST et al., 1996).

Entre os métodos de fixação, as placas promovem maior estabilidade óssea e possibilitam o retorno precoce do membro às suas funções. Facilitam o manejo pós-operatório, por não necessitarem de maiores cuidados com curativos e ainda agem opondo-se aos momentos de torção e flexão e às forças de compressão e cisalhamento que atuam no foco da fratura (DAVIDSON et al., 2005).

As bandagens tendem a ser volumosas e pesadas e, por isso, seu uso para reparação de fraturas é limitado. Exigem imobilização prolongada das articulações e geralmente resultam em um alinhamento fraco dos fragmentos de fratura. No entanto, podem ser consideradas se o retorno completo do membro para função não for necessário, se a fratura for patológica (resultante de doenças ósseas metabólicas) ou o risco cirúrgico ou anestésico for muito grande (HELMER; REDIG, 2006).

2.3 Uso do Titânio como Biomaterial

Titânio puro e suas ligas possuem grande uso para aplicações biomédicas e estão entre as mais utilizadas para a fabricação de implantes ortopédicos (NIINOMI, 1998; SHAH et al., 2016). Os elementos de liga alteram as propriedades mecânicas do titânio utilizado isoladamente, tornando-as melhores. O alumínio e o vanádio contribuem para uma melhora na resistência mecânica do implante em relação ao titânio comercialmente puro. (ELIAS et al., 2008).

A liga Ti-6Al-4V (titânio, alumínio e vanádio) tem sido muito empregada na área médica para implantes não permanentes devido ao poder tóxico da liberação de alumínio e vanádio (CORRÊA et al., 2017; ELIAS et al., 2008). As ligas de titânio possuem alta resistência mecânica, biocompatibilidade (ELIAS et al., 2008; SHAH et al., 2016) e resistência à corrosão (CORRÊA et al., 2017).

2.4 Impressão 3D na Medicina

A medicina tem ganhado auxílio na resolução de diversos problemas com o avanço vertiginoso da tecnologia. Os rápidos avanços nas tecnologias computadorizadas, impulsionados principalmente pelas demandas da indústria, vêm criando novas possibilidades inimagináveis; a explosão de conhecimento científico tem levado a técnicas de imagem surpreendentes, com alta qualidade e definição (MCGURK et al., 1997). A biomodelagem, replicação da morfologia de uma estrutura biológica em um modelo físico, é utilizada para diagnóstico e planejamento cirúrgico no aprimoramento das resoluções de afecções complexas. É uma tecnologia inovadora resultante da associação entre medicina e engenharia, somando-se tecnologias de aquisição de imagens médicas, computação gráfica e manufatura aditiva (NASCIMENTO, 2006). É empregada em áreas como: neurocirurgia, ortopedia, reconstrução craniofacial, cirurgias bucomaxilofaciais e para reprodução geométrica de partes do corpo humano (MCGURK et al., 1997).

O termo manufatura aditiva designa um conjunto de tecnologias utilizadas para fabricar objetos físicos por meio de camadas planas, diretamente a partir de programas de CAD. Considerado um método de extrema eficiência por dispensar ferramentas e moldes, o processo é feito em uma única operação (OLIVEIRA, 2013). A criação do protótipo rápido diminui o tempo de desenvolvimento de um produto e minimiza problemas de engenharia relativos às montagens.

Os biomodelos são criados a partir de uma imagem tomográfica ou de ressonância magnética que pode ser modelada e corrigida através de um software. Ainda, objetos para manufatura podem ser criados diretamente em um programa de CAD, que permite que os modelos tridimensionais (modelos virtuais) de estruturas segmentadas possam ser manipulados e simulados dentro deste ambiente. Em seguida, as imagens são convertidas em um formato aceito pela impressora tridimensional, sendo possível a criação de um protótipo final, o modelo físico (GOUVEIA, 2009; VOLPATO et al., 2017).

O processo de modelagem é muito preciso, podendo ocorrer erros relativos às imagens tomográficas quando cortes maiores do que 0,1 mm estão presentes. Essa tecnologia se aplica muito bem aos procedimentos ortopédicos, possibilitando ao cirurgião se planejar melhor em uma deformidade congênita complexa, em procedimentos reconstrutivos traumáticos ou em uma cirurgia articular; permite que o procedimento cirúrgico possa ser planejado com precisão. Cortes de osteotomia podem ser praticados no modelo, e placas e próteses podem ser moldadas sob medida para cada paciente (MCGURK et al., 1997).

Assim como na medicina, na medicina veterinária técnicas de manufatura aditiva têm sido utilizadas, ainda que de forma incipiente, com os mesmos propósitos: no planejamento cirúrgico, na clínica (auxiliando diagnósticos) e nas instituições de ensino, como modelos didáticos (HESPEL et al., 2014). No planejamento e produção de implantes com utilização de manufatura aditiva, Freitas et al. (2011; 2012) e Goes (2016) produziram, entre alguns exemplos, órtese para gavião e placas ortopédicas para cães e coelhos. No auxílio ao diagnóstico e tratamento, Castilho (2014) e Bordelo (2015) empregaram a manufatura aditiva no planejamento cirúrgico ortopédico de cães atendidos em suas rotinas. Ainda, Freitas et al. (2010) se beneficiaram dessa tecnologia para o tratamento de uma má formação maxilofacial em uma raposa do campo. Simão e Melo (2015) e Saragiotto et al. (2016) utilizaram a manufatura aditiva para a impressão de modelos anatômicos no auxílio ao ensino da anatomia veterinária. Respectivamente, fabricaram modelos tridimensionais do sistema nervoso de ovinos e ossos de equinos. Na experimentação animal visando ao desenvolvimento de métodos terapêuticos para humanos, Li et al. e Zopf et al. (2014) utilizaram a manufatura aditiva, respectivamente, na impressão de um pulmão para a avaliação de complicações tardias de pneumectomia (em modelo experimental de cão) e na produção de modelos porosos de orelha e nariz para reconstrução cartilaginosa em porcos.

A escolha da impressora é feita a partir do tipo de material que se deseja trabalhar, o tipo de implante e a espécie escolhida para trabalho. Entre os diversos materiais disponíveis, encontram-se como mais utilizados os metais, os polímeros e cerâmicas (BERMAN, 2011). As impressoras tridimensionais utilizam diversos tipos de tecnologias de acordo com os processos de manufatura aditiva (VOLPATO et al., 2017). Fuller et al. (2014) citam que a metodologia de produção do objeto envolve a adição de material camada por camada e que este processo pode ser realizado com diversos materiais. Um dos métodos utiliza a modelagem por fusão e deposição (*fused deposition modeling* - FDM), na qual um bico aquecido expulsa um fino filamento de material termoplástico em fusão que é resfriado em seguida. Quando se utiliza metal como matéria bruta o processo necessita ainda de aplicação de energia para que ocorra a fusão; para isso, utiliza-se um feixe de elétrons para a fusão (*electron beam melting* - EBM) que irá transformar o pó de metal em sólido; outra forma é a sinterização seletiva a laser (*selective laser sintering* - SLS), em que o princípio de

funcionamento é dado pela construção de objetos tridimensionais por meio de materiais pulverizados, assim como termoplásticos e metais. As impressoras possuem um recipiente com o material em pó, que é solidificado camada por camada por meio de um laser seletivo (VOLPATO et al., 2017).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Definição da Localização da Fratura

Devido à escassez de informações e com o objetivo de melhor conhecer a rotina de atendimento de aves, um questionário foi desenvolvido e enviado para as seguintes instituições: Centro de Triagem de Animais Silvestres (CETAS, Ibama - Seropédica - RJ); Centro de Medicina e Pesquisa em Animais Selvagens (CEMPAS, UNESP Botucatu - SP); Hamadulu Cuidados Veterinários (Rio de Janeiro - RJ); Centro de Recuperação de Animais Silvestres (CRAS, UNESA - Rio de Janeiro - RJ) e Fundação Jardim Zoológico da Cidade do Rio de Janeiro (Rio de Janeiro - RJ). O questionário, de caráter qualitativo, constou das seguintes perguntas abertas:

- 1) Entre as afecções atendidas em aves, qual a frequência aproximada das fraturas?
- 2) Quais as estruturas ósseas e localização (proximal, média ou distal) mais comuns de fraturas apendiculares em pequenas aves na sua rotina? Se possível, estime o percentual de ocorrência para cada localização e o tipo de fratura mais comum (simples, cominutiva, oblíqua).

3.2 Planejamento do Implante

3.2.1 Animais

Foram obtidos seis cadáveres de animais da espécie *Rupornis magnirostris*, nome vulgar gavião-carijó, formolizados, oriundos da Fundação Jardim Zoológico, localizado no parque da Quinta da Boa Vista - Rio de Janeiro.

3.2.2 Definição das características gerais do implante

Com base na avaliação das respostas ao questionário (item 3.1) e nos relatos da literatura definiu-se a região médio-distal do úmero para localização da fratura. Foram considerados os seguintes aspectos para o planejamento do implante:

- Característica do úmero como osso pneumático, com cortical delgada.
- Dificuldade de introdução e fixação de parafusos na cortical óssea de aves devido à sua reduzida espessura e plasticidade, com alto risco de fraturas iatrogênicas.

Foram definidas as formas de fixação da placa ortopédica por cerclagem e hemicerclagem, apoiadas em sulcos e perfurações, com composição em titânio, alumínio e vanádio (Ti-6Al-4V).

3.2.3 Determinação do formato, dimensões e local de aplicação do implante

3.2.3.1 Reprodução do membro torácico de gavião-carijó

Obteve-se um modelo por reprodução da asa do gavião-carijó para o planejamento inicial do implante, buscando-se praticidade de manipulação para o estudo anatômico e planejamento da placa.

Para produção do modelo foi preliminarmente obtida a imagem tomográfica de um cadáver no Centro de Referência Veterinária, CRV Imagem, Rio de Janeiro – RJ, na máquina helicoidal single-slice (GE[®], Hi speed LXi, General Electric Company, Milwaukee, WI) com aquisição helicoidal e cortes transversais de 0,1mm.

As imagens foram salvas em arquivos do tipo *digital imaging and communication in medicine* – DICOM e enviadas através de “File Transfer Protocol” – FTP (Protocolo de Transferência de Arquivos, método rápido de transferência) – ao Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer, Campinas - São Paulo.

As imagens em formato DICOM, provenientes do exame tomográfico, foram editadas, e o modelo virtual do úmero mensurado e corrigido por meio de um software gratuito,

InVesalius, desenvolvido no CTI Renato Archer, e salvos em formato *stereolithography* - “.stl”, aceito pela impressora tridimensional, sendo possível a criação de um modelo final.

O modelo do membro torácico foi produzido no CTI Renato Archer, na impressora HiQ (3D Systems[®]), pelo processo de Sinterização Seletiva a Laser (SLS) em material poliamida branco na forma de pó (Figuras 1 e 2).

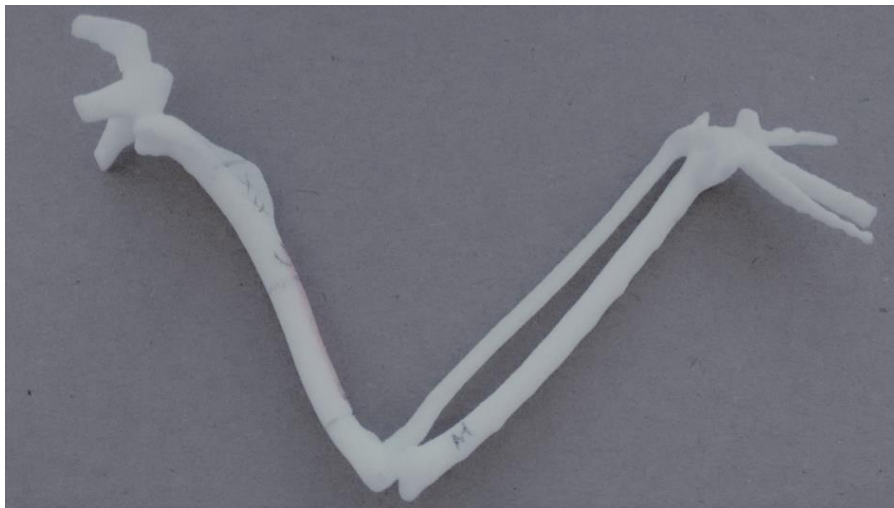


Figura 1: Vista medial da asa de gavião-carijó impressa em poliamida branco para estudo anatômico.



Figura 2: Vista lateral da asa de gavião-carijó impressa em resina poliamida para estudo anatômico.

3.2.3.2 Estudo anatômico em cadáver

Para o estudo anatômico os cadáveres formolizados de gaviões-carijó foram retirados do recipiente com solução de formol 10% e lavados pelo menos quatro horas antes da sua utilização.

Um cadáver de gavião-carijó foi utilizado para estudo anatômico, no qual observaram-se as relações umerais com os tecidos moles adjacentes, permitindo a escolha do acesso cirúrgico e local de aplicação da placa.

Na face lateral da asa (Figura 3) evidenciou-se a presença do nervo radial interpondo-se entre a pele e o úmero, enquanto, na face medial (Figura 4), nenhuma estrutura está localizada entre a pele e o osso, o que levou à escolha desta última como acesso cirúrgico.

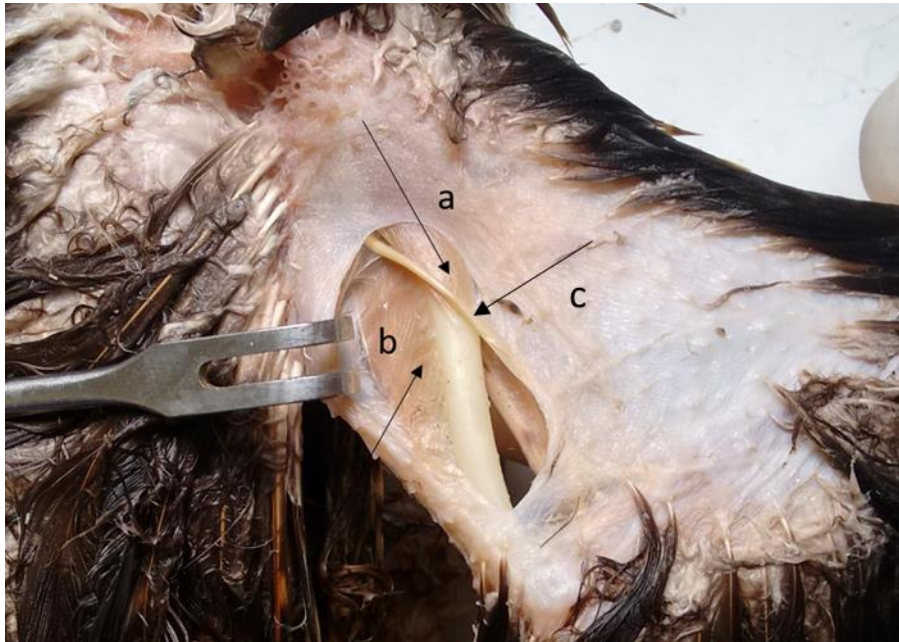


Figura 3: Vista lateral da asa de gavião-carijó evidenciando dificuldade de acesso e de aplicação da placa devido à inserção do músculo deltóide (a), músculo tríceps (b) e nervo radial (c).

A face anteromedial do úmero foi escolhida como local de fixação da placa levando-se em consideração a ausência de fixação muscular e inervação adjacente (Figura 4).

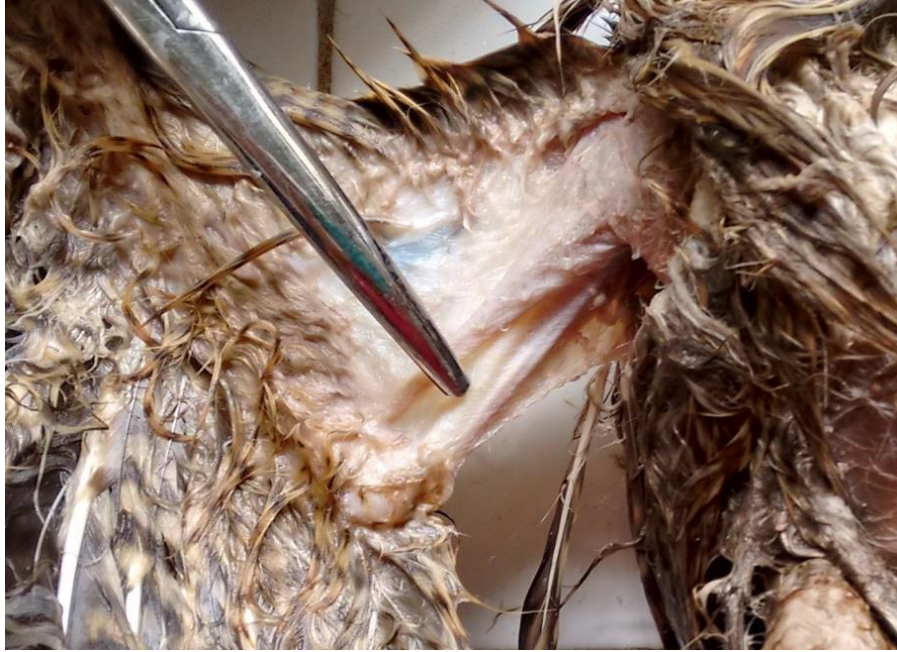


Figura 4: Vista medial da asa de cadáver de gavião-carijó. A tesoura aponta a face anteromedial do úmero, recoberta somente pela pele e tecido celular subcutâneo e livre de fixação muscular.

Avaliação preliminar das dimensões do implante foi realizada com auxílio de molde em papel, confeccionado no momento do estudo após a determinação do acesso e local de aplicação da placa (Figura 5). As dimensões da placa foram definidas da seguinte forma: comprimento de aproximadamente 20 mm, largura 8 mm, divisão em quatro segmentos separados por sulcos e com orifícios distribuídos em linha longitudinal central (em cada sulco e entre eles).

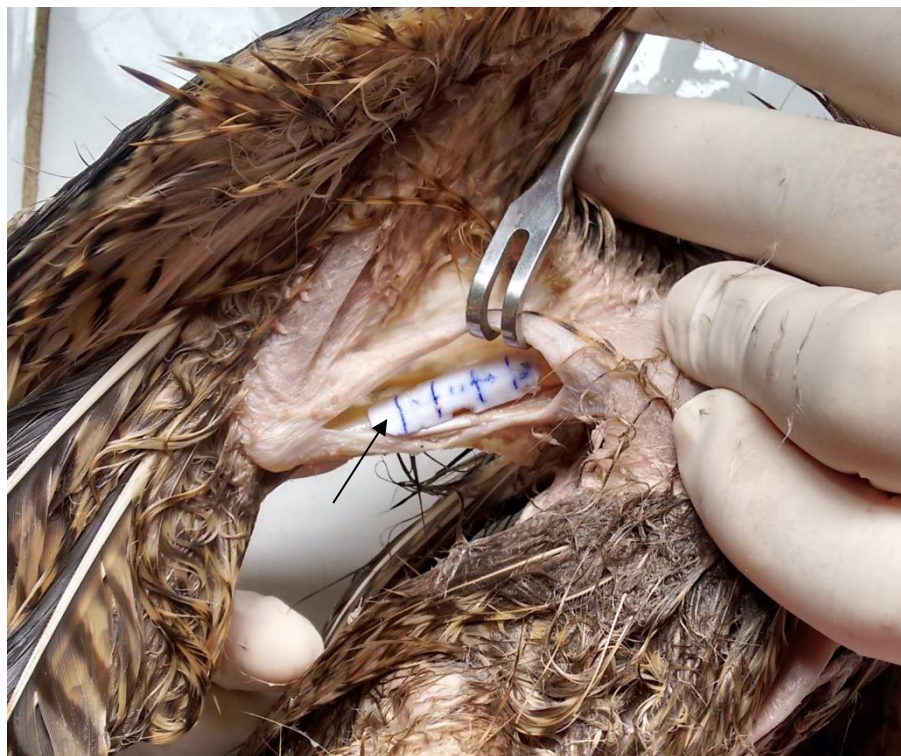


Figura 5: Molde em papel (seta) de placa ortopédica para correção de fratura em úmero de gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*). Estudo anatômico em cadáver.

Para ilustrar o local de implantação e as dimensões da placa uma marcação foi realizada no modelo da asa do gavião-carijó, fotografada (Figura 6), e as imagens enviadas ao CTI Renato Archer.

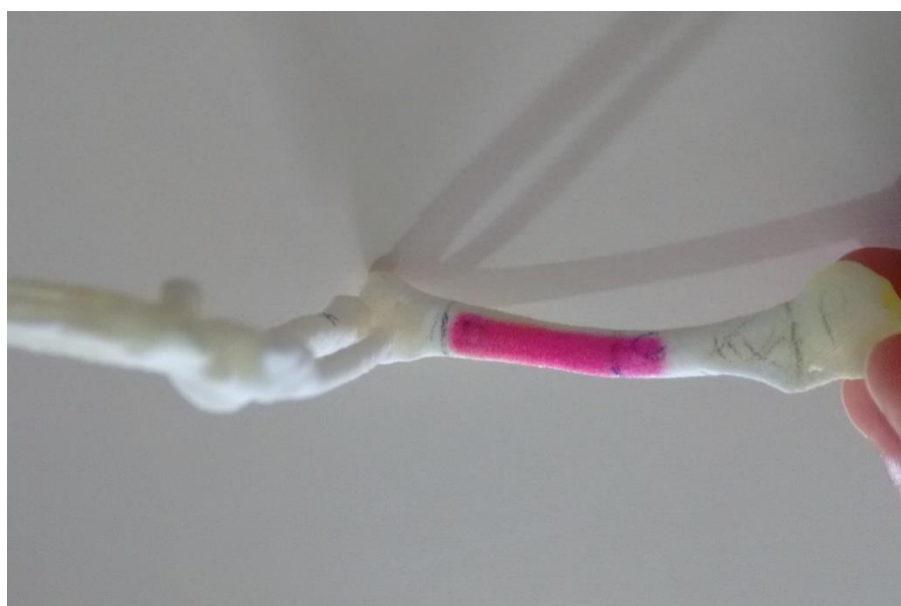


Figura 6: Marcação realizada no modelo da asa de gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*) ilustrando o local de implantação e dimensões de placa ortopédica para fixação de fratura em úmero.

3.2.3.3 Planejamento virtual, produção e avaliação do modelo-teste

O planejamento virtual de um modelo-teste do implante foi realizado no Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer a partir da definição das características gerais do implante, do formato e dimensões obtidos do estudo anatômico.

Determinou-se o modelo de placa com orifícios e sulcos de forma a permitir a fixação por meio de cerclagem e hemicerclagem com fios metálicos, buscando-se diminuir o risco das lesões iatrogênicas provocadas pela fixação por parafuso, método convencional de fixação das placas ósseas.

Com o objetivo de verificar a variabilidade no formato e dimensões do úmero da espécie em estudo, realizou-se exame tomográfico dos seis gaviões-carijó. As imagens tomográficas foram enviadas por Sedex (Serviço de Encomenda Expressa Nacional) ao CTI Renato Archer, e os úmeros esquerdos impressos no equipamento Connex 350 (Stratasys[®]) pelo processo de jateamento de resina fotocurável. O osso de um dos animais apresentava deformidade no terço diafisário distal e foi descartado da análise (Figura 7). Não tendo sido observada variação significativa entre os ossos, uma das imagens tomográficas foi escolhida aleatoriamente para o desenvolvimento virtual do implante.

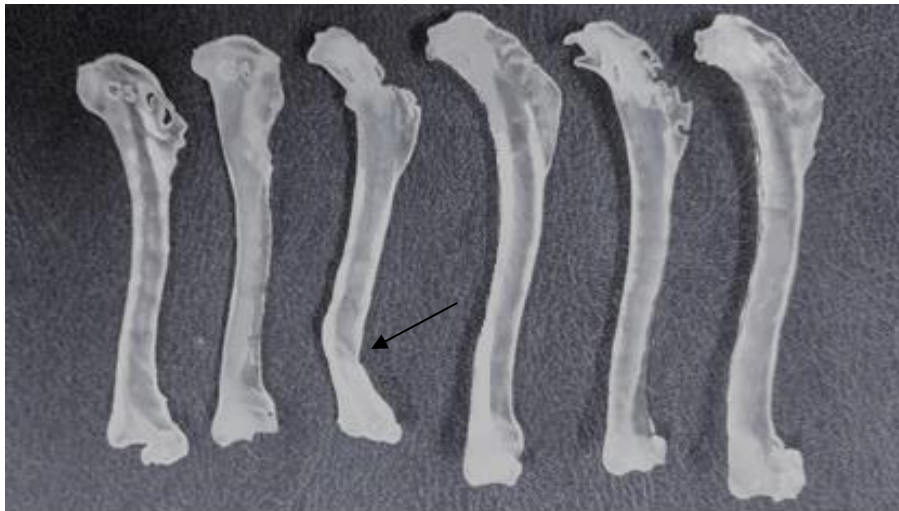


Figura 7: Comparação entre os seis úmeros de gavião-carijó impressos em resina para estudo anatômico. Seta indicando deformidade em região distal de um dos biomodelos.

O modelo planejado foi reproduzido tridimensionalmente (Figuras 8 e 9) em um programa de CAD. Em seguida, o modelo virtual gerou o modelo final da placa impressa em resina.

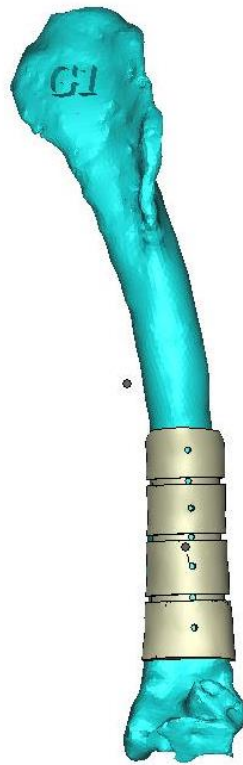


Figura 8: Modelo virtual de placa ortopédica com quatro segmentos para aplicação em fraturas na região médio-distal do úmero de gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*).

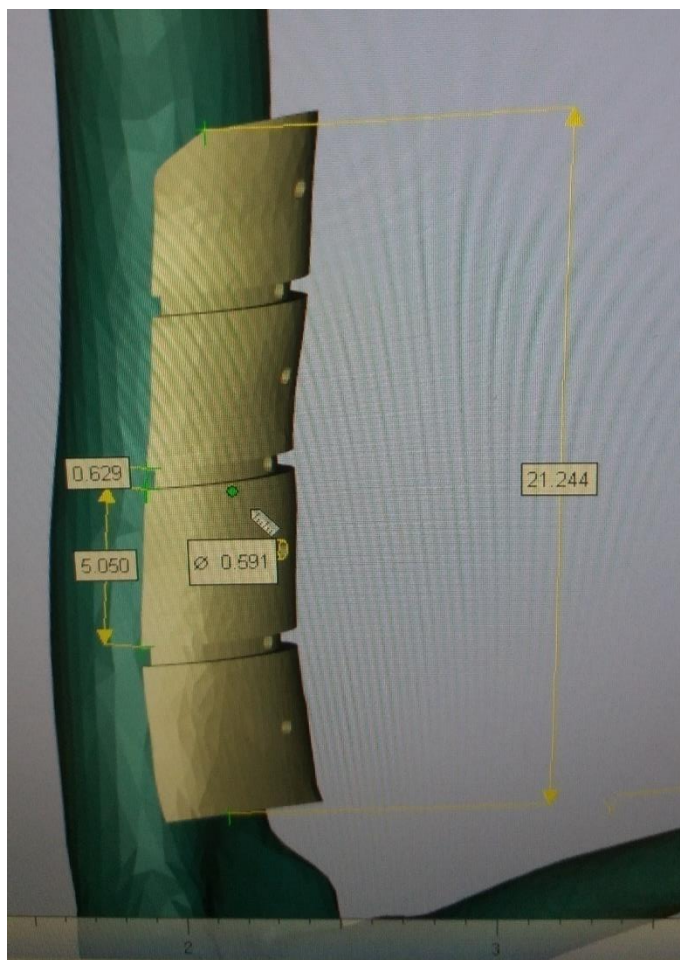


Figura 9: Dimensões do modelo virtual de placa ortopédica com quatro segmentos para aplicação em fraturas na região médio-distal do úmero de gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*).

O primeiro modelo da placa-teste foi impresso também em resina, seguindo o mesmo processo de produção dos modelos dos úmeros, com 21,2 mm de comprimento, 8 mm de largura em sua porção distal e 7 mm de largura em sua porção proximal, 1 mm de espessura, sulcos com 0,62 mm de largura e furos com diâmetro de 0,59 mm.

A justaposição da placa-teste de resina ao formato do osso foi avaliada nos cinco modelos de úmero. Em seguida o implante foi aplicado em cadáver formolizado para possíveis correções e verificação da facilidade de fixação por cerclagem e hemicerclagem (Figuras 10 e 11). De acordo com o diâmetro dos orifícios foi escolhido para fixação o fio de aço 2-0 (Aciflex, Ethicon®). Na aplicação das hemicerclagens utilizou-se perfuratriz com extensão ortopédica em aço inoxidável e mandril de cateter para infusão intravenosa 24 G.



Figura 10: Vista medial da asa esquerda de gavião-carijó. Aplicação de placa-teste em resina para tratamento de fraturas em úmero de gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*) com fixação por cerclagem.

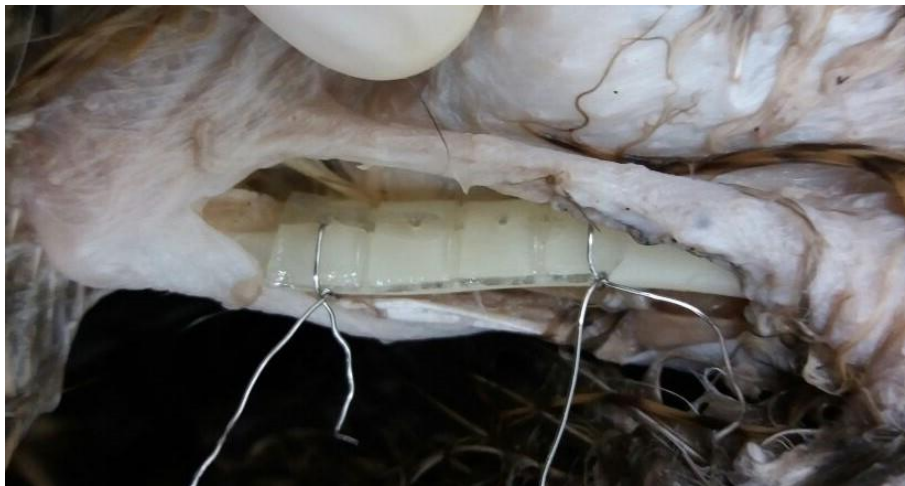


Figura 11: Vista medial da asa esquerda de gavião-carijó. Aplicação de placa-teste em resina para tratamento de fraturas em úmero de gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*) com fixação por hemicerclagem.

Após testes em cadáveres foi observada a necessidade de arredondamento das bordas distais e aumento da placa em um segmento na extremidade proximal (Figura 12).

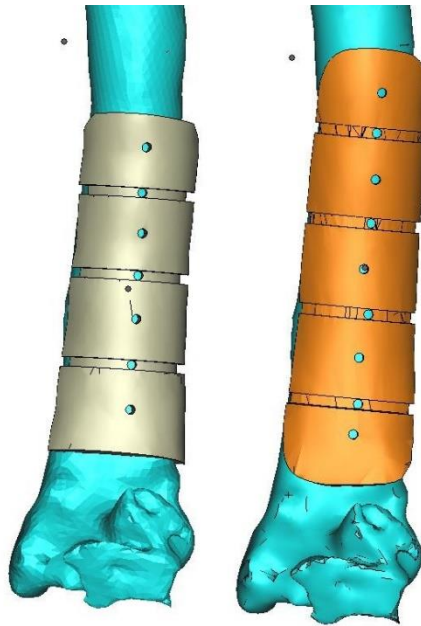


Figura 12: Modelos virtuais de placa ortopédica para tratamento de fraturas em úmero de gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*). À esquerda, modelo preliminar e à direita, modelo ajustado após estudo anatômico em cadáver.

O segundo modelo da placa-teste foi impresso já na liga escolhida para a confecção da placa final (Ti-6Al-4V), utilizando-se a tecnologia de manufatura aditiva baseada na fusão por feixe de elétrons - EBM (Electron Beam Melting), impressora modelo Q10 (Arcam[®]), projetada para fabricação de dispositivos em materiais metálicos. Foi observado que o diâmetro dos furos não permitia a passagem do fio e por isso foi necessária nova correção para a produção do modelo final.

A placa em titânio, com cinco segmentos, foi sobreposta aos cinco protótipos de úmero impressos em resina para avaliar-se a adequação do seu formato aos ossos de diferentes animais.

3.3 Avaliação do Modelo Final da Placa de Titânio

3.3.1 Aplicação da placa de titânio em fratura experimental no cadáver

Após as devidas correções dos modelos os implantes definitivos foram impressos com orifícios de 0,7 mm de diâmetro, 28 mm de comprimento e peso 0,782 g, mantendo-se as dimensões de largura e espessura. Em seguida, implantados em fraturas médio distais, produzidas experimentalmente em úmeros de cadáveres formolizados. A incisão para o acesso cirúrgico medial mediou aproximadamente 29 mm, em região médio-distal do úmero. A placa foi posicionada para conferência do ajuste das dimensões (Figura 13).

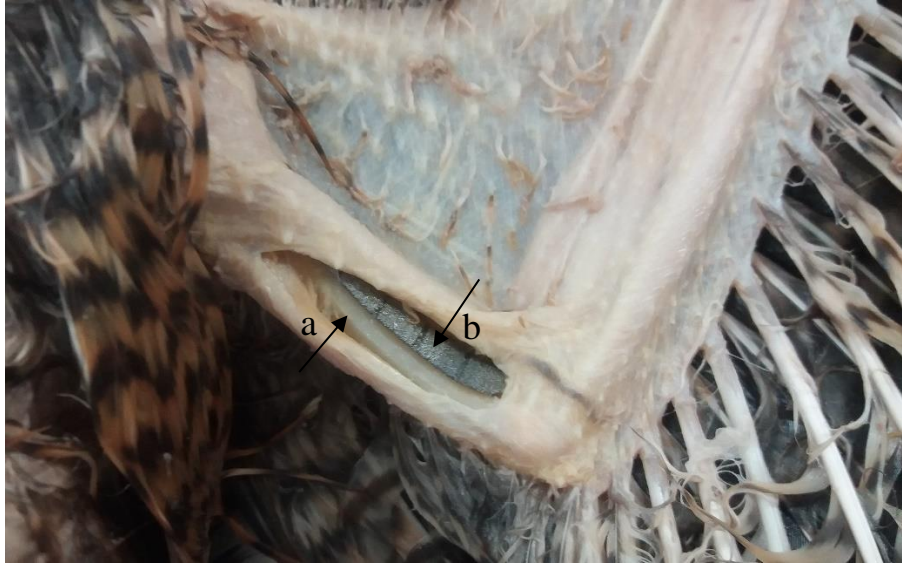


Figura 13: Vista medial da asa de cadáver formolizado de gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*) evidenciando acesso cirúrgico ao úmero (seta a) e o ajuste da placa ortopédica (seta b) impressa em liga de titânio.

A fratura experimental transversa foi produzida com serra protética no ponto médio da região médio-distal do úmero esquerdo (Figura 14) e reduzida com auxílio do afastador de Volkmann (Figura 15). Após posicionamento da placa foram feitas perfurações para hemicerclagem nos fragmentos proximal e distal, envolvendo os orifícios próximos à fratura. A placa foi removida para a passagem do fio de aço no osso, utilizando-se manualmente o mandril do cateter 24 G para facilitar a evidênciação dos furos (Figura 16). Após a passagem do fio nos dois fragmentos a placa foi novamente ajustada e concluídas as hemicerclagens com o aperto dos nós. Em seguida os fios para cerclagem foram posicionados nos sulcos mais distais ao foco da fratura.



Figura 14: Vista medial da asa de gavião-carijó mostrando a produção de fratura experimental em úmero com serra protética em região médio-distal.



Figura 15: Vista medial da asa de cadáver formolizado de gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*) com fratura experimental em úmero (observar a fina espessura da cortical óssea). O afastador de Volkmann foi utilizado para auxílio na redução da fratura.



Figura 16: Vista medial da asa de cadáver formolizado de gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*) evidenciando perfuração do osso realizada com o auxílio do mandril do caterer de infusão intravenosa 24 G.

3.3.2 Exame radiográfico

Após a aplicação da placa ao úmero de cadáver de gavião-carijó fraturado experimentalmente, exame radiográfico foi realizado no Hospital Veterinário de Pequenos Animais da UFRRJ para verificação da fixação do implante.

3.3.3 Preparo das peças para avaliação do ajuste placa-osso e teste biomecânico

Um exemplar de úmero de gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*) contendo fratura transversa, experimentalmente produzida e corrigida com o modelo definitivo de placa impressa em liga de titânio, foi dissecado para a avaliação do ajuste placa-osso e realização do ensaio biomecânico (Figura 17). Um exemplar íntegro de úmero de gavião-carijó também foi dissecado para utilização no ensaio biomecânico.



Figura 17: Osso dissecado da asa de cadáver formolizado de gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*) após fixação da placa metálica para avaliação do ajuste placa-osso e utilização em ensaio de flexão em três pontos.

3.3.4 Avaliação do ajuste placa-osso

O contato do implante com a superfície óssea foi avaliado na peça dissecada, visualmente e por meio da introdução de uma sonda dental exploratória milimetrada ao longo dos bordos da placa fixada ao úmero, mensurando-se a profundidade de introdução da sonda em cada ponto (Figura 18).

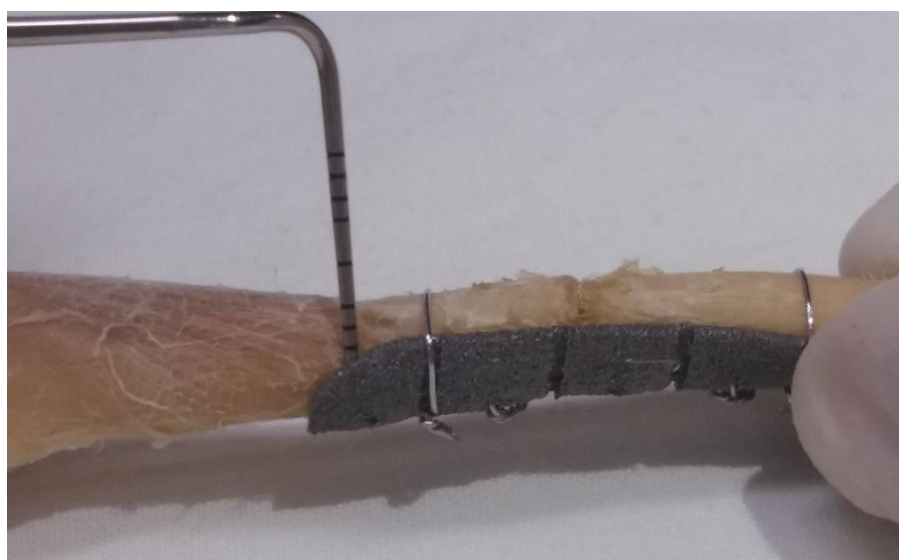


Figura 18: Osso dissecado da asa de cadáver formolizado de gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*) após fixação da placa metálica para avaliação do ajuste placa-osso.

3.3.5 Ensaio biomecânico

Foi realizado ensaio de flexão em três pontos na máquina de ensaio universal (Contenco[®]) utilizando-se célula de carga de 20 kgf para os testes com ossos e célula de carga de 500 kgf para o teste da placa. A flecha, deslocamento vertical do objeto ensaiado em

relação à sua posição inicial sem carga, foi mensurada e comparada entre os testes. Foram ensaiados o osso, o conjunto osso mais placa com fixação por fio de aço e a placa isoladamente. Para os ensaios com ossos foi mantida a mesma distância entre os suportes.

Para o apoio do osso e do conjunto osso mais placa foi necessária a confecção de suporte em madeira, semelhante ao suporte original da máquina (fabricado em aço), com pequenas adaptações para apoiar adequadamente os materiais ensaiados (Figura 19). Para o ensaio da placa o suporte original foi mantido (Figura 20).



Figura 19: Suporte fabricado em madeira apresentando sulco para ajuste do úmero de cadáver formolizado de gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*) para ensaio mecânico de flexão em três pontos.



Figura 20: Ensaio mecânico de flexão em três pontos de placa metálica ortopédica customizada para úmero de cadáver formolizado de gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*), com suporte original da máquina.

Para testar a efetividade da acomodação do osso ao suporte de madeira e calibração da máquina para realização do ensaio e obtenção da flecha foi efetuado teste com réplica do osso em resina (Figura 21).

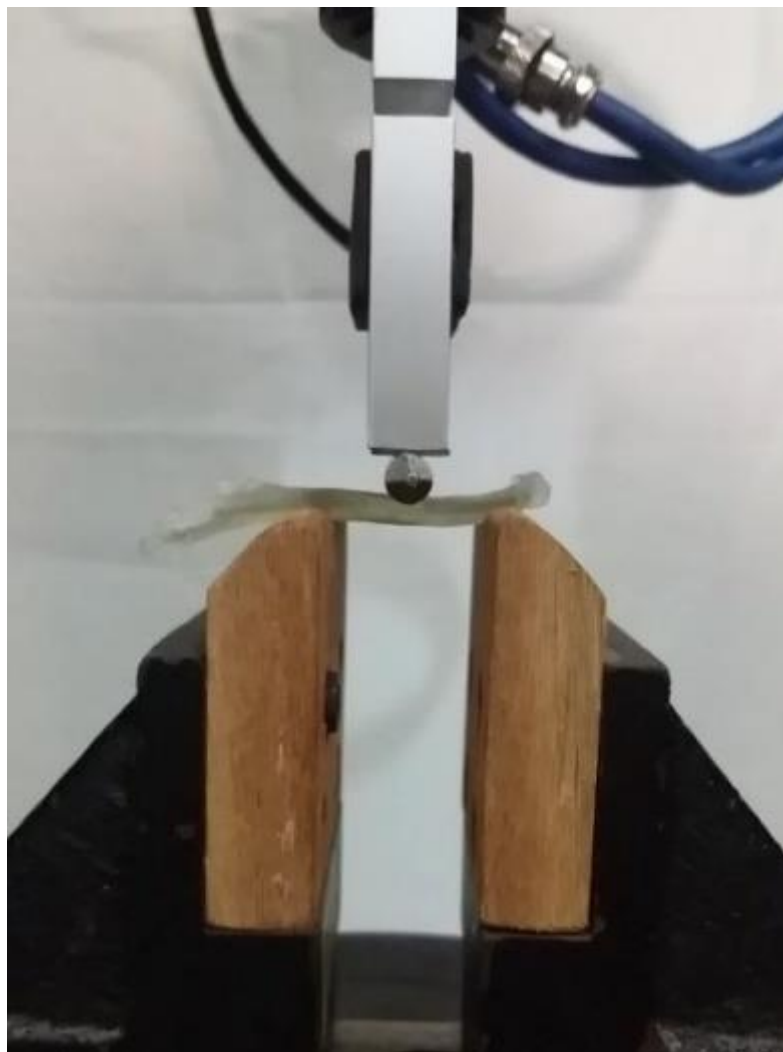


Figura 21: Ensaio de flexão em três pontos no protótipo em resina de úmero de cadáver formolizado de gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*), utilizando suporte de madeira adaptado.

3.3.5.1 Ensaio do osso

O ensaio no úmero foi realizado com célula de carga de 20 kgf com base em valores descritos em ensaio com ossos de ave (LOPES, 2009). Aplicou-se a carga na mesma região em que a fratura experimental foi produzida para o teste de avaliação da placa em titânio - item 3.3.1 (Figura 22).

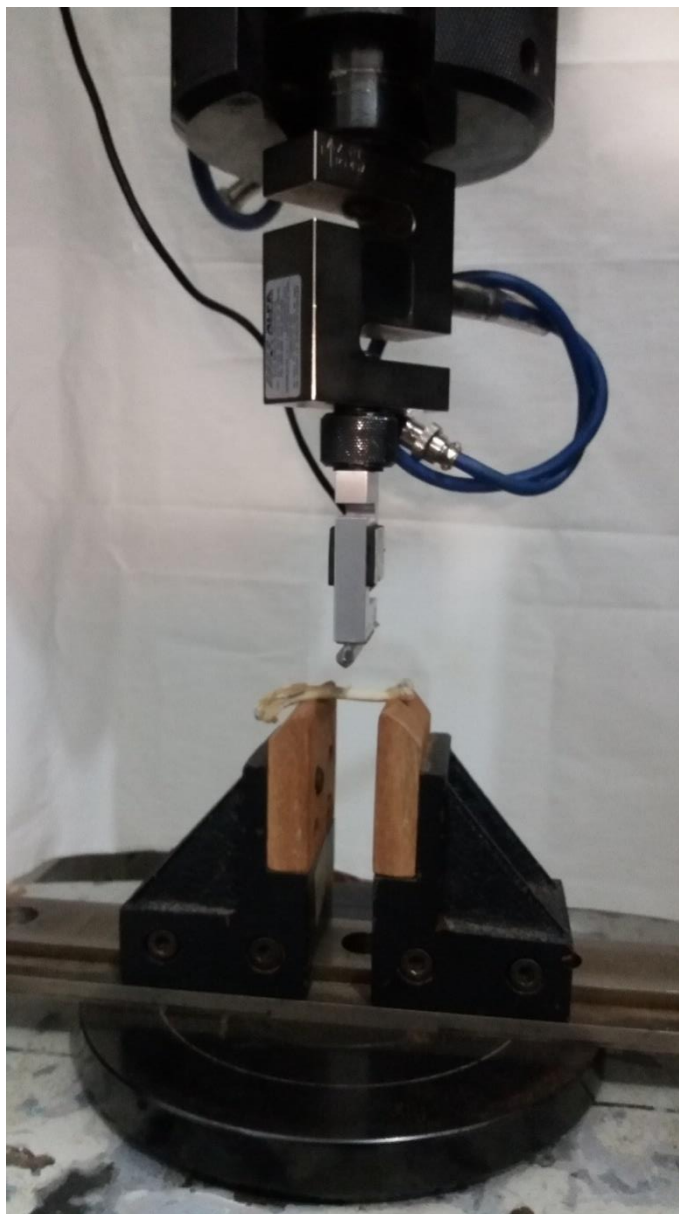


Figura 22: Ensaio de flexão em três pontos no úmero de cadáver formolizado de gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*).

3.3.5.2 Ensaio do osso fraturado estabilizado por placa e fio de aço

Utilizou-se a célula de carga de 20 kgf para ensaio do conjunto osso, placa e fio de aço. A carga foi aplicada sobre a placa na região da fratura experimental (Figura 23), considerada como ponto de maior fragilidade do conjunto.



Figura 23: Ensaio de flexão em três pontos no conjunto osso, placa e cerclagem em úmero de cadáver formolizado de gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*).

3.3.5.3 Ensaio da placa de titânio, alumínio e vanádio

Para o ensaio da placa utilizou-se célula de carga de 500 kgf, aplicada no centro do implante ortopédico (Figura 24).



Figura 24: Ensaio de flexão em três pontos na placa ortopédica impressa em liga de titânio para correção de fraturas médio distais de úmero de gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*).

4 RESULTADOS

4.1 Questionários

As respostas aos questionários estão expostas no Anexo 1.

A análise do questionário distribuído para as cinco instituições mostrou uma grande variação na frequência de fraturas, desde menos de 10% até mais de 50% de casos entre as aves atendidas.

As fraturas em úmero e em rádio e ulna foram citadas em quatro das cinco instituições consultadas, enquanto outros ossos não ultrapassaram duas citações; o úmero foi o osso escolhido para estudo devido às suas particularidades anatômicas que dificultam a correção cirúrgica das fraturas.

A localização da fratura no terço médio é a que mais se destaca nas citações do úmero, tendo sido relatada em três das quatro referências a este osso. Os representantes de três instituições indicaram, cada um deles, um tipo de fratura umeral: cominutiva, oblíqua e espiral.

4.2 Planejamento do Implante

A impressão do protótipo da asa de gavião-carijó em poliamida conferiu praticidade à fase inicial do planejamento do implante por: diminuir o número de cadáveres necessários para o estudo; permitir o deslocamento e manipulação do modelo sem a necessidade de cuidados específicos de conservação; e ainda reduzir o risco de contaminação química e biológica.

A determinação do acesso cirúrgico para aplicação do implante foi adequada em todas as fases do experimento, desde a avaliação preliminar das dimensões em molde de papel até a implantação das placas teste em resina e final em liga de titânio. A quantidade reduzida de estruturas adjacentes ao úmero facilitou a intervenção no campo cirúrgico limitado.

Após realização de estudo comparativo entre os cinco modelos dos úmeros de gaviões-carijó de tamanhos diferentes, impressos em resina, foi possível observar a baixa variabilidade no formato do úmero da espécie em estudo e estabelecer um padrão que permitiu modelo único de implante para a espécie.

O planejamento virtual da placa-teste, com base nas indicações obtidas do estudo anatômico, produziu um implante com alta fidelidade aos propósitos da sua aplicação, principalmente quanto à espessura delgada (1 mm), justaposição à superfície óssea, largura dos sulcos (0,62 mm) e diâmetro dos orifícios (0,59 mm). As dimensões semelhantes dos sulcos e orifícios permitiram a escolha de um único tamanho de fio cirúrgico para a fixação das placas (Aciflex 2-0, Ethicon®), o qual mostrou-se suficientemente resistente em todos os momentos de sua aplicação, sem sofrer quebra durante o aperto do nó.

Não foi encontrada no comércio broca com diâmetro adequado ao dos orifícios da placa e, portanto, vários produtos foram testados para adaptação; o mandril do cateter 24 G para infusão intravenosa apresentou comprimento suficiente para atravessar as duas corticais ósseas, tendo sido então escolhido para a produção das hemicerclagens. A extensão ortopédica adaptada na perfuratriz permitiu a fixação do mandril do cateter, apesar de seu diâmetro reduzido.

Houve grande dificuldade na aplicação da hemicerclagem devido aos seguintes fatores: o fio cirúrgico não foi rígido o suficiente para seguir a direção exata alcançando o furo na cortical oposta à placa, e o amplo canal medular do úmero permitiu o desvio de trajeto do fio entre as corticais ósseas.

Na aplicação da cerclagem a presença dos sulcos facilitou a fixação da placa ao osso, promovendo estabilidade na posição do fio após o aperto do nó.

Com a aplicação da placa-teste de resina em cadáver observou-se a necessidade de ajustes como o arredondamento das extremidades distais e o aumento da placa em um segmento proximal.

O novo modelo-teste impresso na liga de Ti-6Al-4V com correção das dimensões apresentou diâmetro dos furos muito reduzido, que não permitia a passagem do fio e, por isso, não foi possível sua aplicação em cadáver.

Na avaliação da justaposição aos modelos de ossos impressos em resina, as novas dimensões e formato mostraram-se adequados, apesar de ser observado que, devido a uma pequena variação de tamanhos entre os ossos, uma placa com quatro segmentos se adequaria melhor aos ossos de menor tamanho.

4.3 Exame Radiográfico

A radiografia realizada após aplicação da placa final evidenciou alinhamento e justaposição dos fragmentos da fratura. Observou-se na hemicerclagem proximal e na cerclagem distal pequena inclinação em relação ao eixo longitudinal do osso (Figura 25).



Figura 25: Radiografia ventrodorsal de cadáver formolizado de gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*) após aplicação da placa em liga de titânio no úmero esquerdo.

4.4 Ajuste Placa-Osso

A avaliação visual mostrou, em todas as faces do úmero fraturado experimentalmente e fixado com a placa final, que o formato da placa permitiu excelente contato do implante ao osso e estabilidade do posicionamento dos fios de cerclagem e hemicerclagem (Figura 26).

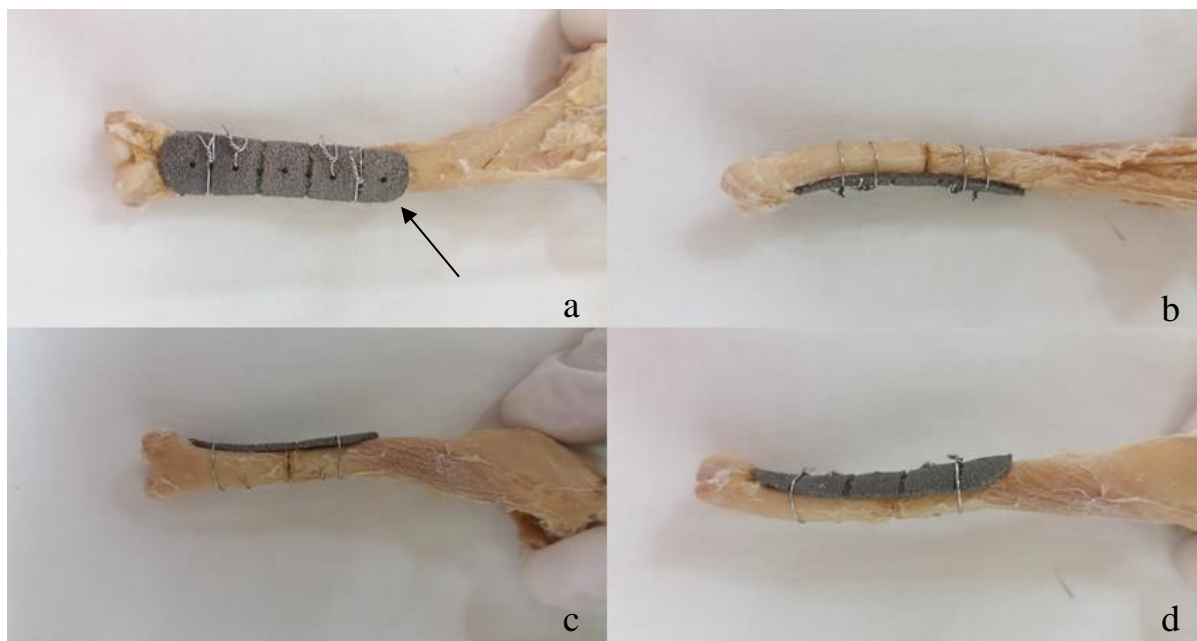


Figura 26: Quatro faces de úmero fraturado experimentalmente e fixado com placa de titânio, dissecado de cadáver formolizado de gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*).

Na maior parte da linha de contato entre os bordos da placa e a superfície do úmero não foi possível a introdução da sonda odontológica milimetrada, evidenciando a justaposição entre eles. Somente no bordo proximal caudal foi observada a passagem da sonda (Figura 26a e 27b-f).

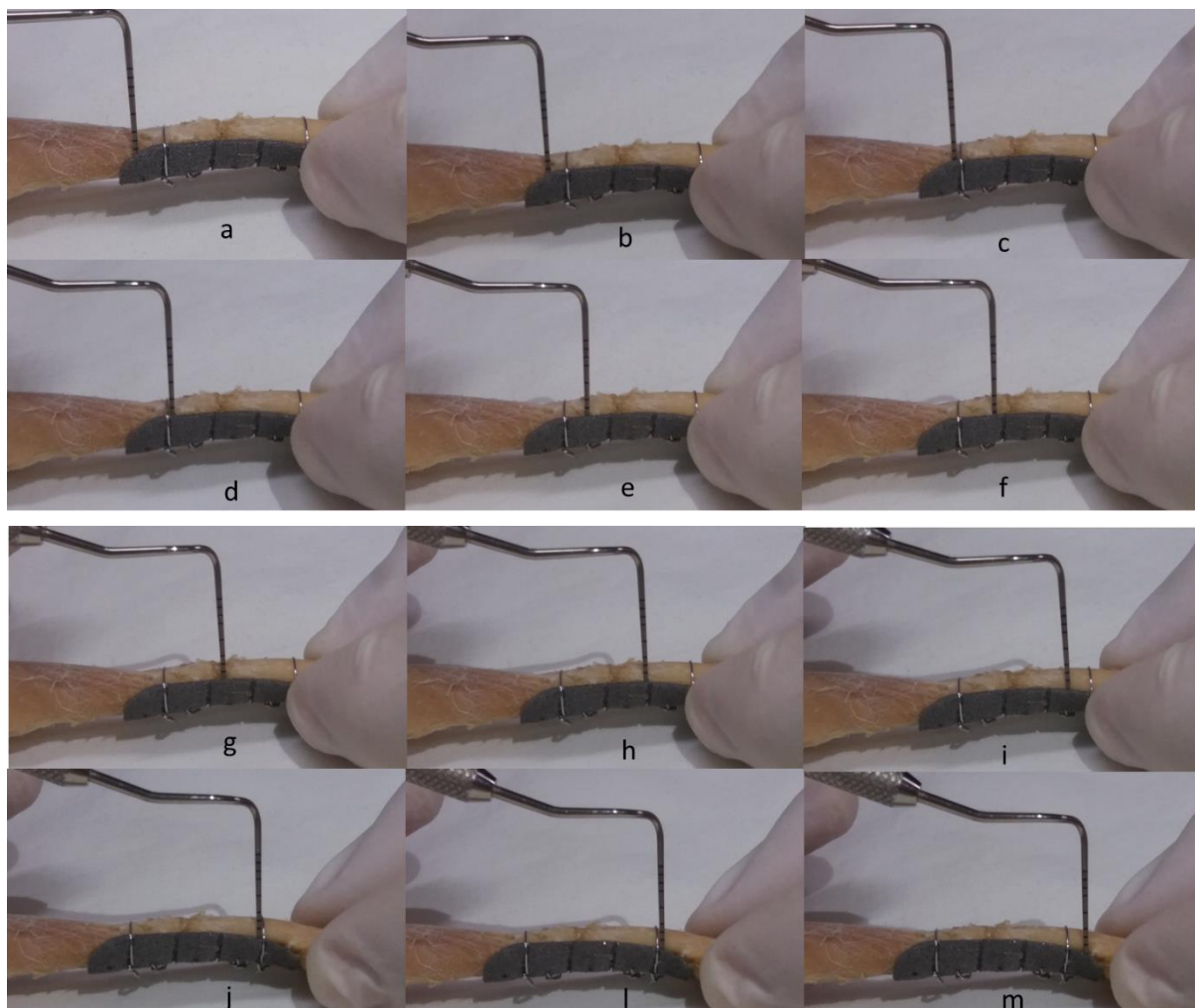


Figura 27 Osso dissecado da asa de cadáver formolizado de gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*) após fixação da placa metálica. Sonda odontológica milimetrada evidenciando bom ajuste ao longo do osso com falha mínima de contato entre osso e placa somente no bordo proximal caudal (b-f).

4.5 Ensaio de Flexão em Três Pontos

4.5.1 Ensaio do osso

O suporte em madeira produzido com adaptações apoiou adequadamente a região de ensaio do úmero de gavião-carijó, não tendo sido observada movimentação em nenhum momento da avaliação.

O teste foi interrompido no momento em que se observou grande deformação óssea e contato entre as corticais, com perda considerável de resistência à imposição da carga. Ao final do teste, com a elevação da célula de carga, observou-se algum afastamento entre as corticais ósseas (Figura 28a e b).

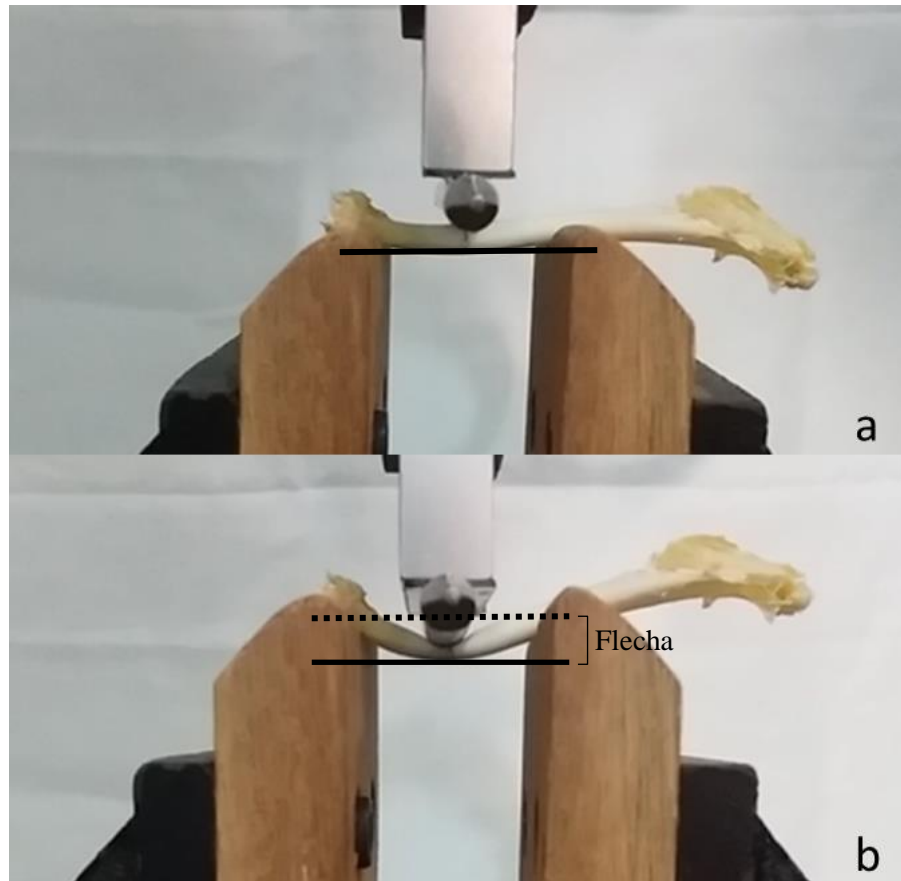


Figura 28: Osso íntegro antes do ensaio de flexão em três pontos (a) e deformação óssea causada após ensaio (b), evidenciando a flecha, no osso dissecado de cadáver formolizado de gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*). A linha contínua indica a posição da diáfise óssea nas duas imagens, e a linha tracejada, a posição original da diáfise umeral, anteriormente ao ensaio.

A carga máxima aplicada ao osso foi de 2,6 kgf com flecha correspondente a 3,2 mm (Figura 29).

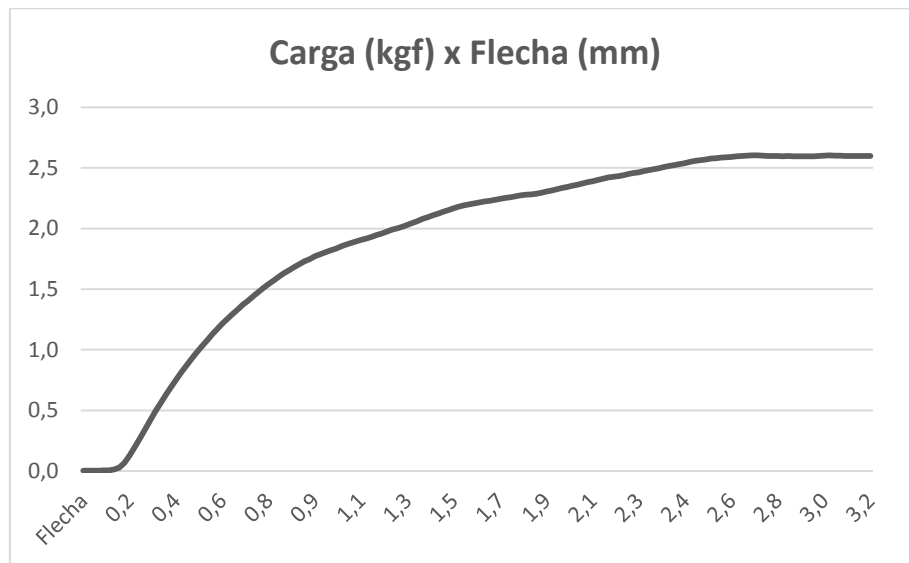


Figura 29: Representação gráfica do ensaio de flexão em três pontos em osso íntegro de cadáver formolizado de gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*), relacionando a carga aplicada com a flecha correspondente.

4.5.2 Ensaio do osso fraturado estabilizado por placa e fio de aço

O conjunto do úmero de cadáver de gavião-carijó com fratura experimental fixada pela placa de titânio suportou a força aplicada pela célula de carga até o máximo permitido pelo sistema de segurança do equipamento, de 19,1 kgf. Não houve quebra da placa ou dos fios de aço, tampouco fraturas no osso. Ao final do teste foi observada grande falha entre os fragmentos ósseos (Figura 30).



Figura 30: Falha óssea após ensaio de flexão em três pontos no conjunto osso, placa e fio de aço de cadáver formolizado de gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*).

A carga máxima suportada pelo osso obteve flecha correspondente a 5 mm, representando a carga máxima suportada pelo conjunto osso mais placa (Figura 31).

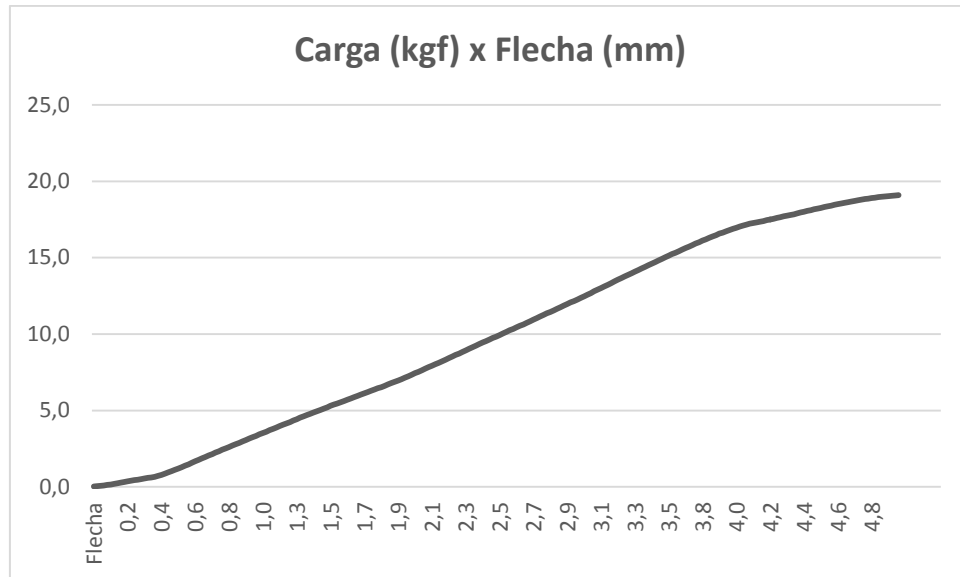


Figura 31: Representação gráfica do ensaio de flexão em três pontos do úmero de cadáver formolizado de gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*) com fratura experimental fixada por placa de titânio e fio de aço, relacionando a carga aplicada com a flecha correspondente.

4.5.3 Ensaio da placa de titânio, alumínio e vanádio

No ensaio isolado da placa ortopédica em liga de titânio o teste foi interrompido ao primeiro sinal de falha do material, que ocorreu em forma de trinca no segundo sulco proximal (Figura 32).

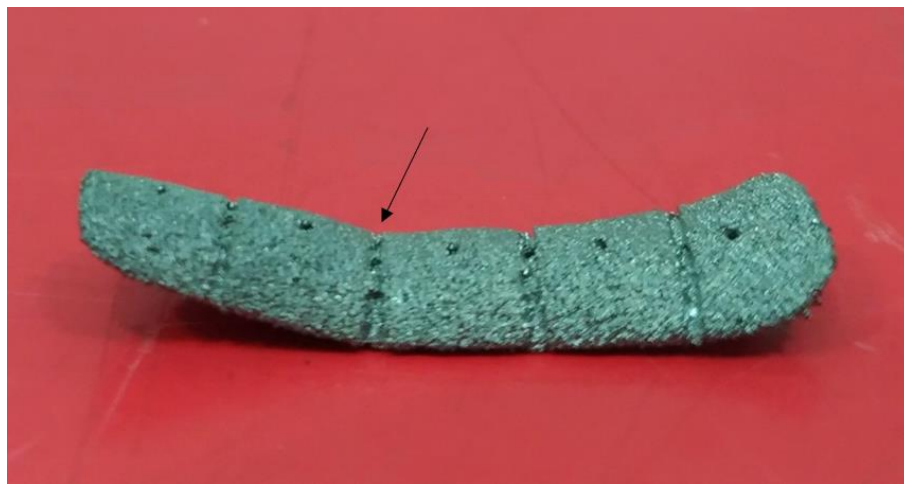


Figura 32: Placa em liga de titânio, alumínio e vanádio para tratamento de fraturas em úmero de gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*) após ensaio de flexão em três pontos, com seta evidenciando o local de falha do implante.

A placa alcançou carga máxima de 20,8 kgf até a sua falha, com flecha de 1,6 mm. (Figura 33).

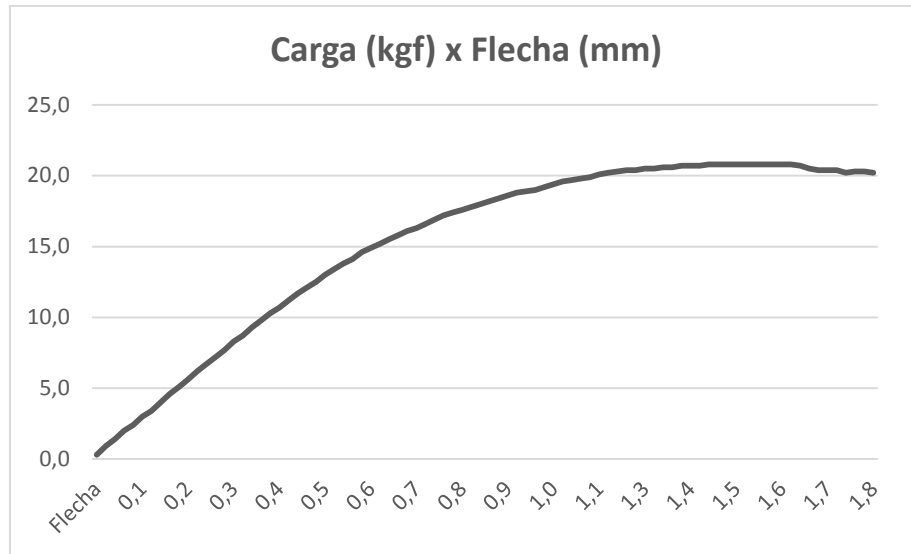


Figura 33: Representação gráfica do ensaio de flexão em três pontos da placa metálica em liga de titânio customizada para aplicação em fraturas umerais de gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*), relacionando a carga aplicada com a flecha correspondente.

4.6 Comparação dos Três Ensaiois

A carga máxima suportada pelo conjunto osso, placa e fios de aço foi aproximadamente dez vezes maior do que a carga suportada pelo osso íntegro. A carga que se mostrou suficiente para produzir falha na placa de titânio teve valor bem próximo da carga máxima aplicada ao conjunto osso mais placa, no qual observou-se separação significativa entre os fragmentos ósseos porém nenhuma alteração notável na placa ortopédica nem na sua fixação ao úmero (Figura 34).

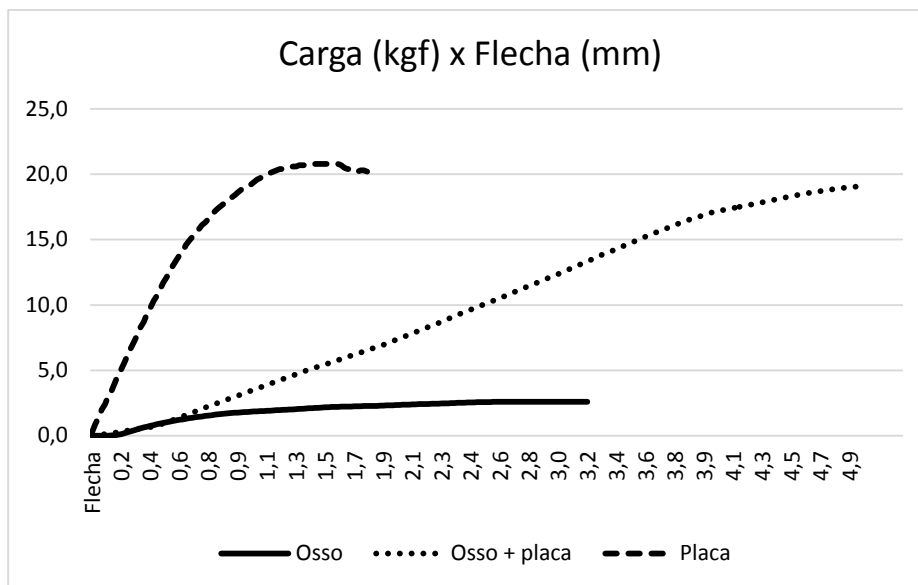


Figura 34: Representação gráfica da comparação entre os ensaios de flexão em três pontos do osso íntegro, conjunto osso, placa e fio de aço e placa isolada, relacionando a carga aplicada com a flecha correspondente.

5 DISCUSSÃO

O modelo de placa ortopédica para tratamento de fratura em aves apresentado no presente estudo foi desenvolvido levando-se em consideração as especificidades desse grupo de animais, assim como os relatos de literatura e a experiência de médicos veterinários que militam na medicina de animais selvagens.

O manejo pós-operatório de fraturas em aves apresenta grandes limitações devido à dificuldade de manejo dessas espécies, devendo envolver o mínimo de manipulação e restrição ao uso do membro, conforme descrito por Leotte (2004) ao aplicar fixadores externos tipo 1A em úmeros de pombos. O desenvolvimento de um modelo de placa ortopédica adequado para aves contempla essas peculiaridades, além de contornar as desvantagens da utilização de outros métodos de correção de fraturas, geralmente adaptados da medicina de pequenos animais (BUSH, 1977; WESTFALL; EGGER, 1979) e humana (CHRISTEN et al., 2005; DAL-BÓ et al., 2011; GOUVÊA et al., 2011; GULL et al., 2012).

A espécie utilizada no modelo experimental, o gavião-carijó, foi escolhida devido à abundância na natureza relacionada à sua alta capacidade de adaptação, conforme relatado por Dos Santos e Rosado (2009) e, por isso, frequente nos centros de triagem, com muitos dos indivíduos apresentando fraturas ósseas. Além disso, em um dos locais consultados para fornecimento de cadáveres de aves para o estudo, havia espécimes formolizados em quantidade suficiente, o que não é muito comum em se tratando de animais selvagens.

A análise dos resultados da pesquisa junto às instituições de atendimento de animais selvagens e comparação com os dados da literatura foi importante para definir-se o local para a realização da fratura experimental nos cadáveres. A grande variação nas informações obtidas dos questionários pode estar relacionada ao tipo de público atendido, de aves mantidas como “pet” a animais de vida livre, traumatizados em acidentes ou de apreensão.

A indicação do úmero como um dos ossos mais frequentemente acometidos encontrou respaldo na literatura (BUSH, 1977), e a citação da fratura na região média e distal deve-se à pouca cobertura muscular nessas áreas (MACCOY, 1992). É de conhecimento geral que as fraturas cominutivas são comuns nas aves, devido às características dos ossos com cortical delgada e dura (BENNETT; KUZMA, 1992), entretanto, seria difícil a padronização deste tipo de fratura no modelo experimental e, por isso, a fratura transversa foi escolhida.

É bastante evidente a dificuldade de fixação de fraturas no úmero de aves, devido a questões como fina espessura da cortical, conformação particular desta estrutura óssea e grande variação entre as espécies, o que torna mais difícil um ajuste adequado dos implantes às diferentes localizações e tipos de fratura. Diante desse quadro, a obtenção de implantes produzidos por meio da tecnologia de manufatura aditiva pode vir a solucionar alguns dos graves problemas encontrados na adaptação dos métodos para aves, como o excesso de peso dos implantes e falta de adequação às características do indivíduo e da lesão.

Os relatos de literatura indicam que a frágil e fina cortical óssea das aves desencoraja o uso de placa (BUSH, 1977). Na maioria dos trabalhos mais recentes o uso de placas adaptadas de outras espécies não evidencia resultados satisfatórios, principalmente em aves de pequeno porte; em animais de maior porte a evolução pode ser favorável, como descrito por Sá et al. (2012) que utilizaram placa para correção de fratura de tibiotarso em ganso e Dal-bó et al. (2011), no mesmo osso, em arara. Nestes casos, o osso acometido pode ter influenciado no resultado. Dal-bó et al., 2011 relataram que em ossos retilíneos, como tibiotarso, rádio e ulna, de abordagem mais simples do que o úmero, houve um maior número de relatos do uso de placas, já que as adaptações comerciais desses implantes não se adequaram à anatomia umeral.

Em relação ao alinhamento, observa-se nos relatos de literatura que leve desvio angular em tibiotarso pode levar à deambulação satisfatória (SÁ et al., 2012); no entanto, quando acometem ossos das asas podem comprometer o retorno da função de voo, como observado por Tramquilim et al. (2007) na correção de fratura em úmero de tucano. As placas encontradas no mercado não favorecem o correto alinhamento das fraturas umerais, devido ao formato helicoidal do osso, o que foi solucionado pelo modelo desenvolvido no presente trabalho. Este, tendo sido projetado com base nas imagens tomográficas de úmeros de gavião-carijó, ajustou-se de forma bem próxima a toda a superfície em que foi aplicado.

Christen et al. (2005), Gouvêa et al. (2011) e Gull et al. (2012) utilizaram miniplacas adaptadas de humanos para a correção de fraturas experimentais de pombos, observando como falha mais frequente o envergamento do implante, que pode ter ocorrido por uma escolha inadequada ou pelas complicações relacionadas ao uso de placas em aves.

É nítido que a utilização de implantes produzidos para mamíferos não se adequa, em sua maioria, às necessidades das aves, como leveza e espessura. Placas e parafusos tradicionais, por não serem adaptados às aves, podem causar lesão iatrogênica maior do que a própria fratura, conforme relatado por Bennett e Kuzma (1992). Desta forma, o modelo de placa proposto no presente trabalho contempla este lapso no arsenal terapêutico veterinário e pôde ser obtido graças ao material utilizado (liga de titânio) e ao método de produção (manufatura aditiva), com características apropriadas às aves, como leveza e espessura delgada.

A proposta de utilização de cerclagens e hemicerclagens para fixação de placas não foi encontrada nos trabalhos obtidos na pesquisa bibliográfica, realizada sem filtro de período nos indexadores PubMed, Science Direct e Scopus. O resultado alcançado na fixação da placa ao osso no modelo-teste em resina e no modelo final em titânio foi satisfatório, apresentando fácil manipulação do fio de aço sem sofrer quebra apesar de seu diâmetro reduzido e com ótima acomodação do fio aos sulcos, o que conferiu notável estabilidade à cerclagem. Na hemicerclagem a dificuldade na passagem do fio de aço foi um fator dificultador na fixação do implante, considerando-se necessário o desenvolvimento de uma broca vazada que facilite o processo e diminua o tempo cirúrgico. Na cerclagem, o reduzido campo cirúrgico e o cuidado em preservar os tecidos moles também acrescentaram algum grau de dificuldade ao procedimento. A avaliação radiográfica após fixação da placa de titânio no cadáver de gavião-carijó mostrou que, apesar das dificuldades encontradas na simulação do ato cirúrgico, o implante pôde ser devidamente fixado, observando-se apenas leve inclinação da hemicerclagem proximal e cerclagem distal, o que não é incomum durante a aplicação cirúrgica, sem, entretanto, comprometer o resultado.

No método convencional para fixação de placas, os parafusos podem causar lesão iatrogênica aos ossos devido às finas e quebradiças corticais das aves. A fixação com cerclagem e hemicerclagem não causou rachaduras no osso, e o conjunto do úmero com fratura experimental fixada pela placa de titânio resistiu ao ensaio de flexão em três pontos, suportando a carga máxima de 20 kgf da célula de carga usada, sugerindo que em situações de rotina clínica esta forma de fixação será eficaz na manutenção da estabilidade. A substituição dos parafusos por fio de aço resolve um dos problemas inerentes à utilização de placas nessas espécies.

O padrão de localização da cerclagem e hemicerclagem nos orifícios da placa foi escolhido aleatoriamente. O modelo desenvolvido com quatro sulcos e nove orifícios permite adequação, no ato cirúrgico, em relação à localização da fratura e número de fragmentos.

A placa leve, de espessura delgada e anatomicamente adaptada permitiu ótima justaposição ao osso, observada na avaliação visual e com o uso da sonda odontológica exploratória. Esta ótima adequação foi possível em consequência do processo de planejamento virtual, desde o uso do protótipo da asa impresso em poliamida, passando pelos

ajustes promovidos na placa-teste de resina até a impressão final da placa em titânio. Outros ajustes importantes devem ser ressaltados, como o arredondamento das extremidades da placa podendo evitar lesões em pele, tendo em vista a escassez de tecido subcutâneo e muscular na região.

A literatura relata a dificuldade de correção cirúrgica de fraturas umerais devido à sua anatomia helicoidal e a presença de diversos processos anatômicos (BENNETT; KUZMA, 1992), daí a grande importância da conformação específica do modelo desenvolvido, aumentando as chances de sucesso no procedimento cirúrgico por promover maior estabilidade da fratura. Uma limitação neste processo é que a anatomia diferenciada do úmero faz necessária a produção de implantes distintos para cada asa do animal, entretanto observou-se que a placa desenvolvida possui ótimo encaixe para a região lateral proximal, podendo ser também avaliada para uso em outros tipos e locais de fratura.

A placa final em titânio, com cinco segmentos, pode ultrapassar o comprimento ideal em gaviões-carijó de menor porte na extremidade proximal do implante, conforme observado ao justapor-se os modelos de ossos impressos em resina. Entretanto considera-se que, na execução do ato cirúrgico, isto possa ser contornado com a desinserção de um pequeno segmento muscular (no caso de ainda não ter ocorrido pelo trauma), e que a extensão da fixação também possa ser vantajosa na presença de fraturas cominutivas.

O titânio, material de escolha para a impressão dos implantes, possui excelente biocompatibilidade e resistência mecânica (SHAH et al., 2016). A liga Ti-6Al-4V tem sido a mais utilizada na área médica para implantes não permanentes, devido ao poder tóxico da liberação de alumínio e vanádio (ELIAS, 2008). Por se tratar de um animal silvestre que irá retornar à natureza, a remoção do implante se faz necessária, evitando que a placa metálica utilizada possa vir a se tornar um corpo estranho, caso o animal venha a ser predado. Nesse caso, como a placa não permanecerá no animal, o poder tóxico dos implantes da liga não é relevante. Em animais mantidos como “pet”, outras ligas de titânio poderão ser usadas para a impressão do implante, evitando-se a necessidade de uma segunda intervenção cirúrgica para a remoção da placa. Materiais biodegradáveis têm sido amplamente estudados e utilizados na medicina humana e futuramente poderão ser utilizados na fabricação de implantes para diversas espécies, o que irá antecipar a soltura dos animais na natureza.

Os sulcos do suporte em madeira utilizados para ensaio dos ossos apoiaram adequadamente os materiais ensaiados, uma vez que a geometria do suporte original não promovia estabilidade para o ensaio destes materiais. O suporte foi confeccionado em cedrinho devido à facilidade de reprodução, custo e apresentar rigidez e resistência mecânica suficientes para o ensaio dos ossos. Para o ensaio da placa o suporte original foi mantido, pois a resistência mecânica da madeira poderia ser insuficiente para o teste, ocasionando deformação plástica no suporte.

No ensaio do conjunto osso, placa e fio de aço, a grande falha gerada entre os fragmentos ósseos pela aplicação da alta carga inviabilizaria a estabilização da fratura; no entanto, em uma situação normal de pós-operatório, não parece plausível que essa quantidade de carga seja aplicada ao membro do animal e, portanto, pode-se considerar que o método de estabilização da fratura resistiria às cargas impostas em condições clínicas de rotina.

Em relação aos ensaios realizados, a placa em liga de titânio suportou maior carga e apresentou menor flecha devido à alta resistência mecânica e alta rigidez da liga. O ensaio de flexão em três pontos comprovou a resistência mecânica da placa de Ti-6Al-4V.

A deformação na placa ocorreu, como esperado, em um dos sulcos, que representa ponto de fragilidade na placa. Apesar dos sulcos diminuírem a resistência, a carga suportada até a deformação demonstrou que o implante é capaz de imobilizar a fratura. Ainda, a estabilidade conferida pela adaptação dos fios de cerclagem aos sulcos certamente incrementa a efetividade do conjunto e justifica sua presença no modelo.

As ferramentas tecnológicas, como tomografia computadorizada, programa de CAD (*Computer Aided Design*) e manufatura aditiva, foram de grande importância para o desenvolvimento do implante, permitindo estudo anatômico profundo e comparativo entre os diferentes exemplares formolizados de gavião, tendo sido possível observar variações significativas que nos levaram ao aprimoramento da placa em liga de titânio. A manufatura aditiva foi usada com o objetivo de desenvolvimento do implante, como utilizado também por Freitas et al. (2011; 2012) na produção de órtese para gavião e placas ortopédicas para cães, e Goes (2016) na confecção de placas ortopédicas para coelhos. Futuramente espera-se que o modelo possa ser padronizado para ampla utilização.

6 CONCLUSÕES

A dificuldade de utilização de placas na correção de fraturas em úmero de aves está associada à inadequação dos implantes fabricados, adaptados de cães e gatos. O implante desenvolvido especificamente para aves no presente trabalho tornou possível a utilização de placas, obtendo-se bons resultados na aplicação em fraturas experimentais de úmero de gavião-carijó formolizado. A fixação do implante por cerclagem e hemicerclagem demonstrou ser um método efetivo, não tendo causado lesão iatrogênica no osso e resistindo ao ensaio de flexão com grande carga.

A manufatura aditiva permitiu a fabricação de um implante leve, resistente, com grande ajuste ao osso e com fixação por fio de aço, superando as atuais dificuldades da aplicação de placas em úmero de aves. O acesso mais facilitado à obtenção de imagens tomográficas facilitou o desenvolvimento do trabalho, visto serem indispensáveis para o planejamento do implante.

Supõe-se que após estudos anatômicos comparativos o modelo de implante desenvolvido possa ser utilizado em outras espécies de aves de tamanho aproximado ao do gavião-carijó e, ainda, que alterações nas dimensões venham atender a aves de maior porte.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALIEVI, M. M.; OLIVEIRA, A. N. C.; FERREIRA, P. A.; TRAESEL, C.; GUIMARÃES, L. D.; FLORES, F.; SILVA, S. F.; SCHOSSLER, J. E. W. Osteossíntese de úmero em pombos domésticos (*Columbia livia*) associando-se pinos metálicos e polimetilmetacrilato intramedulares após osteotomia diafisária. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 60, n. 4, p. 843-850, 2008.
- BENNETT, R. A.; KUZMA, A. B. Fracture management in birds. American Association of Zoo Veterinarians. **Journal of Zoo and Wildlife Medicine**, v. 23, p. 5-38, 1992.
- BERMAN, B. 3-D printing: the new industrial revolution. **Business Horizons**, v. 55, p. 155-162, 2012.
- BOLSON, J.; SCHOSSLER, J. E. Osteossíntese em aves – Revisão da literatura. **Arquivos de Ciências Veterinárias e Zoologia da Unipar**, v. 11, n. 1, p. 55-62, 2008.
- BOLSON, J.; SCHOSSLER, J. E.; ORNES, R. C.; MOTTIN, V.; ALBERTI, T. Análise clínica, radiológica, macroscópica e histológica do úmero de codornas domésticas (*Coturnix japonica*), submetido ao implante da poliuretana derivada do polímero de mamona (*Ricinnus communis*). **Ciência Rural**, v. 35, n. 5, p. 1123-1130, 2005.
- BOLSON, J.; SCHOSSLER, J. E. W.; MACHADO, G.; ZEMBRZUSKI, F. B. Pino ósseo homólogo conservado em glicerina a 98% e hemicerclagem com fio poliglactina 910 na osteossíntese umeral de pombos domésticos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 7, p. 1925-1931, out, 2008.
- BORDELO, J. P. A. **Aplicação da tecnologia de prototipagem rápida no estudo pré-cirúrgico em ortopedia veterinária**. Dissertação de Mestrado Integrado em Medicina Veterinária. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real, Portugal, 2015.
- BUSH, M. External fixation of avian fractures. **Journal of the American Veterinary Medical association**, v. 171, n. 9, p. 943-946, 1977.
- CASTILHO, M.; DIAS, M.; VORNDRAN, E.; GBURECK, U.; FERNANDES, P.; PIRES, I.; GOUVEIA, B.; ARMÉS, H.; PIRES, E.; RODRIGUES, J. Application of a 3D printed customized implant for canine cruciate ligament treatment by tibial tuberosity advancement. **Biofabrication**, v. 6, n. 2, p. 025005, 2014.
- CASTRO, P. F. **Afecções cirúrgicas em aves: estudo retrospectivo**. 167f. Tese de mestrado, Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- CHRISTEN, C.; FISCHER, I.; VON RECHENBERG, B.; FLÜCKIGER, M.; HATT, J. M. Evaluation of a maxillofacial miniplate compact 1.0 for stabilization of the ulna in experimentally induced ulnar and radial fractures in pigeons (*Columba livia*). **Journal of Avian Medicine and Surgery**, v. 19, n. 3, p. 185-190, 2005.

CORRÊA, D. R.; ROCHA, L. A.; GRANDINI, C. R. Modificação superficial de ligas biomédicas de titânio por oxidação térmica. In: **Anais da VIII Conferência Brasileira sobre Temas de Tratamento Térmico**, 2017, Indaiatuba, São Paulo. Disponível em: <<http://www.metallum.com.br/ttt2017/program-detalhes-info.php?cod=6821>>. Acesso em: 10 ago. 2017.

DAL-BÓ, I. S.; ALIEVI, M. M.; SILVA, L. M.; GOUVÊA, A. S.; MUCILLO, M. S.; SANTOS, E. O.; BECK, C. A. C. Osteossíntese de tibiotarso com miniplaca de titânio em Arara Canindé (*Ara ararauna*). Arquivo **Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 63, n. 4, p. 1003-1006, 2011.

DALMOLIN, F.; SCHOSSLER, J. E.; BERTOLETTI, B.; VASCONCELOS, A.; MULLER, D.; SCHOSSLER, D. R.; GOMES, K. Modificações do fixador externo para osteossíntese umeral em pombos domésticos. **Ciência Rural**, v. 37, n. 2, 2007.

DARROW, B. G.; BISKUP, J. J.; WEIGEL, J. P.; JONES, M. P.; XIE, X.; LIAW, P. K.; THARPE, J. L.; SHARMA, A.; PENUMADU, D. Ex vivo biomechanical evaluation of pigeon (*Columba livia*) cadaver intact humeri and osteotomized humeri stabilized with caudally applied titanium locking plate or stainless steel nonlocking plate constructs. **American Journal of Veterinary Research**, v. 78, n. 5, p. 570-578, 2017.

DAVIDSON, J. R.; MITCHELL, M. A.; RAMIREZ, S. Plate fixation of a coracoid fracture in a bald eagle (*Haliaeetus leucocephalus*). **Journal of Avian Medicine and Surgery**, v.19, p. 303-308, 2005.

DE FREITAS, E. P. **Placas em ponte para tratamento de falhas segmentares em mandíbulas de cães: projeto e desenvolvimento**. 118p. Tese de Doutorado em Medicina Veterinária – Cirurgia. Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Campus de Botucatu, Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2012.

DE FREITAS, E. P.; RAHAL, S. C.; SHIMANO, A. C.; DA SILVA, J. V. L.; NORITOMI, P. Y.; EL-WARRAK, A. O.; MELCHERT, A. Development for Treatment of Segmental Bone Defects of the Canine Mandible: Mechanical Tests and Finite Element Method. **Journal of veterinary dentistry**, v. 33, n. 1, p. 18-25, 2016.

DE FREITAS, E. P.; NORITOMI, P. Y.; DA SILVA, J. V. L. Use of Rapid Prototyping and 3D Reconstruction in Veterinary Medicine. In: Advanced Applications of Rapid Prototyping Technology in Modern Engineering. **InTech**, 2011.

DE FREITAS, E. P.; RAHAL, S. C.; TEIXEIRA, C. R.; SILVA, J. V.; NORITOMI, P. Y.; VILLELA, C. H.; YAMASHITA, S. Rapid prototyping and inclined plane technique in the treatment of maxillofacial malformations in a fox. **The Canadian Veterinary Journal**, v. 51, n. 3, p. 267, 2010.

DE MARGERIE, E.; SANCHEZ, S.; CUBO, J.; CASTANET, J. Torsional resistance as a principal component of the structural design of long bones: comparative multivariate evidence in birds. **The Anatomical Record**, part A, v. 282A, p. 49-66, 2005.

DOS SANTOS, W. M.; ROSADO, F. R. **Dados preliminares da biologia do gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*) na região noroeste do Paraná.** VI Encontro Internacional de Produção Científica Cesumar (Centro Universitário de Maringá), Paraná – Brasil, 2009.

DUERSTOCK, B. S.; BAJAJ, C. L.; PASCUCI, V.; SCHIKORE, D.; LIN, K. N.; BORGENS, R. B. Advances in three-dimensional reconstruction of the experimental spinal cord injury. **Computerized Medical Imaging and Graphics**, v. 24, p. 389-406, 2000.

ELIAS, C. N.; LIMA, J. H. C.; VALIEV, R.; MEYERS, M. A. Biomedical Applications of Titanium and its Alloys. **Biological Materials Science**. v. 60, n. 3, p. 46-49, 2008.

FERRAZ, V. C. M. **Avaliação radiográfica, histomorfométrica e de função de vôo após fixação de osteotomias distais de úmero em pombas (*Columba livia*), com modelo inédito de fixador externo articulado. Estudo comparativo de fixador transarticular dinâmico e estático.** 125f. Tese de mestrado, Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

FREITAS, E. P.; RAHAL, S. C.; TEIXEIRA, C. R.; SILVA, J. V. L.; NORITOMI, P. Y.; VILLELA, C. H. S.; YAMASHITA, S. Rapid prototyping and inclined plane technique in the treatment of maxillofacial malformations in a fox. **Canadian Veterinary Journal**, v. 51, p. 267-270, 2010.

FULLER, S. M.; BURTZ, D. R.; VEVANG, C. B.; MANSOUR, B. S.; MAKHLOUF, M. D. Application of 3-Dimensional printing in hand surgery for production of a novel bone reduction clamp. **Journal of Hand Surgery**, v. 39, p. 1840-1845, 2014.

GETTY, R. **SISSON/GROSSMAN. Anatomia dos Animais Domésticos.** Rio de Janeiro: Guanabara Koogan. 5ª ed. vol. 2. 1981.

GOES FILHO, P. R. S. **Confecção e avaliação mecânica de implantes ortopédicos produzidos em poli (L-ácido láctico) (PLLA) por impressoras 3D.** Dissertação de mestrado em Biociência Animal da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2016.

GOUVÊA, A. S.; ALIEVI, M. M.; NORIEGA, V.; DAL-BÓ, I. S.; PINTO, T. M.; MENEZES, C. L. M.; SILVA, R. B.; SILVA, L. M.; VELASQUE, A. G.; PINTO, L. A. T.; COELHO, A. J. A. Microplacas de titânio em fraturas de tibiotarso em pombos domésticos. **Ciência Rural**, v. 41, n. 3, p. 476-482, 2011.

GULL, J. M.; SAVERAID, T. C.; SZABO, D.; HATT, J. M. Evaluation of three miniplate systems for fracture stabilization in pigeons (*Columba livia*). **Journal of avian medicine and surgery**, v. 26, n. 4, p. 203-212, 2012.

HELMER, P.; REDIG, P. T. Surgical resolution of orthopedic disorders. In: HARRISON, G. J.; LIGHTFOOT, T. L. **Clinical avian medicine.** Palm Beach: Fl. Spix Publishing Inc., v. 2, p. 761-774, 2006.

HESPEL, A. M.; WILHITE, R.; HUDSON, J.; Invited review – applications for 3D printers in veterinary medicine. American College of Veterinary Radiology. **Veterinary Radiology & Ultrasound**, v. 55, n. 4, p. 347-358, 2014.

LEOTTE, A. M.; RAISER, A. G.; BRAGA, F. A.; KRAUSPENHAR, L.; CAMARGO, S. F.; FLORES, F. N.; GOMES, K.; SCHERER, R. S. Fixação esquelética externa tipo Ia (unilateral-uniplanar) para osteossíntese diafisária de úmero em pombos domésticos (*Columba livia*). **Ciência Rural**, v. 34, n. 6, p. 1865-1870, 2004.

LI, X.; CAI, H.; CUI, X.; CAO, P.; ZHANG, J.; LI, G.; ZHANG, J. Prevention of late postpneumonectomy complications using a 3D printed lung in dog models. **European Journal of Cardio-Thoracic Surgery**, v. 46, n. 5, p. e67-e73, 2014.

LOPES, R. C. S. O. **Avaliação de fêmures de frango de corte alimentados com farelo de resíduo de manga**. Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Bioquímica Agrícola. Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, 2009

MACCOY, D. M. Treatment of fractures in avian species. **Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice**, Philadelphia, v. 22, n. 1, p. 225-238, 1992.

MALEKSAEEDI, S.; WANG, J. K.; HAJJE, A. E.; LAYALE, H.; GUNETA, V.; HE, Z.; WIRIA, F. E.; CHOONG, C.; RUYSS, A. J. Toward 3D printed bioactive titanium scaffolds with biomodal pore size distribution for bone ingrowth. **I CIRP Conference on Biomanufacturing**, v. 5, p. 158-163, 2013.

MARTIN, H.; RITCHIE, B. W.; Orthopedic surgical techniques. In: RITCHIE, B. W.; HARRISON, G. J.; HARRISON, L. R. **Avian medicine: principles and application**. Florida: Wingers Publishing, cap. 42, p. 1137-1169, 1994.

MCGURK, M.; POTAMIANOS, P.; AMIS, A. A.; GOODGER, N. M. Rapid prototyping techniques for anatomical modelling in medicine. **Annals of The Royal College of Surgeons of England**, v. 79, p. 169-174, 1997.

NASCIMENTO, P. C. Novo software revoluciona os procedimentos cirúrgicos. Campinas, abr. 2006. **Jornal da Unicamp**, edição 320. Disponível em: <http://www.unicamp.br/unicamp/unicamp_hoje/ju/abril2006/ju320pag3.html>. Acesso em: 04 abr. 2017.

NIINOMI, M. Mechanical properties of biomedical titanium alloys. **Materials Science and Engineering**, v. 243, n. 1-2, p. 231-236, 1998.

OLIVEIRA, P. **Prototipagem rápida utilizando a técnica FDM: Projeto de uma impressora 3D**. São Paulo: Faculdade de Tecnologia de Garça, 2013, 37p.

ORTI, R. M.; GARCIA, P. M., SORIANO, J. G. Falconiformes y estrigiformes, rapaces diurnas y rapaces nocturnas. **Atlas de anatomia de animales exóticos**. Barcelona: Masson, 2004, cap. 6, p. 85-103.

QUEIJO, L.; ROCHA, J.; PEREIRA, P. M.; JUAN, M. S. Surgical training and post-surgery evaluation using rapid prototyped biomodels. In: BÁRTOLO, P. J. et al. **Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping**. London: CRC Press, 2012, p. 51-56.

REIS, J. C.; POTES, J. P.; FIALHO, L.; SILVA, F. C.; CABRITA, A.; MARQUES, A. T.; SIMÕES, J. A. Estudo animal de próteses de anca em compósito PEEK – Carbono. **Revista Portuguesa de Ortopedia e Traumatologia**, v. 12, p. 109-124, 2004.

REIS, J. M.; POTES, J. C.; FIALHO, L.; MARQUES, A. T.; SIMÕES, J. A. Estudo in vitro da citotoxicidade do compósito de PEEK/carbono. **Ciência e Tecnologia dos Materiais**, v. 17, n. 4, 2005.

ROCHA, L. B.; CONCEICAO, A. M.; COSTA, T. A. C.; MOTA, J.; SANTOS, A. A. Osteossíntese em fratura de epífise distal de úmero em papagaio verdadeiro (*Amazona aestiva*). **Medicina Veterinária (UFRPE)**, v. 3, n. 3, p. 26-30, 2011.

RELVAS, C.; REIS, J.; POTES, J. A. C.; FONSECA, F. M. F.; SIMÕES, J. A. O. Sistema de fabrico rápido de implantes ortopédicos. **Revista Brasileira de Ortopedia**, v. 44, n. 3, p. 260-265, 2009.

SÁ, S. S.; FILHO, J. C. S.; SOUZA, F. L.; FRANCO, R. P.; SCORSATO, P. S.; REPETTI, C. S. F. Osteossíntese tibial com utilização de mini placa, parafusos e fio de cerclagem em ganso (*Anser anser*): relato de caso. **Acta Veterinaria Brasilica**, v. 6, n. 1, p. 61-64, 2002.

SAKATA, M. M.; RINCON, M. C. A.; DUEK, E. R. Estudo da interação polímero/cartilagem/osso utilizando poli (ácido láctico-co-ácido glicólico) e poli (p-dioxanona) em côndilo femoral de coelhos. **Ciência e Tecnologia**, v. 14, n. 3, p. 176-180, 2004.

SARAGIOTTO, B. P.; FERREIRA, J. S.; OLIVEIRA, F. D.; SANTOS, P. R. S.; NETO, A. C. A. Uso da Bioimpressão 3D para desmitificar e divulgar o conhecimento da anatomia animal equina. **Anais do 2º Congresso de graduação da Universidade de São Paulo**, 74-75p. Piracicaba, São Paulo, 2016.

SHAH, F. A.; TROBOS, M.; THOMSEN, P.; PALMQUIST, A. Commercially pure titanium (cp-Ti) versus titanium alloy (Ti6Al4V) materials as bone anchored implants - Is one truly better than the other? **Materials Science and Engineering C**, v. 62, p. 960-966, 2016.

SIMÃO, V. T. C.; DE MELO, M. I. V. Inovação Tecnológica no ensino da anatomia veterinária. **Sinapse Múltipla**, v. 4, n. 1, p. 63, 2015.

SOUZA, M. A.; RICETTI, F.; CENTENO, T. M.; PEDRINI, H.; ERTHAL, J. L.; MEHL, A. Reconstrução de imagens tomográficas aplicadas à fabricação de próteses por prototipagem rápida usando técnicas de triangulação. **Memorias II Congresso Latinoamericano de Ingeniería Biomedica**, artículo 00256, Cuba, 2001.

TADDEI, E. B.; HENRIQUES, V. A. R.; SILVA, C. R. M.; CAIRO, C. A. A. Production of new titanium alloy for orthopedic implants. **Materials Science and Engineering**. v. 37, n. 10, p. 683-687, 2004.

TRANQUILIM, M. V.; BOTELHO, G. G. K.; BERTOLINI, Z.; LEHMKUHL, R. C.; LANGE, R. R. Osteossíntese de úmero em *Ramphastos dicolorus* (tucano de bico verde): relato de caso Osteosynthesis of humerus fracture in *Ramphastos dicolorus* (redbreasted toucan): case report. **Ambiência**, v. 3, n. 2, p. 261-266, 2009.

ULBRICH, C. B. L.; ULBRICH, F.; NUNES, B. C.; ZAVAGLIA, C. A. C. Biomodelos em impressora tridimensional para ortopedia. In: **VII Congresso Latino Americano de Órgãos Artificiais e Biomateriais**, 2012, Natal - Rio Grande do Norte.

VOLPATO, N. et al. **Manufatura aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Edgard Blücher, p. 400, 2017.

WEST, P. G.; ROWLAND, G. R.; BUDSBERG, S. C.; ARON, D. N. Histomorphometric and angiographic analysis of bone healing in the humerus of pigeons. **American Journal of Veterinary Research**, v. 57, p. 1010-1015, 1996.

WESTFALL, M. L.; EGGER, E. L. The management of long bone fractures in birds. **Iowa State University Veterinarian**, v. 41, n. 2, p. 81-87, 1979.

WITHROW, S. General principles of fractures repair in raptors. **The Compendium of Continuing Education**, v. 4, n. 2, p. 116-121, 1982.

WISSMAN, M. A. New tools, diagnostics aid in bone and beak repair in birds. **Veterinary Product News**, v. 11, n. 6, p. 44-45, 1999.

YAMAZOE, K.; HIBINO, C.; KUDO, T.; YANAI, T. The reduction of humeral fracture in pigeons with intramedullary poly (methyl methacrylate) and neutralization plate fixation. **Journal Veterinary Medical Science**, v. 56, n. 4, p. 739-745, 1994.

ZOPF, D. A.; MITSAK, A. G.; FLANAGAN, C. L.; WHEELER, M.; GREEN, G. E.; HOLLISTER, S. J. Computer Aided-Designed, 3-Dimensionally Printed Porous Tissue Bioscaffolds for Craniofacial Soft Tissue Reconstruction. **Otolaryngology--Head and Neck Surgery**, v. 152, n. 1, p. 57-62, 2015.

8 ANEXOS

ANEXO 1: Respostas ao questionário sobre rotina de atendimento de aves, enviado para cinco instituições:

| | Fundação Jardim Zoológico RJ | CETAS Seropédica RJ | CRAS Estácio RJ | CEMPAS Botucatu SP | Hamadulu Cuidados Veterinários RJ |
|--|--|--|---|--|--|
| Dentre as afecções atendidas em aves, qual a frequência aproximada das fraturas? | Aves de companhia: entre 10% e 30% Animais resgatados: acima de 50% | Entre 10 e 30% | Entre 30 e 50% | Acima de 50% | Até 10% |
| Quais as estruturas ósseas e localização (proximal, média ou distal) mais comuns de fraturas apendiculares em pequenas aves na sua rotina? Se possível, estime o percentual de ocorrência para cada localização e o tipo de fratura mais comum (simples, cominutiva, oblíqua). | <p>Úmero: 60%, médias, maioria cominutivas.</p> <p>Rádio: 30%, médias, maioria transversa.</p> <p>Carpo: 5%, maioria transversa</p> <p>Fúrcula e/ou coracóide: 5%, maioria transversa.</p> <p>Não citou membro inferior.</p> | <p>80% em membro superior: 80% em bisel; 60% fratura exposta.</p> <p>Rádio e ulna: 50-60%, proximal.</p> <p>Úmero: 20-30%, proximal.</p> <p>Carpo (distal) e falanges: 20%.</p> <p>20% em membro inferior:</p> <p>Tíbia e fíbula: 70%, média, simples, 30% fratura exposta.</p> <p>Fêmur: média.</p> | <p>Úmero: fraturas médias oblíquas.</p> <p>Ulna: fraturas médias e distais cominutivas.</p> | <p>Vida livre:</p> <p>Rádio e ulna: fratura completa, média, transversa, normalmente exposta.</p> <p>Particulares:</p> <p>Tibiotarso: fratura completa, média, transversa.</p> | <p>Maior rotina de passeriformes.</p> <p>Tarsometatarso: 40%, médias e distais, simples.</p> <p>Tibiotarso: 35%, médias e distais, oblíquas.</p> <p>Úmero: 25%, média, espiral.</p> |