

Simulação computacional do úmero do gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*) para análises de fraturas da espécie

Maria I. N. Santos¹, Leonardo M. R. Machado², Marcelo F. Oliveira²
{msantos, leonardo.machado, marcelo.oliveira, }@cti.gov.br

**¹Faculdade de Engenharia Mecânica
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)**

**² Laboratório Aberto de Impressão 3D – LAprin
CTI/MCTI Renato Archer – Campinas/SP**

Abstract. Historically, research with wild animals has numerous complexities, such as changes in the habit, behavior and habitat of these species, in addition to representing a challenge for professionals in veterinary medicine. However, it's possible to use engineering technologies and concepts to help this work, translating it into an improvement in the quality of life of the animals that are studied. In this way, the present work exemplifies the methodology and application of virtual models in a study of bone fracture in wild animals, coordinated by Laboratório Aberto de Impressão 3D (LAprin) of Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI). Therefore, through the 3D modeling method with Computer Aided Design (CAD) and bone structure analysis by the Finite Element Method (FEA), it was noted that this methodology provides qualitative data for complex anatomical models, minimizing the need for biomechanical tests before technological validation.

Resumo. Historicamente, pesquisas com animais silvestres possuem inúmeras complexidades, como modificações no comportamento e no habitat destas espécies, além de figurar como um desafio para os profissionais da medicina veterinária. Entretanto, é possível utilizar tecnologias e conceitos de engenharia para auxiliar este trabalho, traduzindo-o em melhoria na qualidade de vida dos animais estudados. Deste modo, o presente trabalho exemplifica a metodologia e a aplicação de modelos virtuais em um estudo de fratura óssea de animais silvestres, coordenado pelo Laboratório Aberto de Impressão 3D (LAprin) do Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI). Pelo método de modelagem tridimensional em Desenho Assistido por Computador (DAC) e análise da estrutura óssea pelo Método de Elementos Finitos (MEF), notou-se que esta metodologia fornece dados qualitativos para modelos anatômicos complexos, minimizando a necessidade de ensaios biomecânicos antes da validação tecnológica.

1. Introdução

Pesquisas do ramo da medicina veterinária em animais silvestres têm se aprofundado com mais afincos no estudo de fraturas em aves. Biologicamente, estes animais possuem ossos pneumáticos, os quais possuem cavidades de ar que diminuem a massa corporal da ave e, consequentemente, torna-a mais propícia a alçar voo [Canelas *et al* 2020]. Entretanto, não é rara a ocorrência de fraturas em inúmeras regiões ósseas que auxiliam na respiração e na termorregulação – como úmero e fêmur –, ocasionando difícil cicatrização e perda da função de voo.

Nesse ínterim, faz-se premente o estudo de soluções que forneçam uma sobrevida a estas espécies, proporcionando melhor recuperação óssea antes da soltura na natureza. Assim, analisando o gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*), espécie muito comum em ambientes urbanos [Santos e Rosado 2009], o presente estudo recriou a região médio-distal do úmero deste pássaro, modelando-a tridimensionalmente ao utilizar a tecnologia CAD (*Computer Aided Engineering*) no software Rhinoceros 3D®. É essencial pontuar que, na veterinária aplicada a animais selvagens, embora a ocorrência de casos de fratura seja frequente, há poucas soluções para o retorno funcional precoce do membro afetado. Deste modo, a análise do úmero contribui para evoluir estudos anatômicos e planejamentos terapêuticos, proporcionando a análise de problemas complexos e de suma importância para a área da medicina veterinária [Correa 2017]. Assim, a partir da definição da localização da fratura na estrutura óssea dos gaviões-carijó e do planejamento dos implantes cirúrgicos, o ensaio biomecânico apontou vantagens e possíveis falhas do projeto desenvolvido.

Faz-se mister apontar, portanto, a dificuldade de tratamento em fraturas no úmero, as quais tendem a ser majoritariamente cominutivas, gerando inúmeras frações ósseas. Entretanto, embora estas sejam as fraturas de ocorrência mais comum, o presente trabalho dedicou-se a realizar o ensaio biomecânico com uma fratura transversal, a fim de analisar o ensaio de flexão de três pontos. Este ensaio, por sua vez, foi realizado não apenas com o úmero fraturado, mas também com uma placa de fixação de policaprolactona (PCL), modelada a partir do osso de um gavião-carijó formolizado. Dessa forma, é necessário citar que a correção desses traumas depende de uma fixação rígida e de um bom alinhamento e aposição da fratura, fazendo com que as forças mecânicas atuantes sejam neutralizadas [Bush 1997].

Para evitar o trabalho físico repetitivo em uma máquina de ensaios universais, a evolução da simulação computacional permite que inúmeras situações sejam consideradas e analisadas antes que o ensaio seja realizado no osso do cadáver desta espécie de gavião. Nesse contexto, foi utilizado o software HyperMesh®, em que foram definidas condições de contorno para o ensaio biomecânico, propriedades dos ossos e do PCL e carregamentos aos quais o conjunto placa-osso foi submetido. Foram consideradas, ainda, as condições de cerclagem e de hemicerclagem ao utilizar o fio de aço inoxidável 316 L para realizar a fixação da placa no osso.

2. Materiais e Métodos

2.1. Modelagem computacional

Para realização da análise do úmero do gavião-carijó no software Rhinoceros 3D®, foi utilizado um modelo .STL como material-base para a confecção de uma geometria CAD a partir do seccionamento do osso estudado. Isso ocorre, pois, para a posterior simulação computacional, deve-se possuir uma boa qualidade de malha estrutural, a fim de identificar possíveis falhas no ensaio biomecânico. De forma análoga, para realização da análise da placa de fixação, foi utilizado um modelo .STL como base, a fim de que fosse criada uma geometria.

O modelo criado seguiu da forma mais fiel possível a geometria inicial, mas aquele possui mais simplificações e menos detalhamento de malha, uma vez que um projeto muito refinado não seria adequado para o ensaio de flexão de três pontos da placa, necessitando de um poder computacional muito elevado para a obtenção de resultados. Por fim, foram realizados também furos no CAD do osso, concêntricos aos da placa, a fim de proporcionar as condições corretas para a situação de cerclagem e hemicerclagem (Figura 1).



Figura 1: Imagem renderizada com perspectiva do conjunto placa-osso. **Fonte:** Autoral.

2.2. Geração de malha estrutural

Finalizada a modelagem da placa e da região médio-distal do úmero do gavião-carijó, o processo é realizado no *software* de CAE (*Computer Aided Engineering*) HyperMesh®. Nesse contexto, a primeira etapa é a geração de uma malha estrutural 2D nos elementos a serem trabalhados.

O *software* HyperMesh®, como boa parte dos *softwares* de CAE atualmente, trabalha com a aplicação do Método dos Elementos Finitos (MEF), o qual tem como princípio modelar de forma mais simples um problema que, física e matematicamente, seria muito complexo. Pensando nisso, faz-se mister atentar-se a dois parâmetros principais na criação da malha estrutural de elementos para o início da simulação: o formato do elemento – ou seja, a quantidade de nós necessárias – e o tamanho deste. Isto é de suma importância para análise, pois quanto menores os elementos, mais fidedigna é a malha à geometria do modelo inicial. Dito isto, a malha estrutural 2D do conjunto placa-osso foi criada a partir de elementos trigonais.

Entretanto, o *software* não realiza simulações com malhas estruturais 2D, as quais têm dimensão apenas superficial do projeto. Por essa razão, é criada uma malha tridimensional, dividindo o modelo em pequenos volumes de controle e, assim, possibilitando a análise do projeto em escala real.

A próxima etapa, portanto, é fornecer os dados dos materiais utilizados para o *software*, a fim de que seja possível considerar as propriedades do osso, do polímero policaprolactona e do aço inoxidável na simulação do ensaio biomecânico, tornando-o o mais verossímil possível. Desse modo, faz-se premente investigar, na literatura, os valores de duas características mecânicas dos materiais: o módulo de elasticidade – ou módulo de Young – e o coeficiente de Poisson (Tabela 1). Embora o fio de aço responsável pela fixação da placa no úmero do gavião-carijó não tenha sido modelado no *software* Rhinoceros 3D®, as propriedades deste material são necessárias para definir com precisão as condições de contorno referentes à cerclagem e hemicerclagem.

Tabela 1: Propriedades mecânicas dos materiais utilizados

Material	Módulo de Elasticidade [GPa]	Coeficiente de Poisson	Referências
Osso cortical	10.49	0.30	[Cubo e Casinos 2000]
Policaprolactona (PCL)	0.4	0.44	[Cameron e Moghaddam 2008] [Lu <i>et al</i> 2014]
Aço inoxidável 316 L	196	0.28	[Song <i>et al</i> 2006]

Assim que as propriedades mecânicas dos materiais trabalhados foram fornecidas ao software, o sistema foi capaz de conduzir uma simulação mais plausível para as condições do ensaio de flexão requerido. Para isso, foi necessário definir as regiões de contato entre o osso e o suporte da máquina, entre a placa e o osso e entre a placa e o metal aplicador de carga. Faz-se mister, ainda, atentar-se que não deve haver a ocorrência de forças de cisalhamento entre a placa e o osso, tampouco na região do osso que está fraturada.

Destarte, para um ensaio de flexão de três pontos, como o nome sugere, deve-se considerar três pontos de interesse: um deles, acima do corpo de prova estudado, será o de aplicação da força. Os outros dois, por sua vez, representam as regiões de contato entre o suporte do aparato de ensaio mecânico e a face inferior do corpo de prova. Dessa forma, para que o resultado da simulação computacional seja satisfatório, definiu-se as reações de apoio no osso devido ao contato com o suporte da máquina. As condições de contato desse apoio estão representadas pelas regiões amarronzadas, abaixo do osso, na Figura 2.

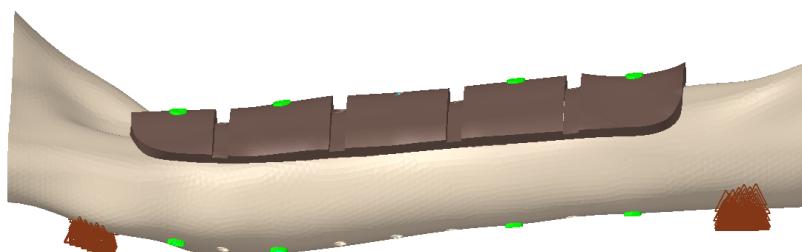


Figura 2: Imagem do conjunto placa-osso com vista para os apoios entre o osso e o suporte da máquina de ensaio. Fonte: Autoral.

De forma análoga à determinação da região de apoio entre a face inferior do osso e o suporte do aparato de ensaio, fez-se uma estimativa da área do aplicador de força na face superior do conjunto placa-osso. Assim, como mostra a Figura 3, a força foi aplicada na região central do conjunto.

Nesse contexto, na simulação do ensaio de flexão, foi utilizado um carregamento de 20 kgf, o qual é uma força superdimensionada, causando uma trinca indesejável na linha de fratura do osso. Assim, para ilustrar o carregamento ideal para o conjunto placa-osso, também foi aplicada uma força equivalente a 10% da inicial, isto é, 2 kgf.

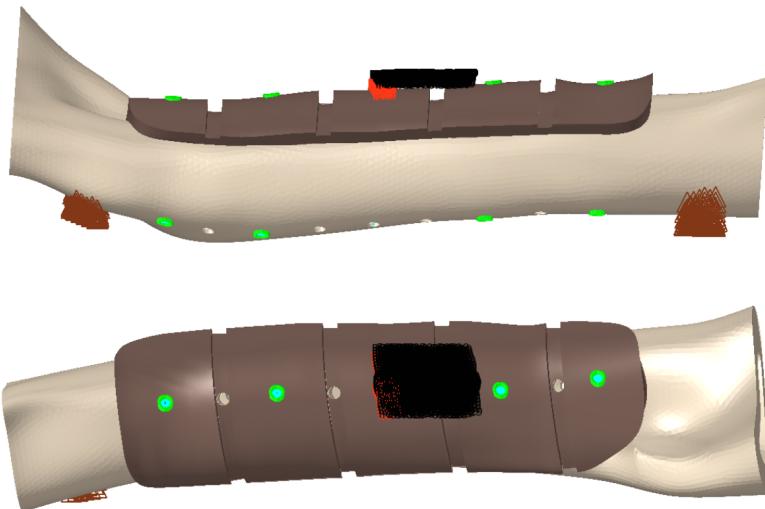


Figura 3: Imagem do conjunto placa-osso com vistas frontal e lateral para o carregamento utilizado sobre o conjunto placa-osso. *Fonte: Autoral.*

Quanto à fixação da placa no osso do gavião-carijó, esta foi realizada a partir dos processos de cerclagem e de hemicerclagem com o fio de aço inoxidável 316 L. Assim como previamente retratado, o fio não foi modelado e, portanto, a presença dele foi incluída no projeto computacional a partir de condições de contorno. Para compensar esta simplificação, foi aplicada uma condição de deslizamento entre a face inferior da placa e a face superior do úmero. Esta circunstância, portanto, garante que a placa estará bem fixada ao osso – ou seja, eles não terão afastamento na direção vertical –, mas que há ainda uma liberdade para observar a influência do carregamento aplicado no úmero.

Por fim, para a hemicerclagem, foram utilizados elementos que estabelecem a condição de fixação do conjunto placa-osso por meio dos furos centrais (Figura 4). É importante frisar que estas regiões possuem uma maior compressão e, portanto, são as mais delicadas para a análise do ensaio. Faz-se mister atentar-se que esta fixação é a mais importante, visto que a placa não deve se soltar do osso, tampouco deve haver forças de cisalhamento entre eles.

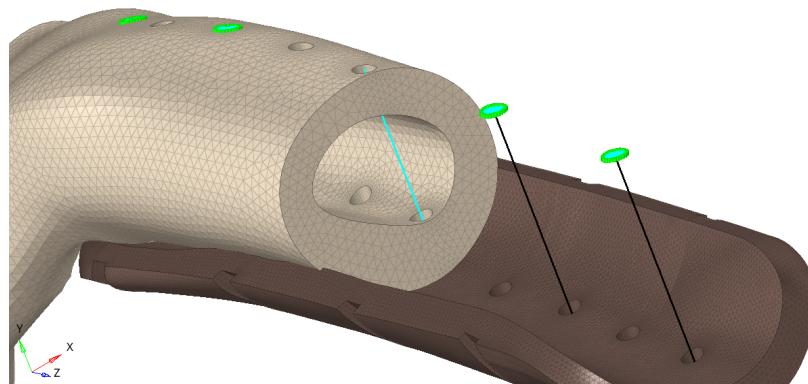


Figura 4: Detalhe do conjunto placa-osso com destaque para os elementos de fixação que substituem a cerclagem e a hemicerclagem do fio de aço. *Fonte: Autoral.*

3. Resultados da simulação do ensaio de flexão

A priori, foi aplicado um carregamento de 20 kgf para o ensaio de flexão de três pontos com o conjunto placa-osso. Entretanto, esta força é superdimensionada, causando uma abertura indesejada na fratura óssea (Figura 5). Em contraponto a esta situação, é possível observar a simulação realizada utilizando 10% do carregamento anterior – ou seja, 2 kgf –, na qual percebe-se que não ocorre abertura acentuada na linha de fratura, sendo quase imperceptível (Figura 6). Os valores de abertura foram de 0,075mm para a força de 20 kgf e dez vezes menores (0,0075 mm) para 2 kgf. É necessário frisar que o descolamento entre as regiões do osso na linha de fratura não é desejável, significando que o conjunto placa-osso não suportará o voo do pássaro, portanto, a situação de aplicação da menor carga configura-se como a circunstância ideal para análise, validando o modelo.

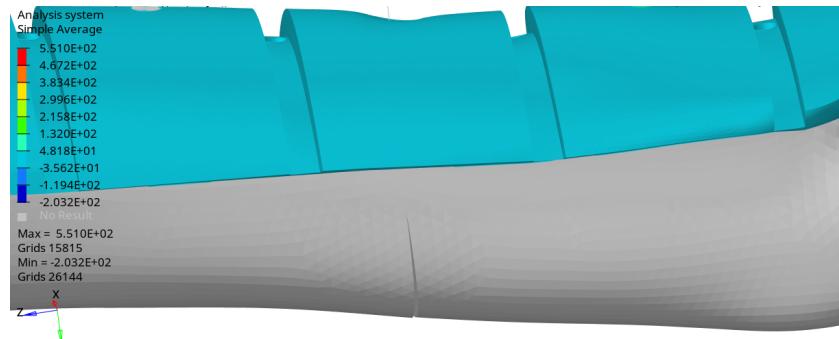


Figura 5: Abertura gerada na linha de fratura, causada pelo superdimensionamento do carregamento de ensaio (20 kgf). Fonte: Autoral.

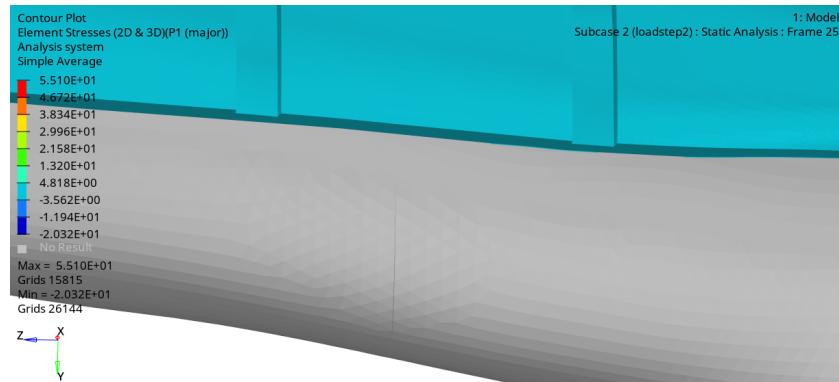


Figura 6: Abertura gerada na linha de fratura, causada pelo carregamento de ensaio de 10% da força original (2 kgf). Fonte: Autoral.

Na análise de deslocamento, com auxílio do mapa de cores das Figuras 7 e 8, observa-se que as extremidades da placa possuem menor deslocamento (região em azul escuro) e, portanto, estão mais fixas ao osso. À medida que aproxima-se do centro da placa, é possível observar um aumento de deslocamento (região alaranjada). Esta percepção é essencial para redobrar a atenção na fixação física da placa no osso, a fim de que não haja deslocamentos excessivos evitando comprometer a cicatrização da fratura.

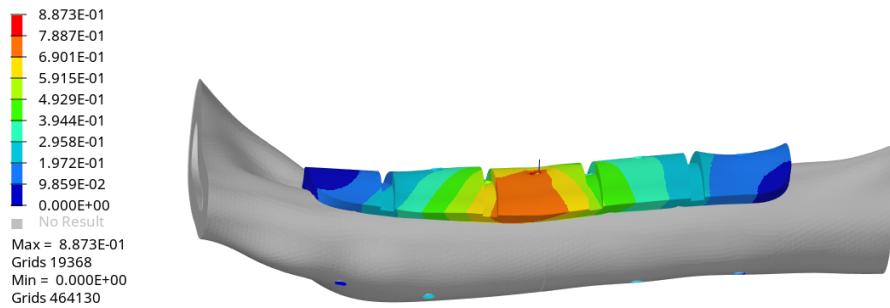


Figura 7: Visão lateral da análise de deslocamento do conjunto placa-osso com carregamento de 20kgf. Fonte: Autoral.

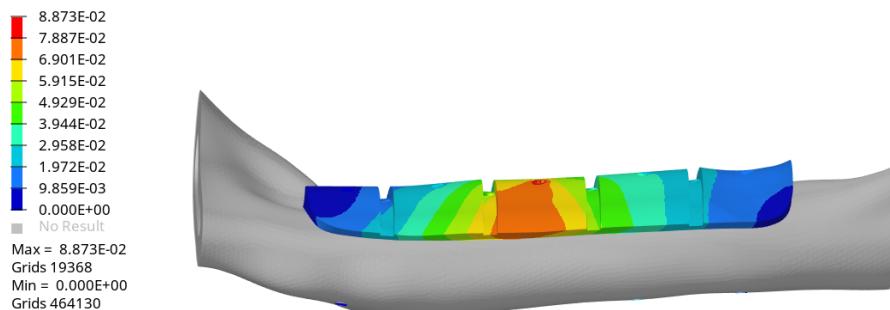


Figura 8: Visão lateral da análise de deslocamento do conjunto placa-osso com carregamento de 2 kgf. Fonte: Autoral.

Quanto ao comportamento da tensão, foram utilizados dois critérios distintos para analisar a concentração nas furações de fixação da placa. No primeiro deles, o critério de tensão principal máxima, obteve-se maior concentração de tensão nos furos centrais, mais próximos à zona de aplicação de ambas as cargas de ensaio, como explicitado nas Figuras 9 e 10.

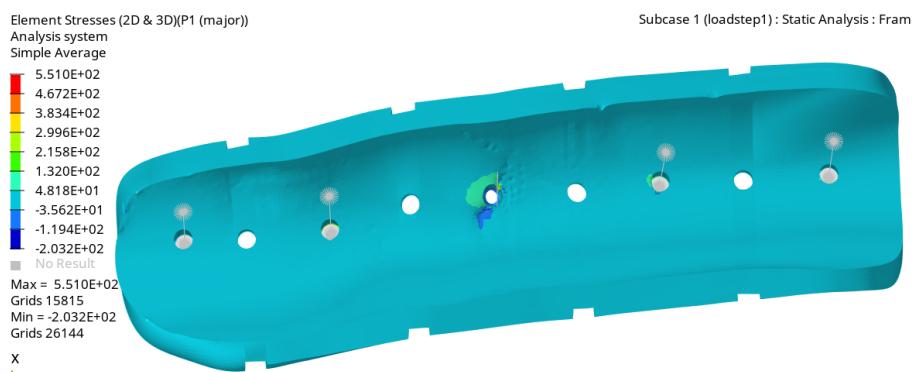


Figura 9: Vista inferior das tensões com carregamento de 20 kgf pelo critério de tensão principal máxima. Fonte: Autoral.

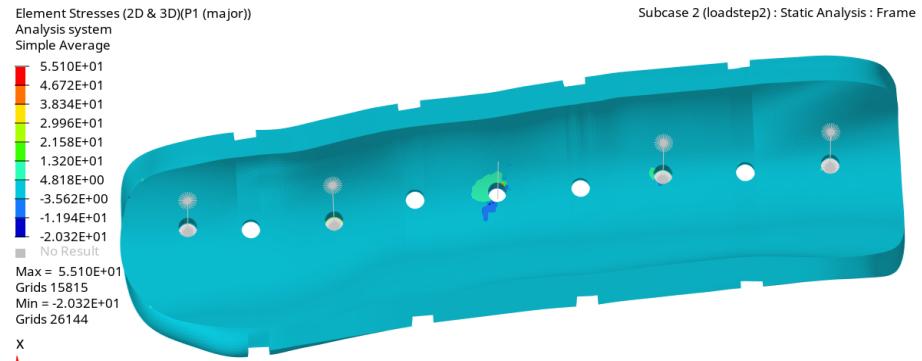


Figura 10: Vista inferior das tensões com carregamento de 2 kgf pelo critério de tensão principal máxima. **Fonte:** Autoral.

O segundo critério foi o de von Mises, o qual considera a energia de deformação do elemento analisado. Neste caso, foi aplicada como condição de tensão máxima o valor da tensão de ruptura do PCL puro, equivalente a 17 MPa sem tratamento térmico [McKeen 2021]. Nesse ínterim, é possível avaliar a real resposta de falha do modelo, em que há uma condição de falha em toda a região central da placa na situação de carregamento de 20 kgf (Figura 10). Em contrapartida, na condição de 2 kgf, há concentrações significativas apenas no furo central (Figura 11).

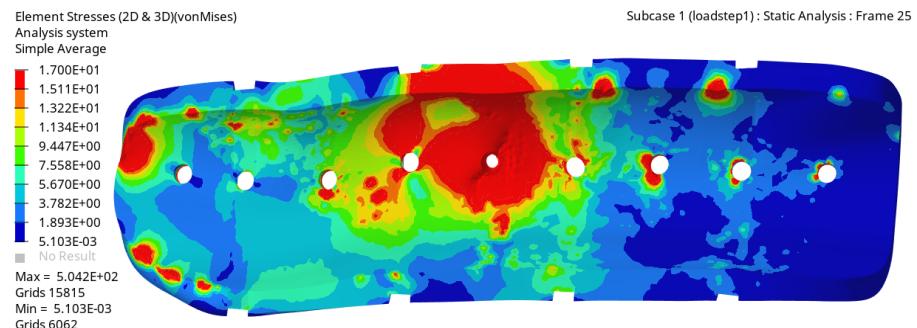


Figura 11: Vista inferior das tensões de falha a 20 kgf pelo critério de von Mises. **Fonte:** Autoral.

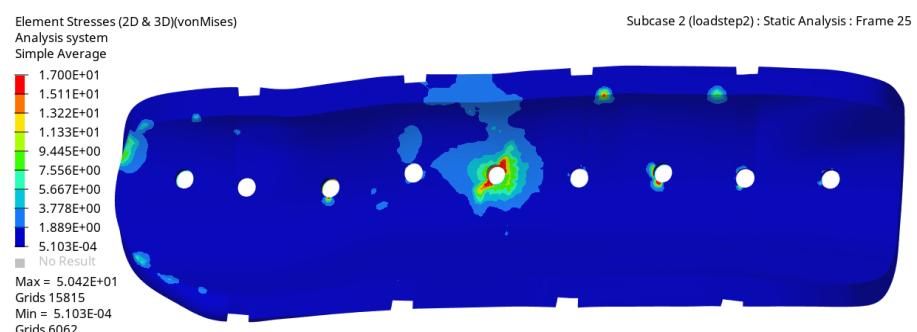


Figura 12: Vista inferior das tensões de falha a 2 kgf pelo critério de von Mises. **Fonte:** Autoral.

Nesse ínterim, entende-se como carregamento excessivo aquelas forças que estão além da situação-problema real. Nesse caso, considerando um pássaro das dimensões do gavião-carijó – medindo entre 31 cm e 41 cm e pesando entre 206g e 290g quando macho e entre 257g e 350g quando fêmea [Marini *et al* 2007] –, é suficiente considerar o carregamento igual ao peso do corpo deste. Esta afirmação é válida pois, logo após o procedimento

cirúrgico, o pássaro não será solto e exposto a situação de voo. Pelo contrário, o gavião-carijó que acabou de receber a placa de policaprolactona será mantido sob condições controladas, com movimentos restritos da asa, e, portanto, não precisará enfrentar o carregamento de 20 kgf estipulado para condições de voo.

4. Conclusões

Os modelos apresentados neste trabalho respeitaram as condições de linearidade impostas pela simulação, em que é possível perceber que os campos de tensão e de deslocamento mantiveram o mesmo padrão, apresentando discrepância apenas em relação à magnitude das cargas. Além disso, foi descartada a presença de forças de cisalhamento no contato das placas com o osso pneumático estudado, indicando que o resultado obtido esteve de acordo com o objetivo do projeto, garantindo uma boa recuperação de gaviões-carijó fraturados.

Desta forma, pelos resultados descritos, faz-se mister apontar a importância da comunicação entre a medicina veterinária e a engenharia, utilizando tecnologias disruptivas a fim de obter respostas mais rápidas e eficazes para o tratamento de casos complexos. É possível observar, portanto, que a reabilitação de aves silvestres que apresentam fratura em ossos que exigem cuidado redobrado, como o úmero, torna-se viável a partir de estudos combinados, abordando a visão computacional das simulações e a perspectiva clínica e cirúrgica da veterinária.

5. Agradecimentos

Agradeço ao professor orientador Marcelo Oliveira pelo acompanhamento, paciência e empatia com seus orientados, sempre acreditando no potencial e no crescimento destes. Também sou grata aos demais colegas de trabalho, sobretudo ao coorientador Leonardo Machado, o qual sempre esteve disposto a sanar dúvidas e a manter o ambiente o mais confortável possível para que todos entregassem bons resultados.

Agradeço ao CTI Renato Archer, à comissão PIBIC e ao CNPq pela oportunidade de bolsa de Iniciação Científica e pela infraestrutura disponibilizada, cujos laboratórios são equipados com tecnologias de ponta, proporcionando a realização das pesquisas de forma aprofundada e competente.

6. Referências

- Canelas, Hugo Augusto Mendonça; *et al.* (2020) Osteossíntese de ossos longos: Revisão. PUBVET: Medicina veterinária e zootecnia, v. 14, n. 8, p. 1-18.
- Santos, Willian Menq dos; Rosado, Fábio Rogério. (2009) Dados preliminares da biologia do gavião-carijó (*Rupornis magnirostris*, Gmelin, 1788) na região nordeste do Paraná. V Encontro Internacional de Produção Científica Cesumar.
- Correa, Clarice Gonring (2017) 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*). Dissertação de mestrado, UFRRJ - Rio de Janeiro.
- Bush, M. (1977) External fixation of avian fractures. Journal of the American Veterinary Medical association, v. 171, n. 9, p. 943-946.
- Cubo, J.; Casinos, A. (2000) Mechanical Properties and Chemical Composition of Avian Long Bones. European Journal of Morphology, v. 38, n. 2, p. 112-121.
- Cameron, R. E.; Moghaddam, A. K. (2008) Degradation rate of bioresorbable materials: prediction and evaluation. Ed. F. J. Buchanan, Woodhead Publishing Limited.

- Lu, Lin; *et al.* (2014) Mechanical study of polycaprolactone-hydroxyapatite porous scaffolds created by porogen-based solid freeform fabrication method. Società Italiana Biomateriali.
- Song, J.; Gelin, J.C.; Barrière, T; Liu, B. (2006) Experiments and numerical modelling of solid state sintering for 316L stainless steel components. Journal of Materials Processing Technology.
- Marini, M.Â. *et al.* (2007) Biologia da nidificação de aves do sudeste de Minas Gerais, Brasil. Revista Brasileira de Ornitologia 15:1-10.
- McKeen, L. (2021) The effect of heating aging on the properties of sustainable polymers. The Effect of Long Term Thermal Exposure on Plastics and Elastomers, p. 313-332.