

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo deste documento será disponibilizado somente a partir de 08/07/2028.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE MEDICINA VETERINÁRIA E ZOOTECNIA

**AVALIAÇÃO BIOMECÂNICA DO FÊMUR E ÚMERO EM
COELHOS**

VINICIUS DOS SANTOS ROSA

Botucatu – SP
2026

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE MEDICINA VETERINÁRIA E ZOOTECNIA

**AVALIAÇÃO BIOMECÂNICA DO FÊMUR E ÚMERO EM
COELHOS**

VINICIUS DOS SANTOS ROSA

Dissertação apresentada junto ao Programa de
Pós-Graduação em Biotecnologia Animal para
a obtenção do título de Mestre

Orientadora: Prof.^a Titular Sheila Canevese Rahal

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo José Carbonari

R788a	Rosa, Vinicius dos Santos Avaliação biomecânica do fêmur e úmero em coelhos / Vinicius dos Santos Rosa. -- Botucatu, 2026 65 p. : tabs., fotos Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Botucatu Orientadora: Prof.^a Titular Sheila Canevese Rahal Coorientador: Prof. Dr. Marcelo José Carbonari 1. Lagomorfo. 2. Flexão em três pontos. 3. Compressão axial. 4. Tenacidade. 5. Tomografia computadorizada. I. Título.
-------	--

Nome do autor: **Vinicius dos Santos Rosa**

TÍTULO: AVALIAÇÃO BIOMECÂNICA DO FÊMUR E ÚMERO EM COELHOS

Data da defesa: 08/07/2026

COMISSÃO EXAMINADORA

Profa. Titular Sheila Canevese Rahal

Presidente da banca e orientadora

Departamento de Cirurgia Veterinária e Reprodução Animal

FMVZ – UNESP – Botucatu

Dra. Maria Jaqueline Mamprim

Membro interno

Departamento de Cirurgia Veterinária e Reprodução Animal

FMVZ – UNESP – Botucatu

Dra. Fátima Maria Caetano Caldeira

Membro externo

Departamento de Cirurgia

FMVZ/USP

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), processos no. 2023/16693-7, no. 2024/21341-5, e no. 2025/07151-1 - PCD – CCD).

À FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), convênio número 01.12.0530.00.

Agradeço primeiramente a Deus por me abençoar sempre, também agradeço à minha família, minha noiva Shaiene, meus pais Antonio Carlos e Nilda, meus avós Davi, Lair e Itália por todo o apoio em todos esses anos de estudo. Agradeço ainda à minha orientadora Prof. Dra. Sheila Canevese Rahal por me guiar durante todo este trajeto e a Guilherme Rech Cassanego por toda a ajuda na realização deste trabalho e por toda a parceria enquanto estive em Botucatu.

Sumário

LISTA DE FIGURAS.....	V
LISTA DE TABELAS.....	Vi
Resumo	Viii
Abstract	Ix
CAPÍTULO 1	10
1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO DA LITERATURA	13
2.1 Osso e estudos biomecânicos.....	14
2.2 Testes biomecânicos no osso inteiro.....	16
2.3 Densitometria indireta por Unidades Hounsfield.....	20
3 REFERÊNCIAS	22
CAPÍTULO 2	26
Artigo científico.....	27
ANEXO	65

Lista de Figuras

Figura 1. Figura esquemática da segmentação anatômica do fêmur (a) e do posicionamento das regiões de interesse (ROIs) corticais no corte transversal da diáfise (b).....	30
Figura 2 - Fêmur (vista medial) (a) e úmero (vista cranial) (b) de coelhos, posicionados para o ensaio de flexão em três pontos.....	31
Figura 3 - Vista caudal do fêmur (a) e do úmero (b) de coelhos, posicionados para o ensaio de compressão axial excêntrica.....	32
Figura 4 - Vista lateral do úmero de coelho, apresentado a perfuração no centro da diáfise.....	33

Lista de Tabelas

Tabela 1. Valores das unidades Hounsfield obtidos em imagens de tomografia computadorizada da diáfise femoral de coelhos, nos segmentos proximal, médio e distal.....	36
Tabela 2. Valores das unidades Hounsfield obtidos em imagens de tomografia computadorizada da diáfise umeral de coelhos, nos segmentos proximal, médio e distal.....	37
Tabela 3. Valores do ensaio de flexão em três pontos, realizado em fêmures de coelhos.....	38
Tabela 4. Valores do ensaio de flexão em três pontos, realizado em úmeros de coelhos.....	39
Tabela 5. Valores das unidades Hounsfield obtidos em imagens de tomografia computadorizada da diáfise femoral de coelhos, nos segmentos proximal, médio e distal.....	41
Tabela 6. Valores das unidades Hounsfield obtidos em imagens de tomografia computadorizada da diáfise umeral de coelhos, nos segmentos proximal, médio e distal.....	42
Tabela 7. Valores do teste de compressão axial realizado em fêmures de coelhos.....	43
Tabela 8. Valores do teste de compressão axial realizado em úmero de coelhos.....	44
Tabela 9. Valores das unidades Hounsfield obtidos em imagens de tomografia computadorizada da diáfise femoral de coelhos, nos segmentos proximal, médio e distal.....	46
Tabela 10. Valores das unidades Hounsfield obtidos em imagens de tomografia computadorizada da diáfise umeral de coelhos, nos segmentos proximal, médio e distal.....	47

Tabela 11. Valores do teste de tenacidade realizado em fêmures de coelhos.....	48
Tabela 12. Valores do teste de tenacidade realizado em úmeros de coelhos.....	49
Tabela 13. Comparação dos dados do ensaio de flexão em três pontos entre fêmur (n=8) e úmero (n=8) de coelhos.....	51
Tabela 14. Comparação dos dados do ensaio de compressão axial entre fêmur (n=8) e úmero (n=8) de coelhos.....	52
Tabela 15. Comparação dos dados do ensaio de tenacidade entre fêmur (n=8) e úmero (n=8) de coelhos.....	53
Tabela 16. Valores das unidades Hounsfield obtidos em imagens de tomografia computadorizada da diáfise umeral de coelhos, nos segmentos proximal, médio e distal.....	54
Tabela 17. Comparação entre fêmur e úmero de coelhos para os valores de HU obtidos na tomografia computadorizada para os segmentos proximal, médio e distal.....	54

ROSA, V.S. Avaliação biomecânica do fêmur e úmero em coelhos. Botucatu, 2026. 65p. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia Animal) – Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Campus de Botucatu, Universidade Estadual Paulista.

RESUMO

O estudo teve por objetivo avaliar as características biomecânicas dos ossos do fêmur e do úmero de coelhos por meio de diferentes testes biomecânicos de carregamento monotônico (flexão em três pontos, compressão axial e tenacidade). Foram utilizados ossos provenientes de coelhos adultos, fêmeas inteiras, da linhagem Norfolk do grupo genético Botucatu. Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de testes, equipada com uma célula de carga de 5 kN. Para cada teste biomecânico foram utilizadas oito amostras, selecionadas por meio de sorteio. No ensaio de flexão em três pontos do osso inteiro, a força máxima (N) e a força no escoamento (N) foram significativamente maiores no fêmur. Por outro lado, a tensão à flexão no escoamento (Mpa) apresentou valores significativamente superiores no úmero. No ensaio de compressão axial excêntrica foram detectadas diferenças na máxima tensão (MPa) e na tensão no escoamento (compensação de 0,2%) (MPa), que foram maiores para o úmero, e na deformação no escoamento (compensação de 0,2%) (%), que foi maior no fêmur. No ensaio de tenacidade foram observadas diferenças estatisticamente significativas para a deformação na força máxima (%), deformação no escoamento (%) e deformação na ruptura (%), todas com valores superiores no fêmur. Por sua vez, o úmero apresentou valores significativamente maiores de tensão na força máxima (Mpa), tensão no escoamento (Mpa) e tensão na ruptura (Mpa), bem como no módulo de Young (kN). Conclui-se que o fêmur do coelho apresentou maior capacidade de suportar forças e maior deformação, enquanto o úmero apresentou maiores valores de tensão e maior rigidez, evidenciando diferenças biomecânicas entre esses ossos. Além disso, a pesquisa relaciona-se ao ODS 3 ao contribuir para a promoção da saúde desses animais.

Palavras-chave: Lagomorfo; Flexão em três pontos; Compressão axial; Tenacidade.

ROSA, V.S. Biomechanical evaluation of the femur and humerus in rabbits. Botucatu, 2026. 65p. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia Animal) – Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Campus de Botucatu, Universidade Estadual Paulista.

SUMMARY

This study aimed to evaluate the biomechanical properties of rabbit femur and humerus bones using various monotonic loading tests (three-point bending, axial compression and toughness). Adult intact female Norfolk strain rabbits were used. Tests were conducted on a universal testing machine equipped with a 5 kN load cell. For each biomechanical assay, eight randomly selected samples were tested. In the three-point bending test of whole bones, both maximum force (N) and yield strength (0.2% offset) (N) were significantly higher in the femur, whereas flexural stress at yield (0.2% offset) (MPa) was significantly greater in the humerus. In the eccentric axial compression test, maximum stress (MPa) and yield stress (0.2% offset) (MPa) were higher in the humerus, while yield strain (0.2% offset) (%) was greater in the femur. In the toughness test, maximum flexural strain (%), flexural strain at yield (0.2% offset) (%), flexural strain at break (%) were significantly higher in the femur. Conversely, the humerus exhibited higher values for maximum flexural stress (MPa), flexural stress at yield (0.2% offset) (MPa), flexural stress at fracture (MPa), maximum slope (automatic Young's method) (kN). In conclusion, the rabbit's femur demonstrated a greater capacity to withstand forces and a higher ability to deform, whereas the humerus showed higher stress values and greater stiffness. These findings highlight distinct biomechanical differences between these two types of long bones in rabbits. Moreover, this study is aligned with ODS 3, as it contributes to advancing the health of these animals.

Key words: Lagomorph; Three-point bending; Axial compression; Toughness.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O coelho (*Oryctolagus cuniculus*) é amplamente utilizado como modelo experimental em pesquisas biomédicas, incluindo a área de ortopedia e implantes dentários, devido à sua rápida maturação esquelética, facilidade de manejo e custo relativamente baixo (Arora et al., 2011; Macedo et al., 2019). Apesar de seu uso já estar bem estabelecido na literatura, a compreensão detalhada das propriedades biomecânicas e da resistência dos ossos é essencial para validar e aprimorar sua aplicação como modelo experimental em estudos ortopédicos (White et al., 1974; Paavolainen, 1978; An et al., 1996; Shunmugasamy et al., 2010; Haider et al., 2021).

O osso apresenta uma relação complexa entre propriedades, geometria e comportamento mecânico, cuja compreensão é essencial para a prevenção de fraturas, para o entendimento da resposta do tecido ósseo a diferentes tipos de carga e para a avaliação dos efeitos de doenças ou tratamentos sobre a integridade estrutural (Sharir et al., 2008). Entre os métodos de avaliação, os ensaios de flexão e de compressão axial destacam-se como ferramentas fundamentais para a caracterização das propriedades mecânicas de ossos longos (An et al., 1996; Sharir et al., 2008; Donnelly, 2011; Haider et al., 2021). Enquanto os ensaios de flexão em três ou quatro pontos são frequentemente utilizados para determinar a resistência e o módulo de elasticidade do tecido ósseo sob cargas transversais, o ensaio de compressão axial permite avaliar a capacidade de suporte de carga e a rigidez estrutural (Sharir et al., 2008; Bailey e Vashishth, 2018).

A aplicação desses testes possibilita uma análise detalhada da integridade estrutural óssea, fornecendo parâmetros essenciais para a compreensão do comportamento biomecânico dos ossos de coelhos, aspecto relevante tanto do ponto de vista experimental quanto considerando o fato de

que coelhos também são mantidos como animais de estimação não convencionais. Nesse contexto, a dissertação foi organizada em dois capítulos: o primeiro relativo à introdução e à revisão da literatura, e o segundo destinado à apresentação do artigo científico.

O estudo se enquadra no ODS 3 (Objetivo de Desenvolvimento Sustentável) – Saúde e Bem-Estar –, na medida em que busca promover e assegurar melhores condições de bem-estar aos coelhos, espécie amplamente utilizada tanto em pesquisas científicas quanto mantida como animal de estimação não convencional.

REFERÊNCIAS

3 REFERÊNCIAS (Formato AMA)

An YH, Kang Q, Friedman RJ. Mechanical symmetry of rabbit bones studied by bending and indentation testing. *Am J Vet Res*. 1996;57(12):1786-1789.

Arora H, Nafria A, Kanase A. Rabbits as animal models in contemporary implant biomaterial research. *World J Dent*. 2011;2(2):129-134.

Aspden RM. Mechanical testing of bone *ex vivo*. In: Helfrich MH, Ralston SH. *Bone research protocols*. 2ed. New Jersey: Humana Press, 2003. chap.27. p.369-379

Bailey S, Vashishth D. Mechanical characterization of bone: state of the art in experimental approaches-what types of experiments do people do and how does one interpret the results? *Curr Osteoporos Rep*. 2018;16(4):423-433.

Caeiro JR, González P, Guede D. Biomechanics and bone (and II): trials in different hierarchical levels of bone and alternative tools for the determination of bone strength. *Rev Osteoporos Metab Miner*. 2013;5(2):99-108. doi:10.4321/S1889-836X2013000200007

Cordey J. Introduction: basic concepts and definitions in mechanics. *Injury*. 2000;31 Suppl 2:S-B1-13.

Donnelly E. Methods for assessing bone quality: a review. *Clin Orthop Relat Res*. 2011;469(8):2128-2138.

Guede D, Gonzáles P, Caerio JR. Biomechanics and bone (1): basic concepts and classical mechanical trials. *Rev Osteoporos Metab Miner.* 2013;5(1):43-50.

Haider IT, Lee M, Page R, Smith D, Edwards WB. Mechanical fatigue of whole rabbit-tibiae under combined compression-torsional loading is better explained by strained volume than peak strain magnitude. *J Biomech.* 2021;122:110434

Macedo AS, Feitosa CC, Kawamoto FYK, Marinho PVT, Dal-Bó IS, Monteiro BF, Prado L, Bregadioli T, Diamante GAC, Ferrigno CRA. Animal modeling in bone research-should we follow the white rabbit? *Animal Model Exp Med.* 2019;2(3):162-168.

Meulen MC, Jepsen KJ, Mikić B. Understanding bone strength: size isn't everything. *Bone.* 2001;29(2):101-104. doi:10.1016/S8756-3282(01)00493-2

Oliveira DC, Costa LAVS, Teixeira MW, Cardoso MJL, Costa FS. Densitometria óssea em gatos hípidos por tomografia computadorizada quantitativa. *Arq Bras Med Vet Zootec.* 2012;64(3):593-598. doi:10.1590/S0102-09352012000300010

Paavolainen P. Studies on mechanical strength of bone. I. Torsional strength of normal rabbit tibio-fibular bone. *Acta Orthop Scand.* 1978;49(6):497-505.

Schreiber JJ, Anderson PA, Rosas HG, Buchholz AL, Au AG. Hounsfield units for assessing bone mineral density and strength: a tool for osteoporosis management. *J Bone Joint Surg Am.* 2011;93(11):1057-1063. doi:10.2106/JBJS.J.00160

Sevil F, Kara ME. The effects of ovariectomy on bone mineral density, geometrical, and biomechanical characteristics in the rabbit femur. *Vet Comp Orthop Traumatol.* 2010;23(1):31-36.

Sharir A, Barak MM, Shahar R. Whole bone mechanics and mechanical testing. *Vet J.* 2008;177(1):8-17.

Shunmugasamy VC, Gupta N, Coelho PG. High strain rate response of rabbit femur bones. *J Biomech.* 2010;43(15):3044-3050.

Turner CH, Burr DB. Basic biomechanical measurements of bone: a tutorial. *Bone.* 1993;14(4):595-608.

Turner CH, Burr DB. Techniques for bone mechanics. In: Cowin SC. *Bone mechanics handbook*. 2ed. Boca Raton: CRC Press. 2001.p.7-1-7-33.

White AA 3rd, Panjabi MM, Hardy RJ. Analysis of mechanical symmetry in rabbit long bones. *Acta Orthop Scand.* 1974;45(3):328-336.