

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

GUILHERME MARCUCCI PERON

**ADAPTAÇÕES À HIPERCARNIVORIA EM CANÍDEOS: UM ESTUDO DO
TRENCHANT HEEL A PARTIR DE ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS**

**Ilha Solteira
2023**

GUILHERME MARCUCCI PERON

**ADAPTAÇÕES À HIPERCARNIVORIA EM CANÍDEOS: UM ESTUDO DO
TRENCHANT HEEL A PARTIR DE ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira –
Unesp como parte dos requisitos para
obtenção do título de Bacharel em Ciências
Biológicas.

Nome do orientador

Prof. Dr. Felipe Chinaglia Montefeltro

Nome do coorientador

Juan Vitor Ruiz

FICHA CATALOGRÁFICA

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Peron, Guilherme.

P453a Adaptações à hipercarnivoria em canídeos: um estudo do trenchant heel a partir de análise de elementos finitos / Guilherme Peron. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
31 f. : il.

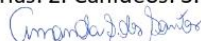
Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Ciências Biológicas) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2022

Orientador: Felipe Chinaglia Montefeltro

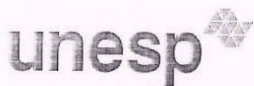
Co-orientador: Juan Vitor Ruiz

Inclui bibliografia

1. Adaptações dentárias. 2. Canídeos. 3. Trenchant heel.


Amanda Sertori dos Santos
Bibliotecária - CRB10-9001
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao
Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

FOLHA DE APROVAÇÃO



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira

ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

"ADAPTAÇÕES À HIPERCARNIVORIA EM CANÍDEOS: UM ESTUDO DO TRENCHANT HEEL A PARTIR DE ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS"

GUILHERME MARCUCCI PERON

REGULAMENTO SOBRE A AVALIAÇÃO:

Artigo 25º - § 2º A apresentação pública do trabalho de TCC deverá ser de no mínimo 20 (vinte) minutos e máxima de 40 (quarenta) minutos. Após um intervalo de 5 (cinco) minutos, haverá a arguição do Trabalho pelos examinadores. O tempo de arguição, será de até 15 (quinze) minutos para cada examinador, e até 15 (quinze) minutos o tempo para a resposta do(a) aluno(a) a cada examinador ou no caso de se optar pelo diálogo o tempo conjunto entre examinador e acadêmico(a) será de no máximo 30 (trinta) minutos.

Artigo 24º - No julgamento do TCC, a banca examinadora deverá avaliar a apresentação oral, escrita e a defesa do trabalho durante a arguição. O conceito final será APROVADO(A) ou REPROVADO(A).

COMISSÃO EXAMINADORA

1º EXAMINADOR (Orientador-Presidente)

Nome: Prof. Dr. Felipe Chinaglia Montefeltro

2º EXAMINADOR

Nome: Ms. Gabriel Gonzalez Barbosa

3º EXAMINADOR

Nome: Dr. Giovanne Mendes Cidade

CONCEITO

(X) Aprovado(a)

() Reprovado(a)

Ilha Solteira-SP, 14 de dezembro de 2023.

Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Cursos: Agronomia, Ciências Biológicas, Eng. Civil, Eng. Elétrica, Eng. Mecânica, Física, Matemática e Zootecnia.
Avenida Brasil Centro, 56 - Caixa Postal 31 CEP 15385-000 Ilha Solteira São Paulo - Brasil
tel (18) 3743 1100 fax (18) 3742 2735 stcom@adm.feis.unesp.br www.feis.unesp.br

Dedico este trabalho a todos aqueles que não desistiram, não importando o tamanho de suas adversidades, e que encontraram forças para seguir em frente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Felipe Chinaglia Montefeltro e ao meu coorientador Juan Vitor Ruiz, por terem me despertado o interesse na área de Paleontologia e Evolução, por todo auxílio e paciência ao longo do desenvolvimento de projetos e por me permitir realizar pesquisas junto ao laboratório de paleontologia e evolução de Ilha Solteira (LAPEISA).

Ao Paulo Roberto pelo imenso apoio e auxílio, durante o desenvolvimento do projeto e pesquisa.

A PROPe – Pró-Reitoria de Pesquisa, a UNESP/FEIS, e seu corpo docente e técnico que estiveram ligados ao meu aprendizado e experiências vivenciadas ao longo de toda a graduação.

RESUMO

A Família Canidae, ao longo da existência de sua linhagem evolutiva alcançou ampla variedade de dietas. Porém, poucas espécies podem ser consideradas hipercarnívoras dentre os membros da linhagem, ou seja, com dieta composta de ao menos 70% de carne de outros vertebrados. A dieta hipercarnívora por ser complexa e altamente especializada, em geral, está relacionada às modificações morfológicas e estruturais que proporcionaram maior eficácia nos comportamentos de predação. Dentre estas características, podemos citar: aumento do tamanho corporal, maior robustez das estruturas ósseas, alteração no tamanho e no formato de dentes. Em Canidae, pela presença de modificações somente em algumas espécies em tempos específicos, podemos considerar raras as espécies hipercarnívoras no grupo. Atualmente ainda é possível encontrar adaptações em espécies viventes associadas à hipercarnivoria, como o caso da adaptação dentária conhecida como *trenchant heel* na espécie *Speothos venaticus* conhecida por seu nome popular cachorro-vinagre. Esta estrutura é uma modificação nos dentes carniceiros inferiores (m1) que possibilitaria a melhor apreensão e consumo da carne, devido a alteração de formato tubercular original, para um novo formato laminar que facilitaria o corte da carne e ossos. Porém a sua eficácia na espécie ainda não foi objetivamente testada. Utilizando a técnica de Análise de Elementos Finitos, foi possível recriar digitalmente e assim modelar diferentes cenários de aplicação de forças, possibilitando o estudo do desenvolvimento das adaptações à hipercarnivoria do *trenchant heel* de *Speothos venaticus*, e comparar a sua eficácia em canídeos viventes sem esta característica.

Palavras-chave: Adaptações dentárias; Canídeos; *Trenchant heel*;

ABSTRACT

The members of Canidae family, throughout the existence of its evolutionary lineage, has presented a wide diversity of different diets. However, only a few species among the members of this lineage can be considered hypercarnivores, meaning they have a diet composed of at least 70% of flesh from other vertebrates. The hypercarnivorous diet, being complex and highly specialized, is generally associated with morphological and structural modifications that enhance efficiency in predatory behaviors. Among these characteristics, we can mention: an increase in body size, greater robustness of bone structures, and alterations in the size and shape of teeth. In Canidae, hypercarnivorous species are considered rare within the group due to modifications occurring in only some species at specific times. Currently, adaptations related to hypercarnivory can still be found in living species, such as the dental adaptation known as the *trenchant heel* in the species *Speothos venaticus*, commonly known as the bush dog. This structure represents a modification in the lower carnassial teeth (m1) that would enhance the grasping and consumption of flesh and bones. It involves in a change from the original squared shape to a new bladelike shape that facilitates cutting and consumption. However, its effectiveness in the species has not been objectively tested. By utilizing the Finite Element Analysis technique, it has been possible to digitally recreate and model different scenarios of force application, enabling the study of the development of adaptations to hypercarnivory in the trenchant heel of *Speothos venaticus*. This allows for a comparison of its efficiency in living canids without this characteristic.

Keywords: Teeth adaptations; Canids; *Trenchant heel*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Diferentes formatos de dentições e adaptações dentários ao longo da linhagem evolutiva dos canídeos.....	12
Figura 2	- Adaptação <i>trenchant heel</i> na espécie <i>Speothos venaticus</i> , comparada ao primeiro molar inferior da espécie <i>Canis latrans</i>	13
Figura 3	- Adaptação <i>trenchant heel</i> na espécie <i>Speothos venaticus</i> , comparada ao primeiro molar inferior da espécie <i>Canis lupus</i> , recriadas digitalmente.....	14
Figura 4	- Etapas de aplicação da FEA.....	17
Figura 5	- Segmentação e diferenciação de estruturas ósseas.....	18
Figura 6	- Conversão de modelos simples em modelos "mesh".....	20
Figura 7	- Cenários com diferentes distribuições de forças.....	23
Figura 8	- Adaptação <i>trenchant heel</i> simulada na espécie <i>Canis lupus</i>	24
Figura 9	- Resultados de aplicação de cenários.....	25
Figura 10	- Resultados obtidos após aplicação de diferentes cenários.....	26
Figura 11	- Resultados obtidos após aplicação de cenários com a presença e ausência da adaptação <i>trenchant heel</i> na espécie <i>Canis lupus</i> e <i>Urocyon cinereoargenteus</i>	28
Figura 12	- Resultados obtidos após aplicação de cenários com a presença e ausência da adaptação <i>trenchant heel</i> na espécie <i>Speothos venaticus</i>	29
Figura 13	- Gráficos com os resultados obtidos após aplicação de cenários com ausência e presença da adaptação <i>trenchant heel</i>	29

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Hipercarnivoria	11
1.2	Hipercarnivoria em canídeos	11
1.3	Análise de elementos finitos	14
1.4	Objetivos gerais	15
2	METODOLOGIA.....	15
2.1	Segmentação, separação e modelagem das estruturas	16
2.2	Conversão de modelos e criação de cenários	18
2.3	Cenários desenvolvidos e aplicados	20
2.4	Cenários de diferentes padrões de distribuição de força	21
2.5	Cenários com adaptação presente e simulada	22
2.6	Aplicação dos cenários e resultados	23
2.7	Coleta de resultados, médias e dados numéricos	24
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
3.1	Resultados obtidos nos cenários de distribuição de força	24
3.2	Resultados obtidos nos cenários de presença e ausência	26
4	CONCLUSÃO.....	30
5	REFERÊNCIAS.....	30

1. INTRODUÇÃO

1.1 Hipercarnivoria

A dieta hipercarnívora é definida por ser composta de ao menos 70% de carne de outros vertebrados (VALKENBURGH, 2007). Ao longo de diversas linhagens evolutivas, o grupo dos mamíferos apresentou modificações estruturais e fisiológicas em prol a comportamentos de caça para dietas hipercarnívoras, como o desenvolvimento ósseo mais robusto, aumento da caixa craniana, encurtamento do trato intestinal, desenvolvimento e aumento de tamanho corpóreo, entre outras, que possibilitaram maior eficácia (VALKENBURGH, 2007).

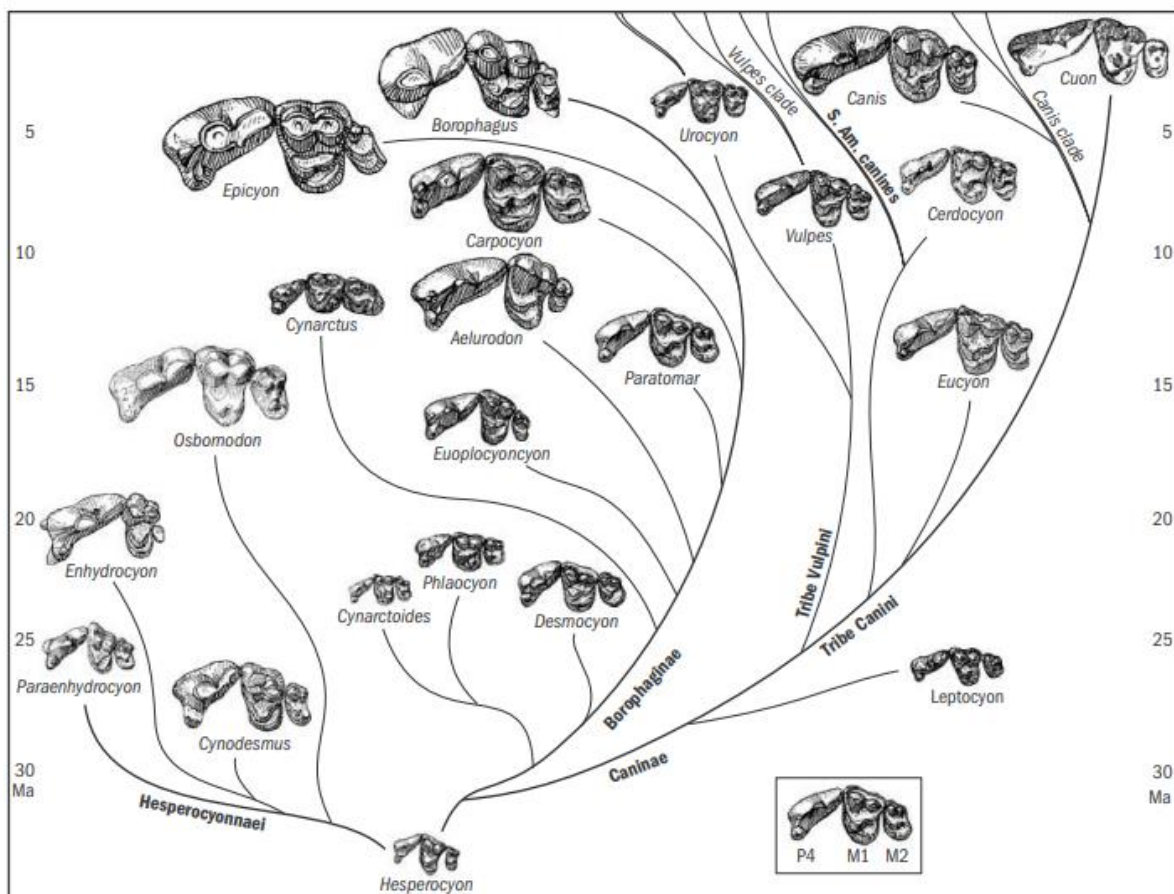
Na ordem Carnivora observamos uma modificação específica no quarto pré-molar superior e no primeiro molar inferior em dentes carniceiros, atribuídas como uma característica *proxy* à hipercarnivoria no grupo. Esta adaptação resulta em uma superfície mais bem desenvolvida e com um aspecto laminar, possibilitando o melhor cisalhamento da carne e rompimento da musculatura de presas. (VALKENBURGH, 1991; JENKINS, 2002; HOLLYDAY; STEPPAN, 2003).

1.2 Hipercarnivoria em canídeos

Ao longo de 40 milhões de anos da existência da linhagem dos canídeos (Canidae, Linnaeus, 1758), este grupo desenvolveu algumas vezes independentemente a dieta hipercarnívora ((VALKENBURGH, 1991). Ligadas a esta dieta, estão associadas modificações que permitiram a melhor funcionalidade e eficácia de diferentes estruturas craniomandibulares. Os canídeos são tradicionalmente divididos em três diferentes clados: Hesperocyoninae e Borophaginae, ambos extintos, e o Caninae, com espécies viventes (WANG, 2008). Embora estes clados tenham surgido em períodos temporais relativamente próximos, durante o fim do Eoceno, a hipercarnivoria teria se desenvolvido individualmente em cada um dos clados (VALKENBURGH, 1991). Atualmente, quatro espécies modernas viventes do clado Caninae possuem tal dieta, sendo elas o lobo-cinzento (*Canis lupus*), o cachorro-vinagre (*Speothos venaticus*), o mabeco (*Lycaon pictus*) e o dhole (*Cuon alpinus*).

Dentre as diversas adaptações dentárias que ocorreram durante toda a linhagem evolutiva dos canídeos vivos e fósseis (FIGURA 1), destaca-se o *trenchant heel*, uma adaptação nos dentes molares inferiores (m1). Esta modificação resultou da transformação de um agrupamento de cúspides chamada de Talonido, presente na maior parte dos Canidae, para o alongamento de uma das cúspides, o Hipoconido, e diminuição das demais. Na condição *trenchant heel*, o formato é modificado em uma estrutura laminar, diferenciando-se do formato tubercular original, além da redução das cúspides Metaconido e Hipoconido (VALKENBURGH, 1991) (FIGURA 2 e 3).

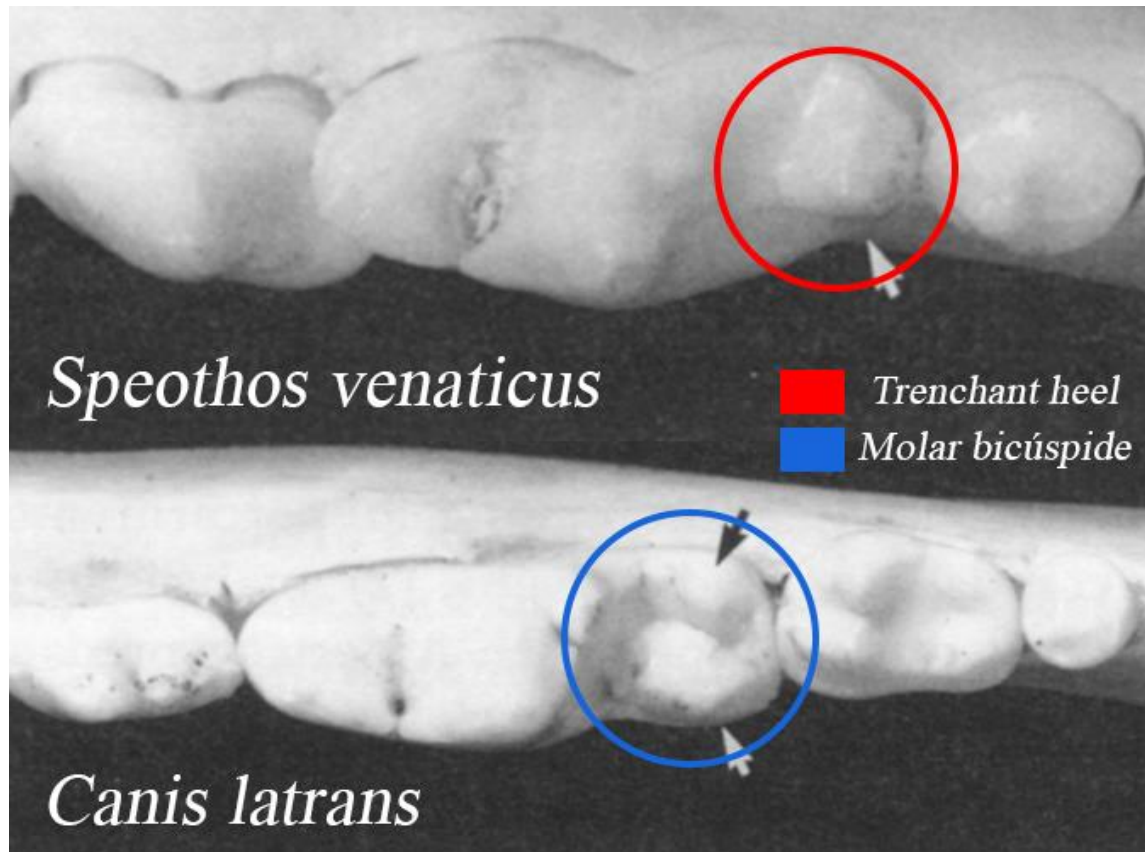
Figura 1: Diferentes formatos de dentações e adaptações dentárias ao longo da linhagem evolutiva dos canídeos.



Fonte: Imagem retirada da Plataforma "Palaeocast" disponível em:

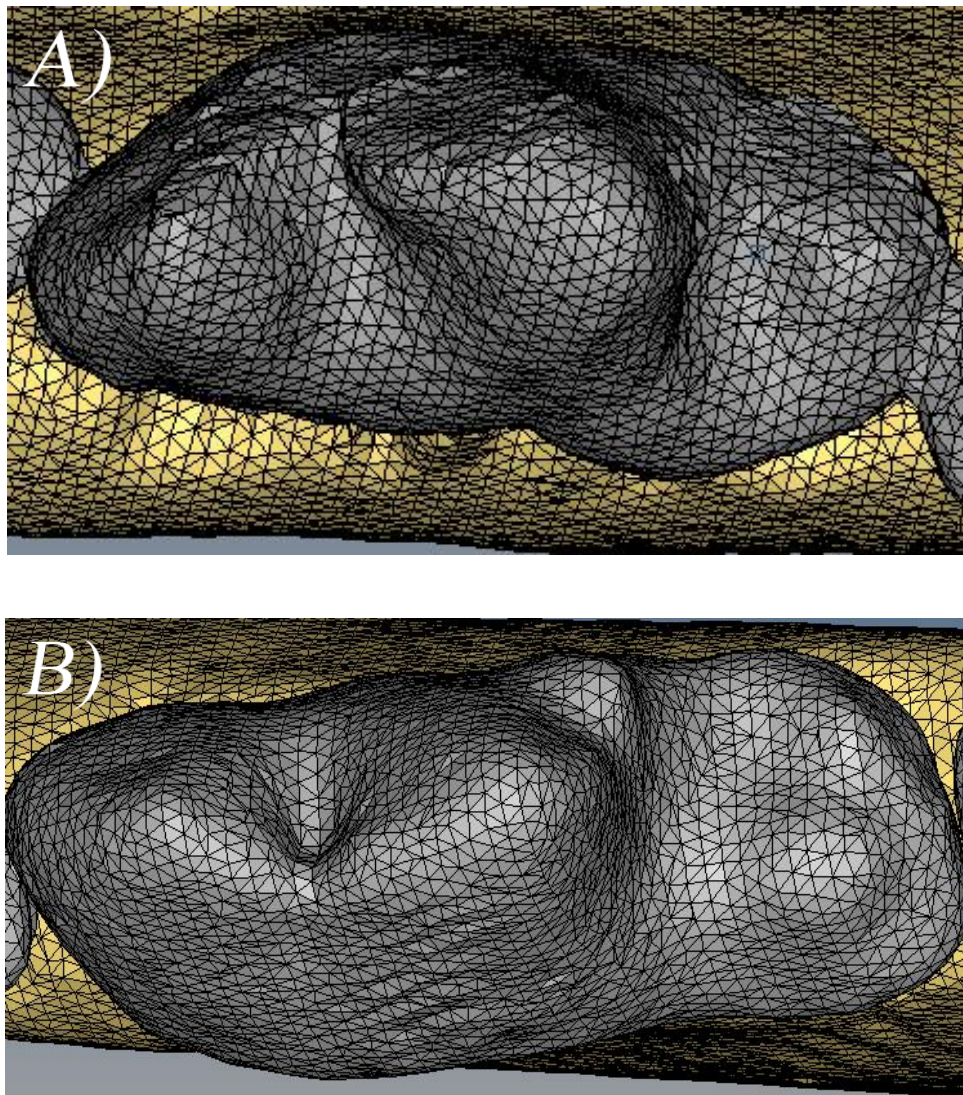
<http://www.palaeocast.com/episode-32-canids>

Figura 2: Adaptação trenchant heel (circundada em vermelho) na espécie *Speothos venaticus* (A), comparada a um primeiro molar inferior (circundado em azul) (m1) da espécie de coiole *Canis latrans*.



Fonte: Retirada da literatura (VALKENBURGH, 1991), e alterada pelo autor

Figura 3: Adaptação *trenchant heel* na espécie *Speothos venaticus* (A), comparada a um primeiro molar inferior (m1) da espécie *Canis lupus*, ambas modeladas digitalmente através do software Hypermesh



Fonte: Desenvolvida pelo autor

Com a presença do *trenchant heel* e seu formato laminar seria possível a melhor aplicação e distribuição de força na mandíbula, resultando na melhor apreensão de presas e o melhor rompimento e cisalhamento da carne (VALKENBURGH, 1991). Entretanto, a presença do *trenchant heel* pode ser considerada rara como um todo quando considerada a linhagem evolutiva dos

canídeos, sendo encontrada por registros fósseis, em algumas espécies durante o Oligoceno Tardio no continente Norte-Americano e partir do Pleistoceno no continente Sul-Americano (VALKENBURGH 1991).

Em relação as espécies viventes, esta característica pode ser identificada somente em poucas espécies de canídeos viventes, no mabeco (*Lycaon pictus*), da África, no dhole (*Cuon alpinus*), da Ásia, e no cachorro-vinagre (*Speothos venaticus*) da América do Sul, o único canídeo sul-americano que possui uma dieta hipercarnívora (BEISIEGEL et al, 2002, Ruiz et al., 2022).

No entanto, a eficácia desta adaptação nunca foi objetivamente testada através da perspectiva biomecânica. Este trabalho trata do primeiro estudo biomecânico da real influência da presença do *trenchant heel* em relação dos M1 não modificados nas espécies atuais de Canidae.

1.3 Análise de Elementos Finitos

A Análise de Elementos Finitos (do inglês *Finite Element Analysis*, FEA) consiste em uma técnica utilizada para analisar e obter possíveis respostas de uma estrutura, à diferentes forças aplicadas em ambiente virtual (ROYLANCE, 2001). Quando utilizada na zoologia, esta modelagem possibilita a aplicação de diversos testes em cenários desenvolvidos em estruturas recriadas e simuladas, permitindo assim uma análise e comparação direta entre diferentes respostas. Sua aplicação na zoologia e ecologia pode ainda ser considerada como recente, tendo apenas se popularizado nas últimas décadas, porém tem se demonstrado uma ferramenta altamente eficaz e importante para a área, devido a possibilidade da aplicação em táxons extintos, e por se tratar de uma técnica não invasiva, sendo muito bem utilizada em análises biomecânicas de diferentes pesquisas biológicas, (RAYFIELD 2007; DUMONT et al. 2005; SHARP et al. 2005; BELL et al 2009; TRIVEDI et al. 2014, RUIZ et al., 2022).

Neste trabalho, aplicamos a análise de elementos finitos para testar a influência e eficácia da adaptação *trenchant heel* na espécie *Speothos venaticus*, e em outras espécies de canídeos viventes com a mesma dieta, mas sem a adaptação (*Canis lupus*) e em uma espécie mesocarnívora também sem esta adaptação (*Urocyon cinereoaregentus*), podendo-se analisar as respostas da adaptação em diferentes padrões de forças modelados.

1.4 Objetivos gerais

Baseando-se na análise de elementos finitos, objetiva-se avaliar quantitativamente os resultados e médias de estresse de von Mises, obtidos pela presença da adaptação *trenchant heel*, distribuição de força em posição equivalente e potencialmente homóloga, e a aplicação de diferentes padrões de força, em cenários construídos aplicados a estruturas craniais e mandibulares de diferentes espécies de canídeos modernos. Deste modo, hipotetizamos uma maior eficácia em espécies com a presença do *trenchant heel* (*Speothos venaticus*) em relação as demais espécies testadas (*Canis lupus* e *Urocyon cinereoaregentus*).

2. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do projeto, foram selecionadas três diferentes espécies de canídeos modernos, com base em suas diferentes dietas, e na ausência e presença da adaptação *trenchant heel* (TABELA 1).

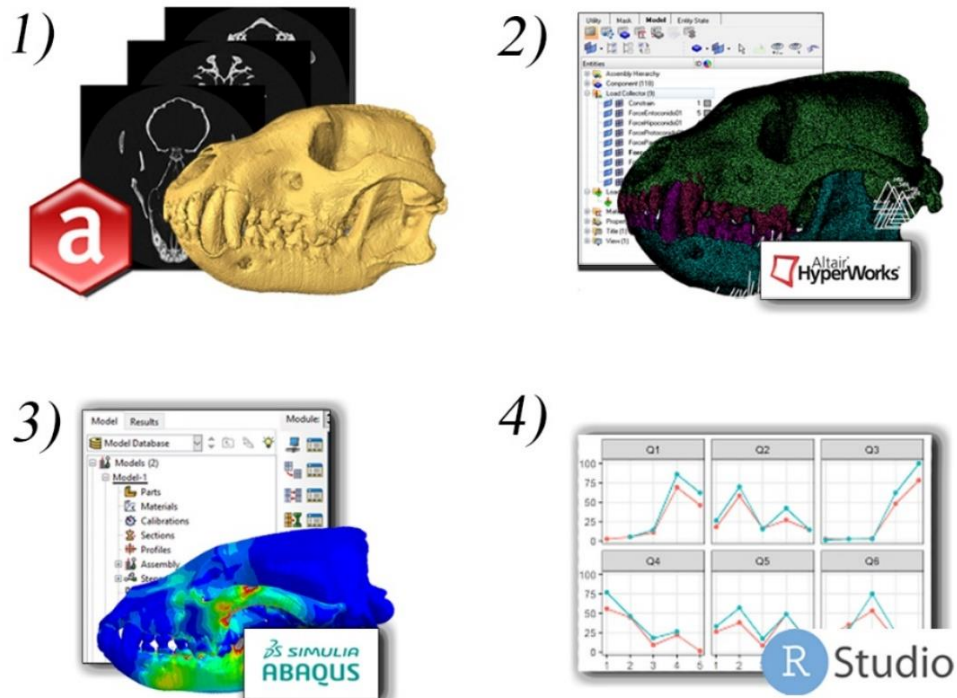
Tabela 1. Espécies de canídeos selecionadas

Espécie	Dieta	<i>Trenchant heel</i>
<i>Speothos venaticus</i>	Hipercarnívoro	Presente
<i>Canis lupus</i>	Hipercarnívoro	Ausente
<i>Urocyon cinereoaregentus</i>	Mesocarnívoro	Ausente

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

A aplicação da FEA, foi realizada através de diferentes etapas (FIGURA 4) utilizando-se os *softwares*: Amira™, HyperMesh™, Abaqus™ e RStudio™, além da utilização de arquivos, bancos de imagens de tomografias de canídeos. As etapas de aplicação foram divididas em: **1)** Segmentação, separação e modelagem das estruturas; **2)** Conversão de modelos e criação de cenários; **3)** Aplicação dos cenários e extração de dados; **4)** Coleta de dados e aplicação estatística (FIGURA 4).

Figura 4 Etapas de aplicação da FEA (1- Tomografias incorporadas no software Amira™ 2- Conversão de modelos Mesh no software HyperMesh™; 3- Aplicação de cenários no software Abaqus™; 4- Aplicação estatística no software RStudio™.



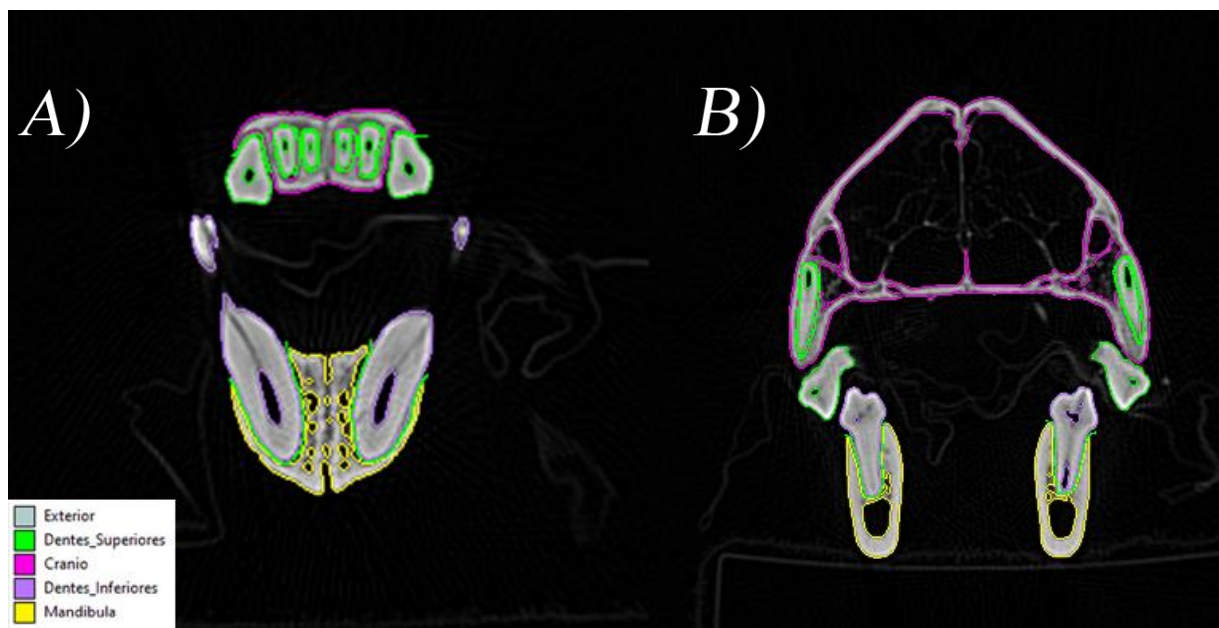
Fonte: Desenvolvido pelo autor.

2.1 Segmentação, individualização e modelagem das estruturas

As tomografias computadorizadas dos espécimes de *Speothos venaticus* e *Urocyon cinereoargenteus* foram obtidas através da plataforma digital *digimorph.org*, produzidas originalmente na Instalação de Raio-X de Alta Resolução da Universidade do Texas. Para o espécime de *S. venaticus* foi utilizado fatiamento com espessura de 0.31 mm, voltagem de 150kV e corrente de 160 μ A, enquanto para o espécime de *U. cinereoargenteus* foi utilizado fatiamento com espessura de 0.24 mm, voltagem de 120kV e corrente de 160 μ A. A tomografia do espécime de *Canis lupus* foi obtida da literatura (TSENG et al. 2016), disponibilizadas através da plataforma digital *morphosource.org*, produzidas originalmente no Centro Médico da Universidade da Califórnia em Los Angeles Utilizando fatiamento com espessura de 0.6mm, voltagem de 150kV e corrente de 198 μ A.

Para que fosse possível aplicar e analisar as forças extrínsecas, foram individualizadas e posteriormente recriadas de maneira digital as estruturas ósseas (crânio e mandíbula) e dentárias (dentição superior e inferior) pertencentes às espécies estudadas, a partir de múltiplas imagens tomográficas de crânios, mandíbulas e dentições de canídeos utilizando-se o software Amira 5.3.3 (Thermo Fisher Scientific) (FIGURAS 5a e 5b).

Figura 5a e 5b. Segmentação e diferenciação das estruturas dentárias e ósseas na espécie *Canis lupus* utilizando o software Amira 5.3.3.



Fonte: Desenvolvidas pelo autor.

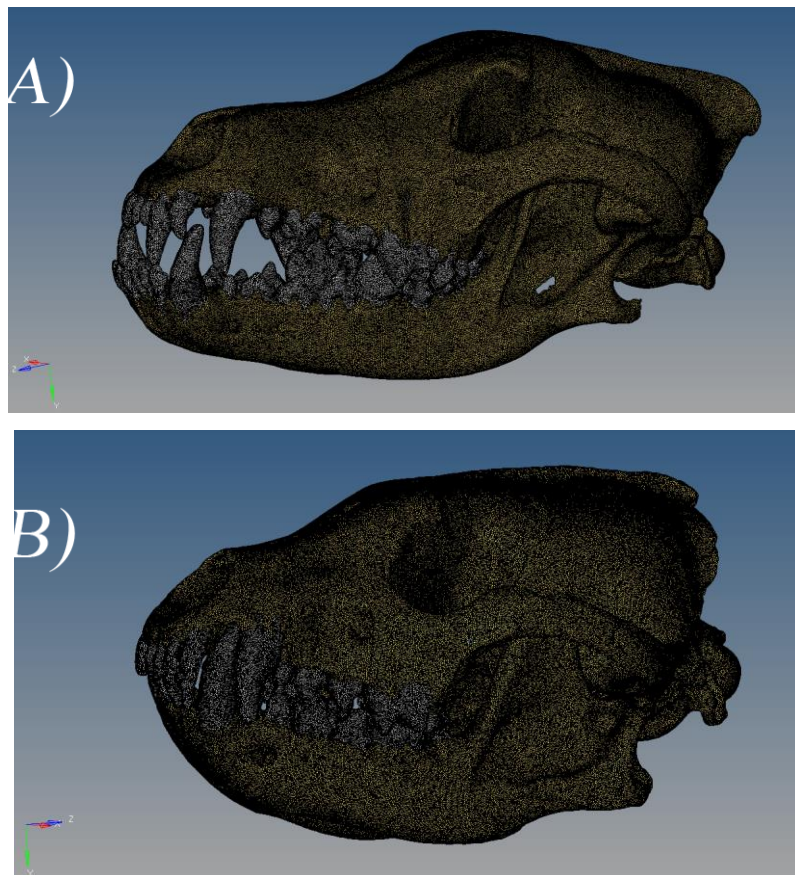
2.2 Conversão de modelos e criação de cenários

Para a segunda etapa da aplicação, os modelos previamente segmentados foram importados para o *software* Hypermesh™, onde foi realizada a conversão de modelos simples para modelos geométricos denominados “*tetramesh*” gerando diferentes valores para cada espécie testada (FIGURAS 6a e 6b), permitindo atribuir aos mesmos propriedades e características biológicas de materiais físicos. Com a utilização do *software* foram atribuídas as seguintes propriedades aos grupos de superfície (em que E equivale ao módulo de elasticidade medido em giga pascal, e ν equivale ao coeficiente de Poisson):

- Material Ossos ($E = 15.0 \text{ GPa}$, $\nu = .29$). Sendo aplicada nos grupamentos Mandíbula e Crânio;
- Material Dentes ($E = 60.4 \text{ GPa}$, $\nu = .31$). Sendo aplicada nos grupamentos Dentes Inferiores e Superiores.

Foram utilizadas propriedades de materiais de crocodilianos, devido ao conhecimento prévio de seus valores e de sua compatibilidade com os *softwares* e funcionalidade na aplicação de elementos finitos (MONTEFELTRO et al, 2020), sendo oriundos de testes e aplicações similares prévias.

Figura 6a e 6b. Conversão de modelos simples em modelos “*mesh*” nas espécies *Canis lupus* e *Speothos venaticus* respectivamente.



Fonte: Desenvolvidas pelo autor.

2.3 Cenários desenvolvidos e aplicados

Tendo a finalidade de demonstrar e comparar a eficácia e influência da adaptação *trenchant heel* nos diferentes táxons, assim como a influência de múltiplos padrões de distribuições de força em diferentes pontos, foram desenvolvidos diversos cenários (TABELA 2) nos quais foram simulados:

- Ausência e presença da adaptação *trenchant heel*;
- Simulação da estrutura adaptada em táxons onde ela não é presente através da distribuição de ponto de força em posição equivalente e potencialmente homóloga;
- Diferentes aplicações de padrões na distribuição de pontos de força;

Tabela 2. Cenários desenvolvidos.

Espécies	Cenários com Estruturas Naturais	Cenário com Estruturas e posição homóloga
<i>Canis lupus</i>	Força de 4000N aplicada e dividida em 3 pontos no m1 inferior	Força de 4000N aplicada em 1 ponto m1 inferior
		Força de 4000N aplicada em 4 pontos m1 inferior
<i>Speothos venaticus</i>	Força de 4000N aplicada e dividida em 4 pontos no m1 inferior	Força de 4000N aplicada em 1 ponto m1 inferior
		Força de 4000N aplicada em 3 pontos m1 inferior
<i>Urocyon cinereoargenteus</i>	Força de 4000N aplicada e dividida 3 pontos no m1 inferior	Força de 4000N aplicada em 1 ponto m1 inferior
		Força de 4000N aplicada em 4 pontos m1 inferior

Fonte: Elaboração do próprio autor.

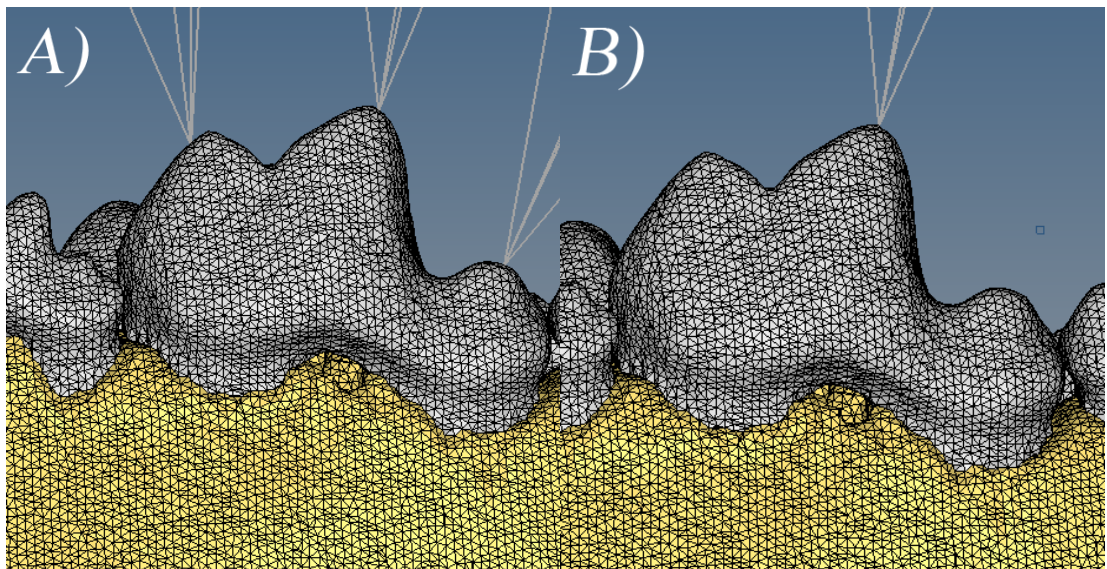
2.4 Cenários de diferentes padrões de distribuição de força

Nos cenários de aplicação em 3 pontos de força, nas espécies sem a adaptação *trenchant heel*, foram utilizados os pontos estruturais Paraconido, Protoconido e Entoconido. Utilizando-se uma força de 4000N dividida igualmente entre estes pontos, sendo aplicada 3.333 N por ponto de força, em sentido perpendicular (axial) às cúspides.

Nos cenários de aplicação em 4 pontos, em que as espécies possuíam a adaptação *trenchant heel* presente ou simulada através do ponto de distribuição

potencialmente homólogo, foram utilizados os pontos estruturais: Paraconido, Protoconido, Hipoconido e Entoconido. Utilizando-se uma força de 4000N dividida igualmente entre estes pontos, sendo aplicada 1000N por ponto de força, em sentido perpendicular (axial).

Figura 7^a e 7^b. Cenário com distribuição de força em três diferentes pontos, e distribuição em um único ponto na espécie *Canis lupus*.

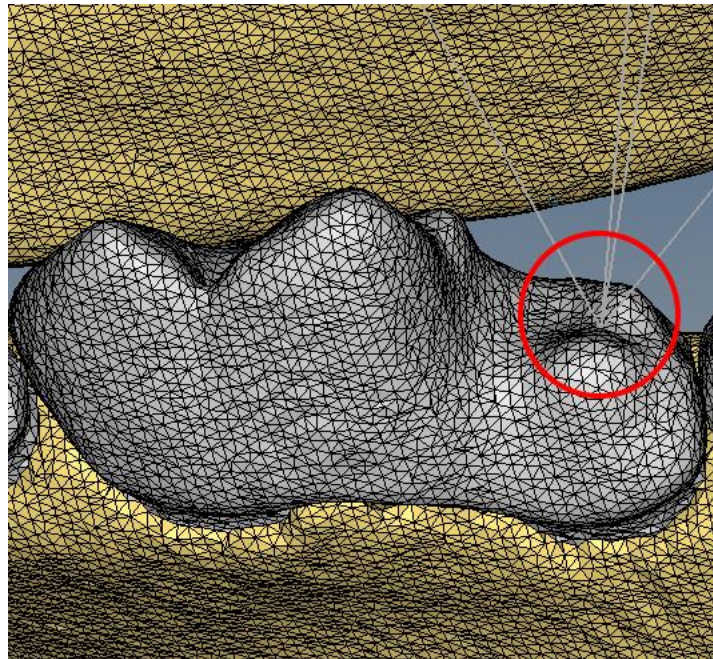


Fonte: Desenvolvidas pelo autor.

2.5 Cenários com adaptação presente e simulada

A simulação através de distribuição de força da adaptação *trenchant heel* nas espécies *Canis lupus* e *Urocyon cinereoargenteus* foi realizada através da criação de um vetor de força aplicado em sentido perpendicular (axial) no conjunto de cúspides Talonido, região potencialmente homóloga à área da presença do *trenchant heel* na espécie *Canis lupus* (FIGURA 8).

Figura 8. Aplicação de força em região potencialmente homóloga ao *trenchant heel* na espécie *Canis Lupus*.

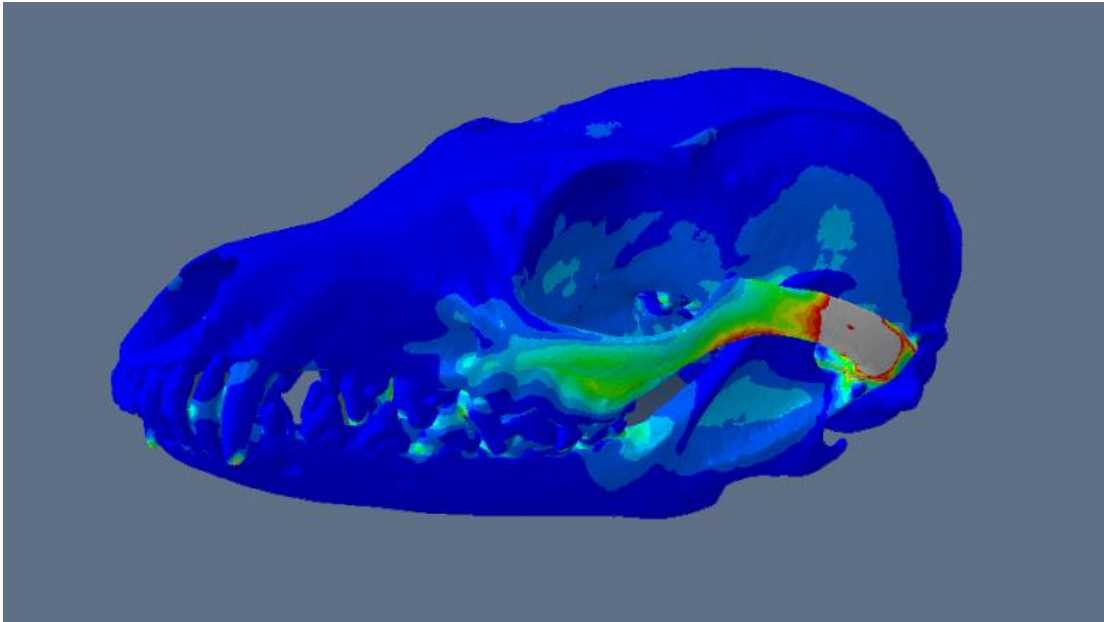


Fonte: Desenvolvidas pelo autor.

2.6 Aplicação dos cenários e resultados

A terceira etapa consta com a execução e resolução dos cenários criados utilizando-se o software Abaqus™, permitindo a análise das alterações e tensões sofridas pelas estruturas, além da geração de dados quantitativos como a média de estresse e tensão por elementos e o número de elementos das superfícies presentes (FIGURA 9).

Figura 9. Resultado de aplicação de cenários na espécie *Urocyon cinereoargenteus*



Fonte: Desenvolvidas pelo autor.

2.7 Coleta de resultados, médias e dados numéricos

Após o desenvolvimento, aplicação dos cenários criados e extração dos dados através do software Abaqus™, os dados quantitativos foram importados para o software RStudio™, onde foi possível realizar a análise e estipular médias para o conjunto de dados através da linguagem de programação R.

3. RESULTADOS & DISCUSSÃO

3.1 Resultados obtidos nos cenários de distribuição de força

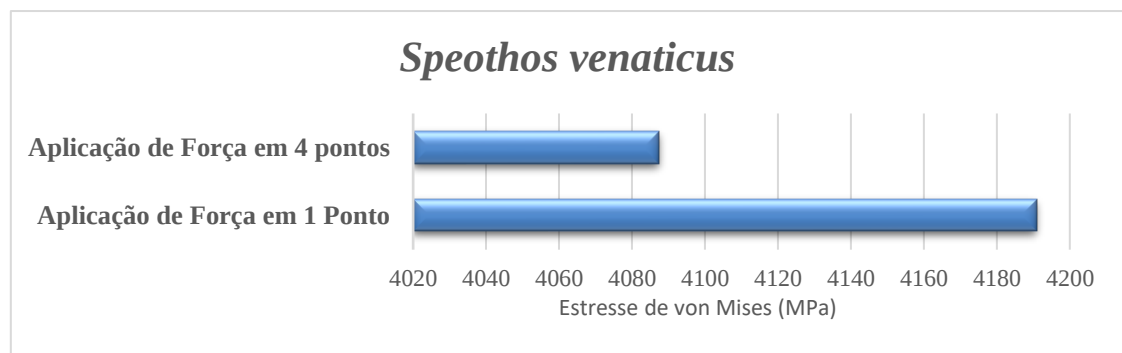
A modelagem dos cenários resultou em diferentes valores de estresse de von Misses/elemento. Nas três diferentes espécies de canídeos os valores de estresse se tornaram superiores quando o padrão de força foi aplicado em somente um ponto de força, e foram inferiores quando o padrão de força foi aplicado em múltiplos pontos de força (TABELA 3 e 4 e FIGURA 10).

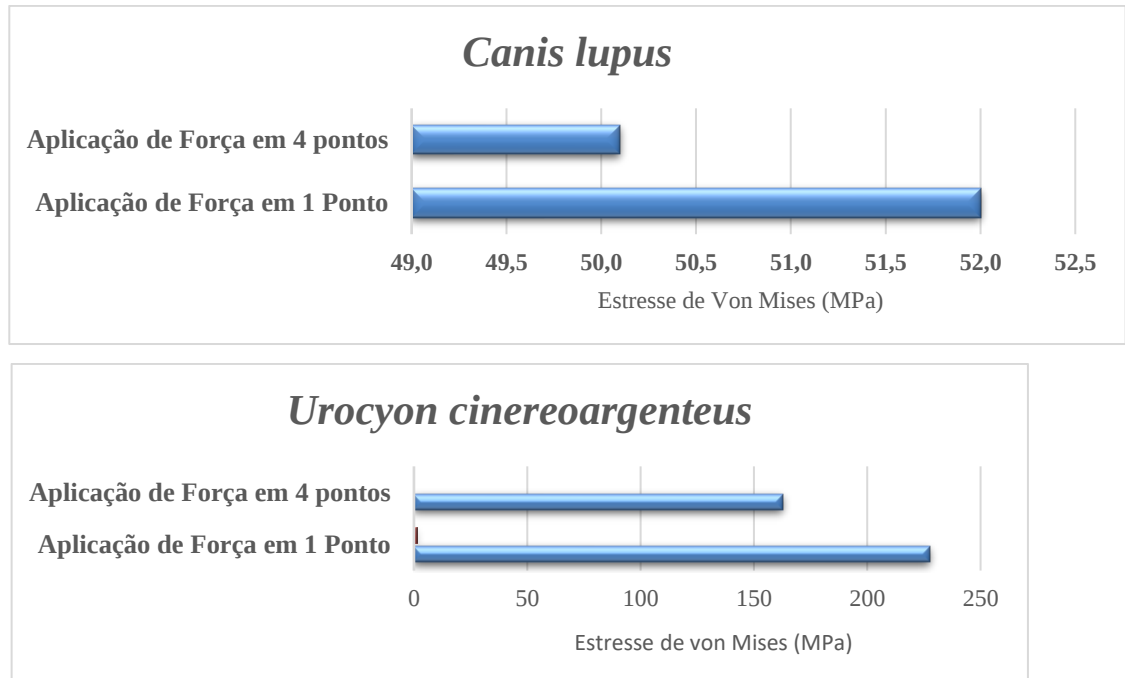
Tabela 3 e 4. Resultados obtidos a partir de diferentes aplicações de distribuição de força.

Espécie	Pontuação de Estresse (Mpa) na Aplicação de Força em 4 pontos: Paraconido, Protoconido, Hipoconido e Entoconido	Pontuação de Estresse (Mpa) na Aplicação de Força em 1 ponto: Protoconido	Taxa percentual de aumento de estresse de von Mises
<i>Speothos venaticus</i>	4087.4	4190.8	2.53%
<i>Urocyon cinereoargenteus</i>	162.8	227.0	39.40%
<i>Canis lupus</i>	50.1	52.0	3.81%

Espécie	Número de polígonos "tetramesh" obtidos
<i>Speothos venaticus</i>	2143779
<i>Urocyon cinereoargenteus</i>	1263430
<i>Canis lupus</i>	1724020

Figura 10. Resultados obtidos após aplicação de cenários com diferentes distribuições de força.





Fonte: Desenvolvido pelo autor.

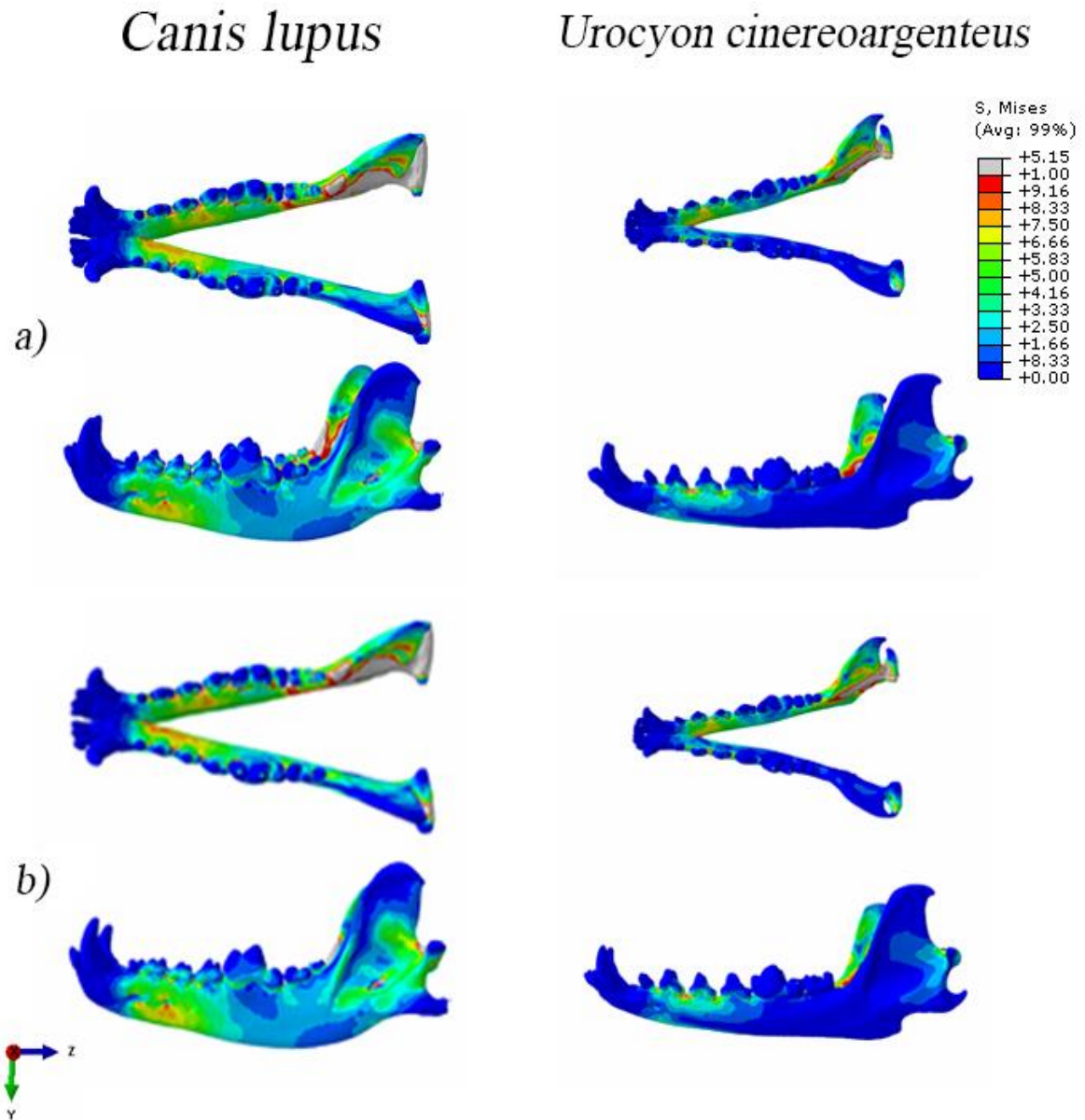
3.2 Resultados obtidos nos cenários de presença e ausência da adaptação dentária

A aplicação dos cenários resultou em diferentes valores obtidos na distribuição de estresse de von Mises em todas as três espécies. A aplicação da força no *trenchant heel* ou em área potencialmente homóloga, em espécies hipercarnívoras resultou em médias inferiores quando comparada com a sua ausência. Porém, na espécie mesocarnívora *U. cinereoargenteus*, a sua presença resultou no aumento da média de estresse/elemento sofrido. (TABELA 4, FIGURA 11 e FIGURA 12).

Tabela 4. Resultados obtidos após aplicação de cenários com ausência e presença da adaptação *trenchant heel*.

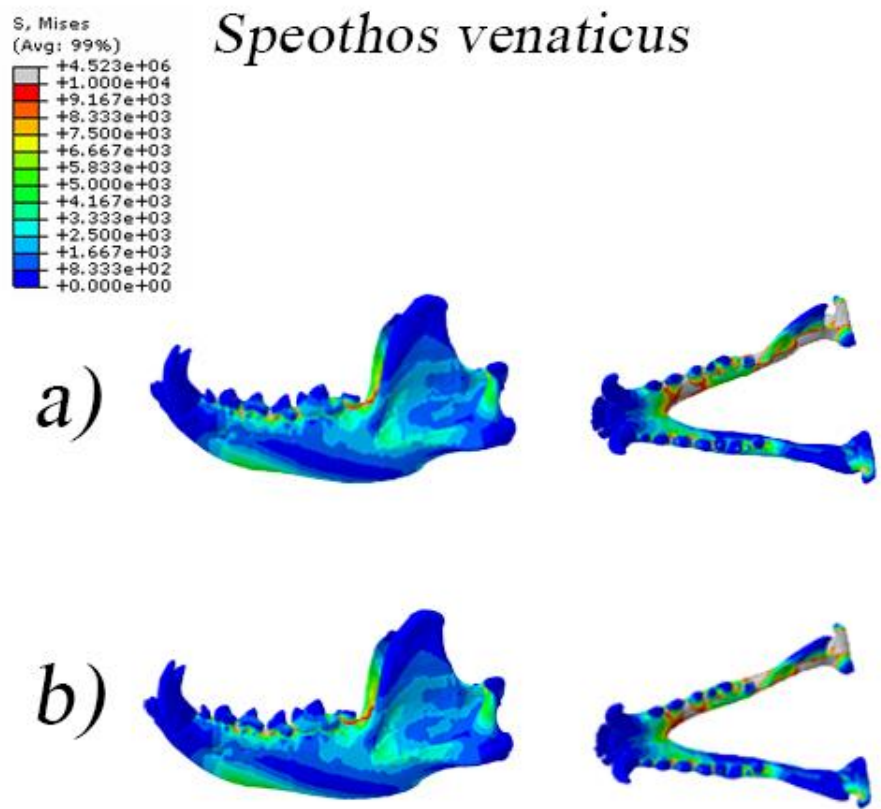
Espécie	Média de Estresse com posicionamento homólogo a e presença da adaptação <i>trenchant heel</i> (Mpa)	Média de Estresse com a adaptação <i>trenchant heel</i> ausente (Mpa)	Taxa percentual de redução/aumento de estresse de von Mises
<i>Speothos venaticus</i>	3719.3	3811.4	2.47% de redução
<i>Urocyon cinereoargenteus</i>	216.2	214.7	0.69% de aumento
<i>Canis lupus</i>	345.1	351.1	1.71% de redução

Figura 11: Resultados obtidos após aplicação de cenários com aplicação de força em posição equivalente e potencialmente homóloga a presença (a) ou não (b) da adaptação *trenchant heel* na espécie *Canis lupus* e *Urocyon cinereoargenteus*.



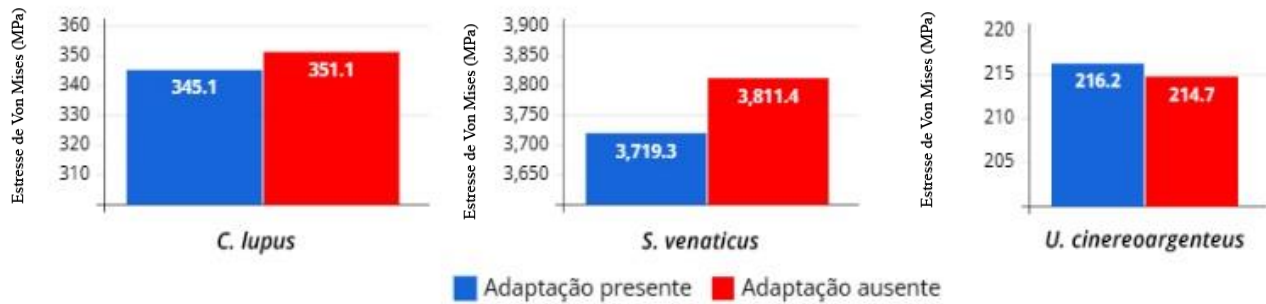
Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Figura 12: Resultados obtidos após aplicação de cenários com a aplicação de força em posição equivalente e potencialmente homóloga e presença da adaptação *trenchant heel*.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Figura 13. Resultados obtidos após aplicação de cenários com a presença (a) e a aplicação de força designando a ausência (b) da adaptação *trenchant heel* na espécie *Speothos venaticus*.



Após a análise dos dados e das médias de estresse obtidas, pode-se perceber que a espécie *Speothos venaticus* obteve um valor de média de estresse, de grande discrepância quando comparada às outras duas espécies. Tal diferença de valores se deve a uma incoerência na realização do construto e da conversão do modelo em “tetramesh”, sendo especificamente um problema da aplicação e modelagem, e não algo relacionado ao seu comportamento e funcionamento biológico. Deste modo, uma reanálise das propriedades biológicas deve ser levada em conta para futuras aplicações e estudos para entender e solucionar a incoerência.

Apesar da diferença discrepante entre os valores absolutos obtidos de stress de von Mises/elemento, podemos observar que nos cenários com a aplicação de força em ponto de distribuição potencialmente homólogo a adaptação *trenchant heel*, e o padrão de força distribuída em mais pontos em *Speothos venaticus*, foram obtidos valores inferiores de estresse de von Mises/elemento quando comparada ao cenário com adaptação ausente e padrão de força aplicado em somente um ponto, demonstrando assim a efetividade e influência do *trenchant heel* e do diferente padrão de força nesta espécie. Resultados similares foram obtidos também para *Canis lupus*, espécie também hipercarnívora. O resultado obtido na mesocarnívora *Urocyon cinereoargenteus*, diante a presença da adaptação dentária simulada, independente ao padrão de força aplicado, resultou em um aumento na média de estresse, opondo-se aos resultados obtidos nas outras duas espécies.

Após a análise dos resultados podemos afirmar que a aplicação de força em ponto potencialmente homólogo, a adaptação *trenchant heel* e sua presença, teve efeito positivo, reduzindo o estresse gerado nas espécies *C. lupus* e *S. venaticus*, devido ao fato de apresentarem estruturas e comportamentos similares junto a dietas hipercarnívoras, justificando a sua presença e surgimento em espécies de canídeos modernos. O resultado obtido para a espécie *U. cinereoargenteus* se diferencie quando comparada as demais espécies, devido os seus comportamentos naturais diferentes e sua dieta mesocarnívora, onde a estruturas cranial e mandibular não apresenta uma “similaridade” com as estruturas presentes em canídeos hipercarnívoros, não se beneficiando assim do potencial da adaptação resultando no aumento da média de estresse, independente do padrão de distribuição de força.

4. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos e analisados, todas as espécies tiveram sua média de estresse de von Mises reduzida quando o padrão de distribuição de força foi aplicado em mais de um ponto. A adaptação *trenchant heel* e a aplicação em ponto potencialmente homólogo mostrou-se eficiente nas espécies hipercarnívoras *C. lupus* e *S. venaticus*, devido aos seus comportamentos predatórios naturais em prol a hipercarnivoria, reduzindo a média de estresse sofrido pelo aparato mandibular e dentário. Por outro lado, a adaptação não demonstrou eficácia na espécie *U. cinereoargenteus* devido a divergência de comportamentos em prol a dieta mesocarnívora, e a diferenças estruturais quando comparada as demais espécies, causando assim o aumento na média de estresse.

Podemos concluir que a presença do *trenchant heel* exerce um impacto na eficácia dos elementos craniomandibulares dos Canidae hipercarnívoros analisados. Isso demonstra de maneira objetiva sua relevância no contexto da evolução da linhagem e sua ocorrência em espécies de canídeos contemporâneos. Por outro lado, em espécies mesocarnívoras, como o *U. cinereoargenteus*, a aplicação em ponto potencialmente homólogo ao *trenchant heel* é associada a impactos negativos, resultando em um aumento médio do estresse nas estruturas. Essa constatação justifica a ausência dessa adaptação em espécies com dietas mesocarnívoras.

Os resultados obtidos nesse experimento inaugural forneceram uma compreensão mais aprofundada sobre a influência dessa característica específica na capacidade predatória das espécies, estabelecendo assim uma base sólida para futuras análises e comparações em diferentes espécies de canídeos.

5. REFERÊNCIAS

BEISIEGEL, B. D. M., & ADES, C. (2002). The behavior of the bush dog (*Speothos venaticus* Lund, 1842) in the field: a review. *Revista de Etologia*, 4(1), 17-23.

BELL, P. R., SNIVELY, E., & SHYCHOSKI, L. (2009). A comparison of the jaw mechanics in hadrosaurid and ceratopsid dinosaurs using finite element analysis. *The Anatomical Record: Advances in Integrative Anatomy and Evolutionary Biology: Advances in Integrative Anatomy and Evolutionary Biology*, 292(9), 1338-1351.

DUMONT, E. R., PICCIRILLO, J., & GROSSE, I. R. (2005). Finite-element analysis of biting behavior and bone stress in the facial skeletons of bats. *The Anatomical Record Part A: Discoveries in Molecular, Cellular, and Evolutionary Biology: An Official Publication of the American Association of Anatomists*, 283(2), 319-330.

FUENTES-GONZÁLEZ, J. A., & MUÑOZ-DURÁN, J. (2012). Filogenia de los cánidos actuales (Carnivora: Canidae) mediante análisis de congruencia de caracteres bajo parsimonia. *Actualidades Biológicas*, 34(96), 85-102.

Matthew, W. D., & Granger, W. (1924). New Carnivora from the Tertiary of Mongolia. *American Museum of Natural History*.

MONTEFELTRO, F. C., LAUTENSCHLAGER, S., GODOY, P. L., FERREIRA, G. S., & BUTLER, R. J. (2020). A unique predator in a unique ecosystem: modelling the apex predator within a Late Cretaceous crocodyliform-dominated fauna from Brazil. *Journal of Anatomy*, 237(2), 323-333.

MOOERS, A. Ø., & SCHLUTER, D. (1999). Reconstructing ancestor states with maximum likelihood: support for one-and two-rate models. *Systematic Biology*, 48(3), 623-633.

PENROSE, F. E. J. (2019). Cranial morphology and masticatory biomechanics in the Canidae (Doctoral dissertation, University of Liverpool).

PERINI, F. A., RUSSO, C. A. M., & SCHRAGO, C. G. (2010). The evolution of South American endemic canids: a history of rapid diversification and morphological parallelism. *Journal of evolutionary biology*, 23(2), 311-322.

SHARP, A. C. (2015). Comparative finite element analysis of the cranial performance of four herbivorous marsupials. *Journal of Morphology*, 276(10), 1230-1243.

SILVA ROCHEFORT, B., & ROOT-BERNSTEIN, M. (2021). History of canids in Chile and impacts on prey adaptations. *Ecology and Evolution*, 11(15), 9892-9903.

SLATER, G., DUMONT, E. R., & VAN VALKENBURGH, B. (2009). Implications of predatory specialization for cranial form and function in canids. *Journal of Zoology*, 278(3), 181-188.

SZABÓ, B., & BABUŠKA, I. (1991). *Finite element analysis*. John Wiley & Sons.

VAN VALKENBURGH, B. (1991). Iterative evolution of hypercarnivory in canids (Mammalia: Carnivora): evolutionary interactions among sympatric predators. *Paleobiology*, 340-362.

VAN VALKENBURGH, B. (2007). Déjà vu: the evolution of feeding morphologies in the Carnivora. *Integrative and Comparative Biology*, 47(1), 147-163.