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

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

TÍTULO: Análise de Elementos Finitos (FEA) - Análise Morfofuncional Mandibular de Orangotango *(Pongo pygmaeus)*, Gorila *(Gorilla gorilla)* e Chimpanzé *(Pan troglodytes)*

Matheus Sacchi Castrioto

Ilha Solteira - SP
Outubro, 2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

TÍTULO: Análise de Elementos Finitos (FEA) - Análise Morfofuncional Mandibular de Orangotango *(Pongo pygmaeus)*, Gorila *(Gorilla gorilla)* e Chimpanzé *(Pan troglodytes)*

Nome do Aluno: Matheus Sacchi Castrioto

Orientador: Felipe Chinaglia Montefeltro

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia, Câmpus de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", como parte das exigências para obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas.

Ilha Solteira - SP
Outubro, 2025

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

Castrioto, Matheus Sacchi.
C355a Análise de Elementos Finitos (FEA) - análise morfofuncional mandibular de orangotango (*Pongo pygmaeus*), gorila (*Gorilla gorilla*) e chimpanzé (*Pan troglodytes*). / Matheus Sacchi Castrioto. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
90 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Ciências Biológicas) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2025

Orientador: Felipe Chinaglia Montefeltro
Inclui bibliografia

1. Biomecânica da mastigação. 2. Posteriorização da mastigação. 3. Morfologia mandibular. 4. Evolução hominínia. 5. Função dos incisivos e molares. 6. Gracilização.

Elaborada por Raiane da Silva Santos - CRB-8/9999

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

ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

"ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS (FEA) - ANÁLISE MORFOFUNCIONAL MANDIBULAR DE ORANGOTANGO (PONGO PYGMAEUS), GORILA (GORILLA GORILLA) E CHIMPANZÉ (PAN TROGLODYTES)"

MATHEUS SACCHI CASTRIOTO

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 Felipe C. Montefeltro

2º EXAMINADOR
Nome: Ms. Gabriel Gonzales Barbosa Gabriel Gonzales Barbosa

3ª EXAMINADORA
Nome: Ms. Paulo Roberto da Silva Paulo Roberto da Silva

CONCEITO
(X) Aprovado(a)
( ) Reprovado(a)

Ilha Solteira-SP, 26 de novembro de 2025.

1 INTRODUÇÃO

1.1 RESUMO.....[Página 9]
1.1ABSTRACT.....[Página 10]

2 LISTA DE FIGURAS

3 LISTA DE QUADROS

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITO (FEA).....[Página 19]
4.1.1 Aquisição do Modelo Digital e Geração da Malha.....[Página 17]
4.1.2 Atribuição das Propriedades Mecânicas.....[Página 18]
4.1.3 Condições de (Boundary) e Cargas (Load).....[Página 21]
4.1.4 Análise biomecânica de mandíbulas de primatas via método de elementos finitos.....[Página 21]
4.1.5 Pós-processamento e Validação (Cálculos RPTM) .....[Página 26]

5 RESULTADOS

5.1 RESULTADOS OBTIDOS PARA O ESPÉCIME: *Pongo pygmaeus*....[Página 21]

5.2 RESULTADOS OBTIDOS PARA O ESPÉCIME: *Gorilla gorilla*.....[Página 37]

5.3 RESULTADOS OBTIDOS PARA O ESPÉCIME**:** *Pan troglodytes*.....[Página 51]

6 DISCUSSÃO

6.1 ESTRUTURA PROPOSTA PARA DISCUSSÃO (*Pongo pygmaeus*)
6.1.1 Principal descoberta.....[Página 67]
6.1.2 A função biomecânica dos incisivos: ferramenta poderosa para abrir alimentos duros.....[Página 68]
6.1.3 A região molar: eficiência robusta.....[Página 69]
6.1.4 Análise comparativa dos picos de tensões de von mises nos dentes incisivos e molares.....[Página 70]

6.1.5 Qual a aplicação evolutiva e ecológica da análise de elementos finitos (FEA) com a vida real e sua respectiva evolução.....[Página 71]

6.1.6 Há limitações na morfologia morfofuncional.....[Página 72]

6.2 ESTRUTURA PROPOSTA PARA DISCUSSÃO (*Gorilla gorilla*)

6.2.1 Principal descoberta: morfologia morfofuncional de moagem altamente especializada.....[Página 74]

6.2.2 A função da biomecânica dos incisivos: como ferramenta secundária.....[Página 75]

6.2.3 A região molar: alta eficiência e poder de esmagamento.....[Página 76]

6.2.4 A aplicação evolutiva e ecológica da análise dos cenários..... [Página 77]

6.2.5 As limitações da especialização morfofuncional.....[Página 78]

6.3 ESTRUTURA PROPOSTA PARA DISCUSSÃO (*Pan troglodytes*)

6.3.1 Principal descoberta .....[Página 79]

6.3.2 A função biomecânica dos incisivos: uma ferramenta eficiente e de baixo custo.....[Página 79]

6.3.3 A região molar: eficiência máxima.....[Página 80]

6.3.4 Análise comparativa dos picos de tensões de von mises.....[Página 80]

6.3.5 Aplicação evolutiva e ecológica.....[Página 81]

6.3.6 Há limitações na morfologia morfofuncional.....[Página 82]

7 CONCLUSÃO

8 REFERÊNCIAS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Análise de Elementos Finitos (FEA) da distribuição de tensão durante a mordida no incisivo lateral em *Pongo pygmaeus.* Magnitudes de força muscular aplicadas ao modelo mandibular, em Newtons.....[Página 25]

Figura 2 – Análise de Elementos Finitos (FEA) da distribuição de tensão durante a mordida no incisivo vertical em *Pongo pygmaeus* Magnitudes de força muscular aplicadas ao modelo mandibular, em Newtons.....[Página 27]

Figura 3 – Análise de Elementos Finitos (FEA) da distribuição de tensão durante a mordida no molar lateral em *Pongo pygmaeus* Magnitudes de força muscular aplicadas ao modelo mandibular, em Newtons.....[Página 30]

Figura 4– Análise de Elementos Finitos (FEA) da distribuição de tensão durante a mordida no molar vertical em *Pongo pygmaeus.* Magnitudes de força muscular aplicadas ao modelo mandibular, em Newtons.....[Página 34]

Figura 5 – Análise de Elementos Finitos (FEA) da distribuição de tensão durante a mordida no incisivo lateral em *Gorila gorila.* Magnitudes de força muscular aplicadas ao modelo mandibular, em Newtons.....[Página 42]

Figura 6 – Análise de Elementos Finitos (FEA) da distribuição de tensão durante a mordida no incisivo vertical em *Gorila gorila.* Magnitudes de força muscular aplicadas ao modelo mandibular, em Newtons**.**.....[Página 45]

Figura 7 – Análise de Elementos Finitos (FEA) da distribuição de tensão durante a mordida no molar lateral em *Gorila gorila.* Magnitudes de força muscular aplicadas ao modelo mandibular, em Newtons.....[Página 47]

Figura 8 – Análise de Elementos Finitos (FEA) da distribuição de tensão durante a mordida no molar vertical em *Gorila gorila.* Magnitudes de força muscular aplicadas ao modelo mandibular, em Newtons.....[Página 49]

Figura 9 – Análise de Elementos Finitos (FEA) da distribuição de tensão durante a mordida no incisivo lateral em *Pan troglodytes.* Magnitudes de força muscular aplicadas ao modelo mandibular, em Newtons.....[Página 55]

Figura 10 – Análise de Elementos Finitos (FEA) da distribuição de tensão durante a mordida no incisivo vertical em *Pan troglodytes.* Magnitudes de força muscular aplicadas ao modelo mandibular, em Newtons.....[Página 58]

Figura 11 – Análise de Elementos Finitos (FEA) da distribuição de tensão durante a mordida no molar lateral em *Pan troglodytes.* Magnitudes de força muscular aplicadas ao modelo mandibular, em Newtons.....[Página 60]

Figura 12 – Análise de Elementos Finitos (FEA) da distribuição de tensão durante a mordida no molar vertical em *Pan troglodytes.* Magnitudes de força muscular aplicadas ao modelo mandibular, em Newtons.....[Página 62]

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Magnitudes de forças vetoriais aplicadas aos modelos de elementos finitos, em Newtons; Média de estresse de Von Mises (MPa). Modelo: *Pongo Pygmaeus*.....[Página 42]

Quadro 2 – Distribuição qualitativa das tensões de Von Mises nos incisivos de *Pongo Pygmaeus* sob forças de 1250 N. A distribuição representa os dentes molares (forças vetoriais laterais e verticais em sequência).....[Página 25]

Quadro 3 – Distribuição qualitativa das tensões de Von Mises nos molares de *Pongo Pygmaeus sob* forças de 1250 N. A distribuição representa os dentes incisivos (forças vetoriais laterais e verticais em sequência).....[Página 29]

Quadro 4 - Magnitudes de forças vetoriais aplicadas aos modelos de elementos finitos, em Newtons; Média de estresse de Von Mises (MPa). Modelo: *Gorilla gorilla*.....[Página 70]

Quadro 5 – Distribuição qualitativa das tensões de Von Mises nos incisivos de *Gorilla gorila* sob forças de 1250 N. A distribuição representa os dentes molares (forças vetoriais laterais e verticais em sequência).....[Página 31]

Quadro 6 – Distribuição qualitativa das tensões de Von Mises nos molares de *Gorilla gorila* sob forças de 1250 N. A distribuição representa os dentes incisivos (forças laterais e verticais em sequência).....[Página 34]

Quadro 6 – Magnitudes de forças vetoriais aplicadas aos modelos de elementos finitos, em Newtons; Média de estresse de Von Mises (MPa). Modelo: *Pan troglodytes.*.....[Página 36]

Quadro 7 – Distribuição qualitativa das tensões de Von Mises nos molares de *Pan troglodytes* sob forças de 1250 N. A distribuição representa os dentes molares (forças vetoriais laterais e verticais em sequência).....[Página 37]

Quadro 8 – Distribuição qualitativa das tensões de Von Mises nos incisivos de *Pan troglodytes* sob forças de 1250 N. A distribuição representa os dentes molares (forças vetoriais laterais e verticais em sequência).....[Página 39]

RESUMO

Grandes primatas (gorilas, orangotangos, chimpanzés) e hominínios compartilham um plano corporal fundamental, caracterizado pela posteriorização da mastigação. Nesse plano, as ações primárias de processamento de alimentos — trituração, moagem e esmagamento — são evolutivamente transferidas para a dentição posterior, especificamente os pré-molares e molares. Esta região é biomecanicamente ideal para aplicar força máxima devido à sua proximidade com a articulação temporomandibular e os principais músculos da mastigação. A morfologia da mandíbula em primatas é um reflexo direto de suas dietas e estratégias de alimentação. Uma análise comparativa entre orangotangos, gorilas, chimpanzés e hominínios modernos (*Homo sapiens*) revela adaptações marcantes que ilustram a íntima relação entre forma e função no complexo aparato mastigatório. A diferença crucial entre esses primatas não reside em *se* eles usam os dentes posteriores, mas em *como* os utilizam, o que é um reflexo direto de suas dietas especializadas. Para investigar tais diferenças, foram simulados quatro cenários de mordida (incisivo lateral/vertical e molar lateral/vertical), com a aplicação de uma força padronizada de 1250 N para analisar a distribuição de tensão de Von Mises. Os resultados indicam especializações morfofuncionais distintas: A mandíbula de ***Gorilla gorilla*** revelou-se a mais especializada, apresentando tensões muito baixas nos molares (pico de 8,60 MPa). Sua morfologia é otimizada para a moagem prolongada de vegetação fibrosa por meio de um movimento de cisalhamento predominantemente vertical. A espécie exibe um acentuado prognatismo que acomoda dentes grandes, e seus molares possuem cúspides altas e cristas cortantes, eficientes para triturar material vegetal resistente. Essa adaptação reflete-se em uma sínfise mandibular longa e reforçada. A mandíbula de ***Pongo pygmaeus*** mostrou-se extremamente eficiente para esmagamento e moagem com os molares (tensões de 32,79 a 36,45 MPa), porém com alto custo biomecânico na incisão (até 104,42 MPa). Isso corrobora sua adaptação à durofagia (alimentação de objetos duros), realizada via esmagamento por pressão. Para tal, seus molares são caracterizados por um esmalte espesso e cúspides baixas e arredondadas, adaptações que previnem o desgaste excessivo ao processar alimentos duros e abrasivos. A mandíbula mais grácil de ***Pan troglodytes*** é eficiente para sua dieta primariamente frugívora, com baixo estresse molar (27,34 a 37,71 MPa), embora o uso vigoroso dos incisivos gere altas tensões (76,39 MPa), próximas aos limites de fadiga óssea. Seus incisivos são relativamente grandes e robustos, úteis para processar uma variedade de alimentos, enquanto seus molares possuem cúspides mais arredondadas em comparação com os dos gorilas, sendo adequados para uma dieta mista. Em *Homo sapiens*, os dentes, em particular os molares e

caninos, são menores e o esmalte é mais fino em comparação com os grandes símios, refletindo uma dieta de alimentos mais macios e processados. Conclui-se que a morfologia mandibular de cada grande primata é uma adaptação especializada à sua dieta, fornecendo uma base comparativa fundamental para entender a trajetória evolutiva humana. Enquanto os grandes símios seguiram caminhos de especialização dietética que exigiram a maximização da robustez do aparelho mastigatório, a linhagem hominínia tomou um rumo único. Após uma fase inicial robusta, esta linhagem passou a depender de inovações culturais e tecnológicas para o pré-processamento dos alimentos, com destaque para o uso de ferramentas e a introdução do cozimento. Isso permitiu o desenvolvimento de um sistema mastigatório grácil e energeticamente menos custoso, uma mudança anatômica intrinsecamente ligada à evolução de um cérebro grande e de uma dieta onívora e cozida.

Palavras-chave: Biomecânica da Mastigação, Posteriorização da Mastigação, Morfologia Mandibular, Evolução Hominínia, Função dos Incisivos e Molares, Gracilização

Abstract

Great apes (gorillas, orangutans, chimpanzees) and hominins share a fundamental body plan characterized by the posteriorization of mastication. In this plan, the primary food processing actions—crushing, grinding, and pulverizing—are evolutionarily shifted to the post-canine dentition, specifically the premolars and molars. This region is biomechanically ideal for applying maximum force due to its proximity to the temporomandibular joint and the main muscles of mastication. The morphology of the primate mandible is a direct reflection of their diets and feeding strategies. A comparative analysis of orangutans, gorillas, chimpanzees, and modern hominins (*Homo sapiens*) reveals striking adaptations that illustrate the intimate relationship between form and function in the complex masticatory apparatus. The crucial difference among these primates lies not in *if* they use their posterior teeth, but in *how* they use them, which is a direct reflection of their specialized diets. To investigate these differences, four bite scenarios (lateral/vertical incisor and lateral/vertical molar) were simulated, applying a standardized force of 1250 N to analyze the Von Mises stress distribution. The results indicate distinct morphofunctional specializations: The mandible of *Gorilla gorilla* proved to be the most specialized, exhibiting very low stress on the molars (peak of 8.60 MPa). Its morphology is optimized for the prolonged grinding of fibrous vegetation through a predominantly vertical shearing motion. The species displays marked prognathism, which accommodates large teeth, and its molars have high cusps and shearing crests, efficient for processing tough plant material. This adaptation is reflected in a long and reinforced mandibular symphysis.The mandible of *Pongo pygmaeus* was shown to be extremely efficient for crushing and grinding with the molars (stresses from 32.79 to 36.45 MPa), but at a high biomechanical cost during incision (up to 104.42 MPa). This corroborates its adaptation to durophagy (feeding on hard objects), achieved through pressure-based crushing. For this purpose, its molars are characterized by thick enamel and low, rounded cusps, which are adaptations that prevent excessive wear when processing hard and abrasive foods.The more gracile mandible of ***Pan troglodytes*** is efficient for its primarily frugivorous diet, with low molar stress (27.34 to 37.71 MPa), although vigorous use of the incisors generates high stress (76.39 MPa), close to the limits of bone fatigue. Its incisors are relatively large and robust, useful for processing a variety of foods, while its molars have more rounded cusps compared to those of gorillas, making them suitable for a mixed diet. In *Homo sapiens*, the teeth, particularly the molars and canines, are smaller and the enamel is thinner compared to great apes, reflecting a diet of softer, processed foods.

In conclusion, the mandibular morphology of each great ape is a specialized adaptation to its diet, providing a fundamental comparative basis for understanding the human evolutionary trajectory. While great apes followed paths of dietary specialization that required maximizing the robustness of the masticatory apparatus, the hominin lineage took a unique course. After an initial robust phase, this lineage came to depend on cultural and technological innovations for food pre-processing, most notably the use of tools and the introduction of cooking. This allowed for the development of a gracile and less energetically costly masticatory system, an anatomical shift intrinsically linked to the evolution of a large brain and a cooked, omnivorous diet.

INTRODUÇÃO

Os primatas da parvordem Catarrhini, que englobam os macacos do Velho Mundo, os grandes símios e os humanos. Este grupo representa um dos mais bem-sucedidos exemplos de radiação adaptativa entre os mamíferos. Desde sua origem na Afro-Arábia durante o Oligoceno, há mais de 30 milhões de anos, este clado diversificou-se notavelmente, colonizando uma vasta gama de nichos ecológicos nos continentes africano e asiático **(Fleagle, 2013)**. O resultado é uma espetacular variedade de formas, tamanhos e comportamentos, que torna este grupo um modelo ideal para investigar os processos que governam a evolução, especialmente a complexa interação entre ecologia, comportamento e morfologia craniodental **(Ross; Kay, 2004).**

Dentre as pressões seletivas que moldam a trajetória evolutiva de uma linhagem, a dieta é um dos fatores determinantes **(Teaford; Ungar, 2000)**. A necessidade de processar diferentes tipos de alimentos impõe demandas mecânicas distintas sobre o aparelho mastigatório, influenciando diretamente a anatomia do crânio e, de forma proeminente, da mandíbula **(Hylander, 2006**

Em Hominoidea é o grupo que inclui os maiores primatas do mundo. Esta família é subdividida em duas subfamílias com membros vivos: Ponginae e Homininae. A Subfamília Ponginae é representada por um único gênero, *Pongo*, que engloba as três espécies de orangotangos, nativos das ilhas de Bornéu e Sumatra.

Dentro deste grupo, os primatas Hominini, que compreendem os humanos modernos e todos os nossos ancestrais extintos desde a separação com os chimpanzés, que representam um caso singular de radiação adaptativa.

Desde sua origem na África, há aproximadamente 7 milhões de anos, este clado experimentou uma notável diversificação, marcada por inovações-chave como o bipedalismo e, posteriormente, um cérebro em expansão, que permitiram a ocupação de uma vasta gama de nichos ecológicos, culminando em uma dispersão global **(Wood; Richmond, 2000).**

A trajetória dos Hominini ilustra de forma exemplar como as pressões dietéticas podem levar a transformações morfológicas profundas, tornando este grupo um modelo fascinante para investigar a evolução humana **(Klein, 2009).** A dieta é amplamente reconhecida como a principal força que guiou a evolução humana **(Lieberman, 2011)**.

As diferentes demandas mecânicas impostas pelos alimentos, desde vegetais duros e crus até carne e alimentos cozidos, influenciam diretamente a morfologia do aparelho mastigatório **(Hylander, 1979; Zink & Lieberman, 2016)**. Nesse contexto, a mandíbula se destaca como uma estrutura-chave para o entendimento da nossa adaptação alimentar, pois é nela que as forças geradas pelos músculos da mastigação são transferidas para os dentes **(Ungar, 2007).**

A sua forma e robustez são, portanto, um reflexo direto das estratégias alimentares de cada espécie, exibindo uma clara tendência evolutiva: da morfologia maciça e reforçada dos *Australopithecus* e *Paranthropus* para a progressiva gracilização observada ao longo da linhagem *Homo*, desde o *Homo habilis* até a mandíbula delicada e com queixo proeminente do *Homo sapiens.*

A análise da linhagem Hominini revela que as tendências evolutivas do aparelho mastigatório são detectáveis muito antes das conhecidas especializações do gênero *Australopithecus*, mas de uma forma que desafia uma narrativa de progressão linear. A evidência fóssil dos mais antigos membros de nosso clado, como *Sahelanthropus tchadensis*, *Orrorin tugenensis* e, de forma mais completa, *Ardipithecus ramidus*, demonstra que a trajetória evolutiva foi mais complexa, com diferentes linhagens explorando distintas soluções adaptativas **(Wood; Richmond, 2000).** Esses fósseis, datados entre 7 e 4,4 milhões de anos, são cruciais para estabelecer a condição morfológica basal a partir da qual as posteriores radiações, incluindo a nossa, emergiram **(Kimbel; Villmoare, 2016).**

A mais antiga e talvez mais diagnóstica tendência que separa os Hominini dos outros símios africanos é a reorganização do complexo canino-pré-molar. Em vez de uma mandíbula robusta, o primeiro sinal claro de nossa linhagem é a redução dos caninos, que perdem sua projeção em forma de adaga e seu mecanismo de afiação contra o primeiro pré-molar inferior **(Brunet et al., 2002; Senut et al., 2001)**.

Essa transformação, evidente desde o Mioceno final, tem profundas implicações funcionais e comportamentais. Mecanicamente, a redução dos caninos libera a oclusão, permitindo movimentos mastigatórios mais rotatórios (laterais), essenciais para a trituração de alimentos. Comportamentalmente, sugere uma atenuação da competição agressiva entre machos, indicando uma mudança fundamental na estrutura social dos primeiros Hominini **(Plavcan, 2012).**

Contrariando a ideia de que a robustez mandibular é uma característica primitiva para todos os Hominini, o esqueleto de *Ardipithecus ramidus* revelou um aparelho mastigatório notavelmente generalizado e menos robusto do que o de seus sucessores, os australopitecos **(White, Suwa; Asfaw, 2009)**. Com um esmalte dentário relativamente fino, similar ao de chimpanzés, e uma arquitetura facial que não exibe os reforços para altas tensões de mordida, *Ardipithecus ramidus* sugere uma dieta composta primariamente por alimentos mais macios, como frutos e folhas.

Isso indica que a morfologia extremamente robusta, com mandíbulas espessas e molares largos de esmalte grosso, vista em espécies como *Australopithecus africanus* e, de forma ainda mais acentuada, no gênero *Paranthropus*, não era a condição ancestral de nossa linhagem, mas sim uma especialização derivada, provavelmente para a exploração de alimentos duros e abrasivos como "alimentos de refúgio" (*fallback foods*) **(Teaford, Ungar, 2000).**

Dessa forma, a morfologia funcional do aparelho mastigatório dos Hominini deve ser entendida não como uma única tendência, mas como uma série de radiações adaptativas divergentes. A partir de um ancestral com caninos reduzidos e uma mandíbula generalizada, como o *Ardipithecus*, a evolução seguiu ao menos dois caminhos distintos. Um deles levou à especialização em um processamento oral poderoso, culminando nos *Paranthropus robustus.* O outro, que define o gênero *Homo*, contornou essa especialização, seguindo uma trajetória de gracilização mandibular que foi possibilitada pela externalização do processamento alimentar através da tecnologia lítica e, posteriormente, do cozimento **(Lieberman, 2011, Wrangham, 2009).** A gracilidade do aparelho mastigatório humano, portanto, não é o ponto final de uma longa e gradual redução, mas sim o resultado de uma estratégia evolutiva única que substituiu a força bruta da mastigação pela inovação cultural e tecnológica.

Uma abordagem morfofuncional possível para atuar como uma ponte entre a anatomia e a ecologia alimentar, permitindo testar hipóteses sobre como espécies extintas e viventes, incluindo hominídeos, utilizavam seu aparelho mastigatório é FEA (Finite Element Analysis) **(Strait et al., 2009)**. Dessa forma, a FEA transcende a simples descrição da anatomia tornando-se essencial para avaliar cenários sobre o comportamento e a função mandibular. Embora a análise da forma óssea permita formular hipóteses sobre a função, abordagens computacionais como a FEA têm permitido testar essas hipóteses de forma quantitativa e rigorosa **(Ross, 2005).**

A análise morfofuncional da mandíbula dos primatas se baseia na premissa de que a

arquitetura óssea representa uma solução otimizada para as demandas mecânicas impostas pela dieta e pelo comportamento **(Ungar, 2007)**. Em grandes primatas como orangotangos, gorilas e chimpanzés, a morfologia mandibular, seja ela robusta ou grácil, permanece sob forte pressão seletiva ditada diretamente pela mecânica de sua dieta, exibindo uma clara correlação entre forma e função mastigatória. A hipótese central é que a mandíbula de cada espécie evoluiu para resistir com máxima eficiência às tensões geradas por seu alimento principal.

Especificamente, as seguintes hipóteses morfofuncionais são propostas: 1) A mandíbula massiva do orangotango (*Pongo pygmaeus*) está funcionalmente adaptada à durofagia (consumo de alimentos duros), devendo demonstrar a maior eficiência, ou seja, os menores picos de estresse relativo, em cenários que simulem o esmagamento molar de alta força. 2) A mandíbula do gorila (*Gorilla gorilla*) é otimizada para a moagem prolongada, o que se traduziria em baixo estresse durante a mastigação molar lateral, consistente com o processamento de grandes volumes de vegetação fibrosa. 3) A mandíbula mais grácil do chimpanzé (*Pan troglodytes*) é altamente eficiente para as cargas moderadas de sua dieta frugívora, mas revelaria seus limites estruturais sob as mesmas forças extremas que os outros grandes primatas suportam com mais eficácia **(Hylander, 2006)**.

Em contraste, a linhagem *Hominini* apresenta uma reorganização morfofuncional complexa que parece se dissociar das pressões puramente alimentares **(Wood; Richmond, 2000)**. A trajetória evolutiva do gênero *Homo* é marcada por uma profunda reorganização do complexo craniofacial, refletindo uma adaptação a novos nichos ecológicos e, fundamentalmente, a uma nova dieta **(Wood; Richmond, 2000)**. Um dos motores centrais dessa transformação foi a transição de uma alimentação baseada em vegetais duros e crus para uma dieta que incluía carne e, crucialmente, alimentos processados por ferramentas e pelo cozimento. Essa inovação tecnológica reduziu drasticamente as demandas mecânicas sobre o aparelho mastigatório, um fator que foi experimentalmente demonstrado como capaz de diminuir significativamente o esforço necessário para a mastigação **(Zink; Lieberman, 2016)**.

As tendências evolutivas que levaram a essa reorganização mandibular na linhagem *Homo* foram impulsionadas por uma cascata de inovações comportamentais e tecnológicas. A transição de uma dieta baseada em vegetais duros para uma mais onívora, rica em carne e tubérculos, foi facilitada pelo desenvolvimento de ferramentas de pedra para cortar e macerar alimentos. **(Wrangham, 2009)**.

Os fenômenos de gracilização e posteriorização mandibular estão profundamente interligados. A gracilização, impulsionada pela redução da necessidade de processar alimentos duros, alterou drasticamente o regime de tensões biomecânicas ao longo da mandíbula. Com a diminuição do corpo mandibular posterior, as forças durante a mastigação e a incisão passaram a se concentrar de maneira diferente na sínfise **(Zink; Lieberman, 2016).**

Analisar comparativamente, por meio da Análise de Elementos Finitos (FEA), a morfologia funcional da mandíbula dos grandes primatas (*Pongo pygmaeus*, *Gorilla gorilla* e *Pan troglodytes*), a fim de testar hipóteses sobre suas adaptações alimentares, a partir dessa base, elucidar o contexto evolutivo da trajetória única de gracilização e posteriorização mandibular na linhagem Hominini.

Desenvolver modelos tridimensionais de elementos finitos que sirvam como uma plataforma virtual padronizada para a experimentação biomecânica. Estes modelos, representando com alta fidelidade a anatomia de *Pongo pygmaeus*, *Gorilla gorilla* e *Pan troglodytes*, são a base fundamental para isolar a variável da forma (morfologia) e testar seu impacto no desempenho funcional de maneira controlada, algo impossível de se fazer em espécimes vivos ou no registro fóssil.

Quantificar e comparar o desempenho biomecânico das mandíbulas dos grandes primatas sob cargas que modelam suas atividades alimentares. O propósito é gerar a primeira base de dados comparativa, com métricas de estresse (Von Mises) e eficiência mecânica, que servirá como uma linha de base funcional. Esta linha de base permitirá testar rigorosamente a hipótese de que a morfologia mandibular dos grandes símios é uma solução otimizada e diretamente governada por pressões de sua alimentação.

A abordagem deste estudo busca não somente a validação morfofuncional da mandíbula dos espécimes, mas também o aprofundamento da compreensão sobre os mecanismos adaptativos que geraram a diversidade mandibular nos grandes primatas. Adicionalmente, investiga-se como esses princípios biomecânicos podem nos ajudar a interpretar o registro fóssil. Os grandes primatas atuais servem como modelos comparativos essenciais para entendermos a biomecânica de hominídeos extintos, como os robustos Australopitecíneos.

Esta análise é, portanto, fundamental para delinear os princípios biomecânicos que governavam as mandíbulas robustas de parentes próximos na linhagem humana, antes que as

pressões seletivas fossem alteradas pelo advento de tecnologias como o uso de ferramentas e o cozimento dos alimentos. Essas inovações culturais reduziram drasticamente a necessidade de um aparato mastigatório poderoso, iniciando o processo de gracilização morfofuncional que caracteriza a evolução do gênero *Homo* **(Lieberman, 2011).**

MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS (FEA)

Este capítulo descreve os procedimentos para a construção dos modelos tridimensionais (3D) das mandíbulas de *Pongo pygmaeus*, *Gorilla gorilla* e *Pan troglodytes*, a preparação dos modelos para a simulação computacional utilizando o Método de Elementos Finitos (FEA), a execução das análises e o pós-processamento dos resultados para a análise da distribuição de tensões.

4.1.1 AQUISIÇÃO DO MODELO DIGITAL E GERAÇÃO DA MALHA

O modelo tridimensional da mandíbula do espécime adulto de *Pongo pygmaeus* foi obtido a partir de um banco de dados digital, como MorphoSource.org, sob o código de espécime (não mencionada), no formato MeshCt, sob dimensões de imagem (não mencionadas), com um espaçamento entre pixels (X, Y, Z não mencionados) de não mencionados] e espessura de fatia de (não mencionado), totalizando um conjunto de imagem única, em formato sólido.

O modelo tridimensional da mandíbula do espécime adulto de *Gorilla gorilla* foi obtido a partir de um banco de dados digital, como MorphoSource.org, sob o código **(AMNH:Mammals:M-167338)** de espécime, no formato TIFF, sob dimensões de imagem (1212 x 1025), com um espaçamento entre pixels (X, Y, Z) de 0.126177mm e espessura de fatia de (não mencionada), totalizando um conjunto de 1530 imagens.

O modelo tridimensional da mandíbula do espécime adulto de *Pan troglodytes* foi obtido a partir de um banco de dados digital, como MorphoSource.org, sob o código **(sbu:rs:94-1)** de espécime, no formato DICOM (247MB), sob dimensões de imagem de (512x512 pixels), com um espaçamento entre pixels (X, Y, Z) de 0.265625mm e espessura de fatia de 0.625000mm,

totalizando em um conjunto de 1246 imagens.

As imagens de Tomografia Computadorizada (TC) foram processadas no software Amira Visage para realizar a segmentação das estruturas ósseas. A partir dessa segmentação, foi reconstruído um modelo de superfícies 3D de alta fidelidade para cada espécime no formato STL (Standard Triangle Language), que serviu de base para as etapas seguintes.

O modelo foi então importado para o software HyperMesh, onde foi gerada a malha de elementos finitos. As mandíbulas foram discretamente utilizadas utilizando elementos tetraédricos sólidos de segunda ordem (C3D10), resultando em um modelo final com aproximadamente [1.000.000] elementos. A qualidade da malha foi verificada para garantir a precisão dos resultados.

A partir dessa segmentação, o Amira Visage nos permitiu reconstruir um modelo tridimensional (3D) de alta fidelidade. O resultado foi um sólido virtual que representa com precisão a complexa geometria e anatomia da mandíbula. Este modelo 3D serviu como a fundação sobre a qual toda a simulação foi construída.

4.1.2 ATRIBUIÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Para a atribuição das Propriedades Mecânicas: Para a simulação, o osso mandibular foi considerado um material único, homogêneo, linearmente elástico e isotrópico. Esta abordagem foi adotada para isolar as consequências mecânicas das diferenças de forma (morfologia) entre as espécies, eliminando variáveis relacionadas a possíveis diferenças nas propriedades do material. Foram atribuídos os seguintes valores, representando o osso cortical:

Módulo de Young: 18.000 MPa

Coeficiente de Poisson: 0.29

4.1.3 CONDIÇÕES DE (BOUNDARY) E CARGAS (LOAD)

Para as Definições das Condições de Contorno e Carregamento temos: As condições fisiológicas de mordida, a Articulação Temporomandibular (ATM) de cada modelo foi fixada em todos os graus de liberdade (x, y, z) para simular o apoio da mandíbula em posição anatômica ao eixo craniano para a simulação de mastigação alimentar.

Foi aplicada uma **força muscular total de 1250 N**, selecionada por ser um valor biologicamente plausível para as três espécies e que garante a validade da análise comparativa para grandes símios e representar um cenário de alto desempenho para testar os limites estruturais das mandíbulas (**Hylander, 2006; Strait et al., 2009**).

Foram analisados quatro cenários de carga distintos para cada espécie, aplicando-se a força de **1250 N** da seguinte forma:

Mordida no Incisivo Lateral: Força aplicada horizontalmente na coroa do incisivo lateral direito.

Mordida no Incisivo Vertical: Força aplicada verticalmente na coroa do incisivo lateral direito.

Mordida no Molar Lateral: Força aplicada horizontalmente na coroa dos últimos molares.

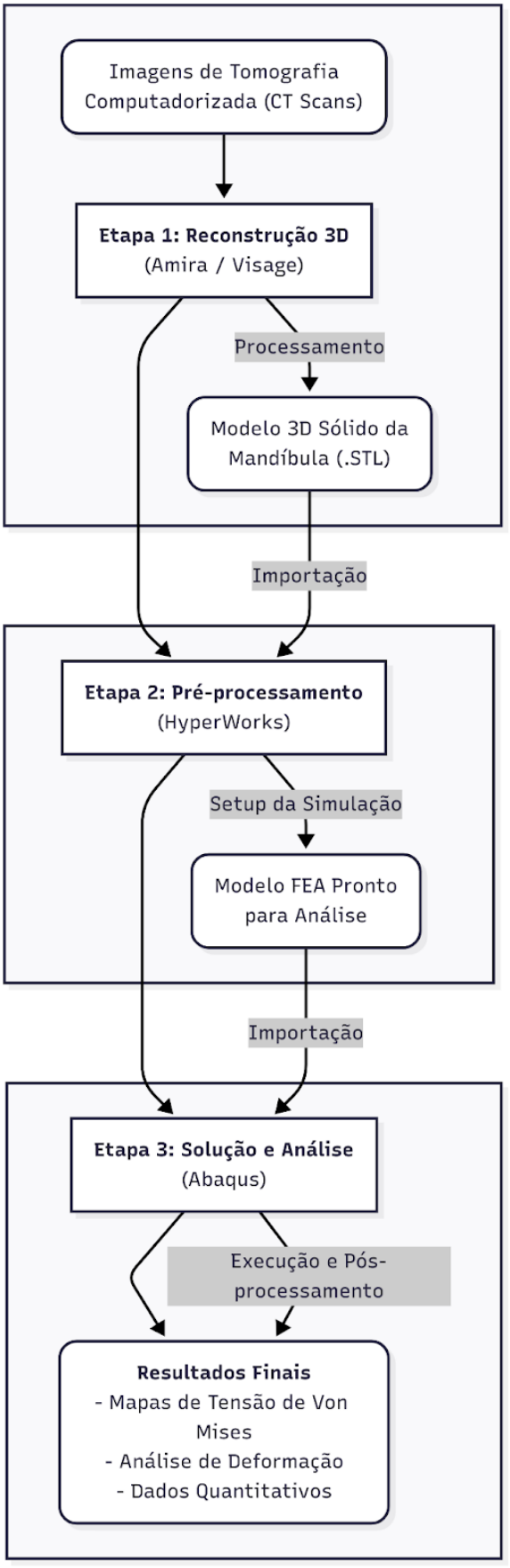
Mordida no Molar Vertical: Força aplicada verticalmente na coroa dos últimos molares.

4.1.4. ANÁLISE BIOMECÂNICA DE MANDÍBULAS DE PRIMATAS VIA MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.

Para investigar a biomecânica da mastigação em diferentes espécies de primatas, foi empregado a Análise de Elementos Finitos (FEA) utilizando o software Abaqus. Esta poderosa ferramenta de simulação computacional permite determinar como as tensões e deformações se distribuem através de uma estrutura complexa, como a mandíbula, em resposta a cargas musculares específicas.

Como resultado, foram obtidos dados quantitativos e representações visuais detalhadas da distribuição de Tensão de Von Mises. Estes mapas de cores, gerados pelas simulações, ilustram as áreas de maior e menor concentração de estresse, fornecendo insights cruciais sobre a funcionalidade e adaptação morfológica de cada espécime. A seguir, são apresentados os resultados para cada uma das espécies analisadas.

Com base no diagrama, a entrada que inicia todo o fluxo de trabalho de análise são as Imagens de Tomografia Computadorizada (CT Scans). Esses exames fornecem os dados brutos a partir dos quais o modelo tridimensional da mandíbula será reconstruído na primeira etapa do processo:


Imagens de Tomografia Computadorizada (CT Scans)
Etapa 1: Reconstrução 3D (Amira / Visage)
Processamento
Modelo 3D Sólido da Mandíbula (.STL)
Importação
Etapa 2: Pré-processamento (HyperWorks)
Setup da Simulação
Modelo FEA Pronto para Análise
Importação
Etapa 3: Solução e Análise (Abaqus)
Execução e Pós-processamento
Resultados Finais
- Mapas de Tensão de Von Mises
- Análise de Deformação
- Dados Quantitativos

4.1.5. PÓS-PROCESSAMENTO E VALIDAÇÃO (CÁLCULOS RPTM)

A etapa final do nosso processo foi o pós-processamento, que envolve a interpretação dos mapas de tensão gerados pelo Abaqus para entender o comportamento biomecânico da mandíbula.

Para garantir a confiabilidade e o rigor científico da simulação, os resultados foram submetidos a uma validação estatística por meio de cálculos de RPTM. Esse procedimento foi fundamental para verificar a precisão do modelo, comparando os resultados da simulação com parâmetros teóricos e, assim, confirmando que nossas análises representam um comportamento biologicamente realista e plausível.

5.1 RESULTADOS OBTIDOS PARA O ESPÉCIME: *Pongo pygmaeus*

Este capítulo apresenta os resultados da Análise de Elementos Finitos (FEA) da mandíbula de *Pongo pygmaeus* sob quatro condições distintas de carregamento. A análise qualitativa foca na distribuição das tensões de Von Mises, permitindo a visualização dos padrões de tensão na estrutura mandibular. A escala de cores representa a intensidade da tensão, onde tons azuis indicam baixa tensão e tons de verde, amarelo e vermelho indicam concentrações de tensão progressivamente maiores.

Estes parâmetros foram aplicados de forma consistente em todos os cenários, que envolvem a aplicação de forças verticais e laterais nos dentes incisivos e molares. O **Quadro 1** resume os valores de força aplicados e a média da tensão de Von Mises resultante para cada simulação. O **Quadro 2 e 3** resume a distribuição qualitativa das tensões de Von Mises nos molares e incisivos de *Pongo Pygmaeus sob* forças de 1250 N. A distribuição representa os dentes molares e incisivos (forças vetoriais laterais e verticais em sequência).

Para a análise comparativa do estresse de Von Mises, os valores de pico foram avaliados em relação aos limiares mecânicos do osso cortical. Segundo estudos de fadiga óssea, como o de a aplicação de cargas cíclicas na faixa de 80MPa é utilizada para induzir falha por fadiga **(Taylor et al. 2020).**

Conforme documentado **Reilly e Burstein (1975)**, a resistência máxima do osso cortical à tensão está na faixa de 160 MPa. Os valores observados na simulação, embora abaixo do limite de fratura, aproximam-se do limiar de fadiga, o que sugere que esforços repetitivos poderiam gerar microdanos. A mandíbula, no entanto, distribui parte da carga, o que mitiga o risco de falha imediata **Reilly e Burstein (1975)**.

Quadro 1. Magnitudes de forças vetoriais aplicadas aos modelos de elementos finitos, em Newtons; Média de estresse de Von Mises (MPa). Modelo: *Pongo Pygmaeus.*

Simulação	Média de estresse Von Mises (MPa)	Fonte da Imagem
Incisivo Lateral	66.79	Figura 1
Incisivo Vertical	104.41	Figura 2
Molar Lateral	32.79	Figura 3
Molar Vertical	36.45	Figura 4

Fonte: O autor (2025).

Quadro 2 – Distribuição qualitativa das tensões de Von Mises nos molares de *Pongo Pygmaeus sob* forças de 1250 N. A distribuição representa os dentes molares (forças vetoriais laterais e verticais em sequência).

Vista da Mandíbula	Tipo de Força Aplicada	Região de Maior Tensão (Von Mises)	Observações Principais
Direita	Lateral (Molar)	Corpo mandibular (ipsilateral).	Tensão de compressão elevada e bem distribuída no corpo espesso do lado da mordida, ideal para durofagia.
Esquerda	Lateral (Molar)	Ramo mandibular (contralateral).	Padrão clássico de torção, com alta tensão de tração no ramo, indicando uma estrutura que resiste bem à flexão
Frontal	Lateral (Molar)	Sínfise robusta e corpo mandibular contralateral.	A sínfise alta e espessa é fundamental para resistir à torção gerada pela mastigação unilateral de alimentos duros.
Posterior	Lateral (Molar)	Tensão moderada nos ramos.	A força de torção é gerenciada eficientemente pela robustez geral da mandíbula.
Direita	Vertical (Molar)	Processo alveolar e base do corpo mandibular (ipsilateral).	Transmissão de força axial muito eficiente; a tensão se dissipa diretamente para o corpo mandibular massivo.
Esquerda	Vertical (Molar)	Tensão significativamente baixa no lado oposto.	A força de esmagamento vertical é quase inteiramente contida no lado de trabalho devido à rigidez da estrutura.
Frontal	Vertical (Molar)	Tensão de compressão uniforme abaixo dos molares.	Demonstra uma plataforma de mastigação estável, sem pontos de fraqueza estrutural.
Posterior	Vertical (Molar)	Baixa tensão geral, com leve concentração no lado de trabalho.	Confirma a estabilidade e a alta resistência da mandíbula para forças de esmagamento extremas.

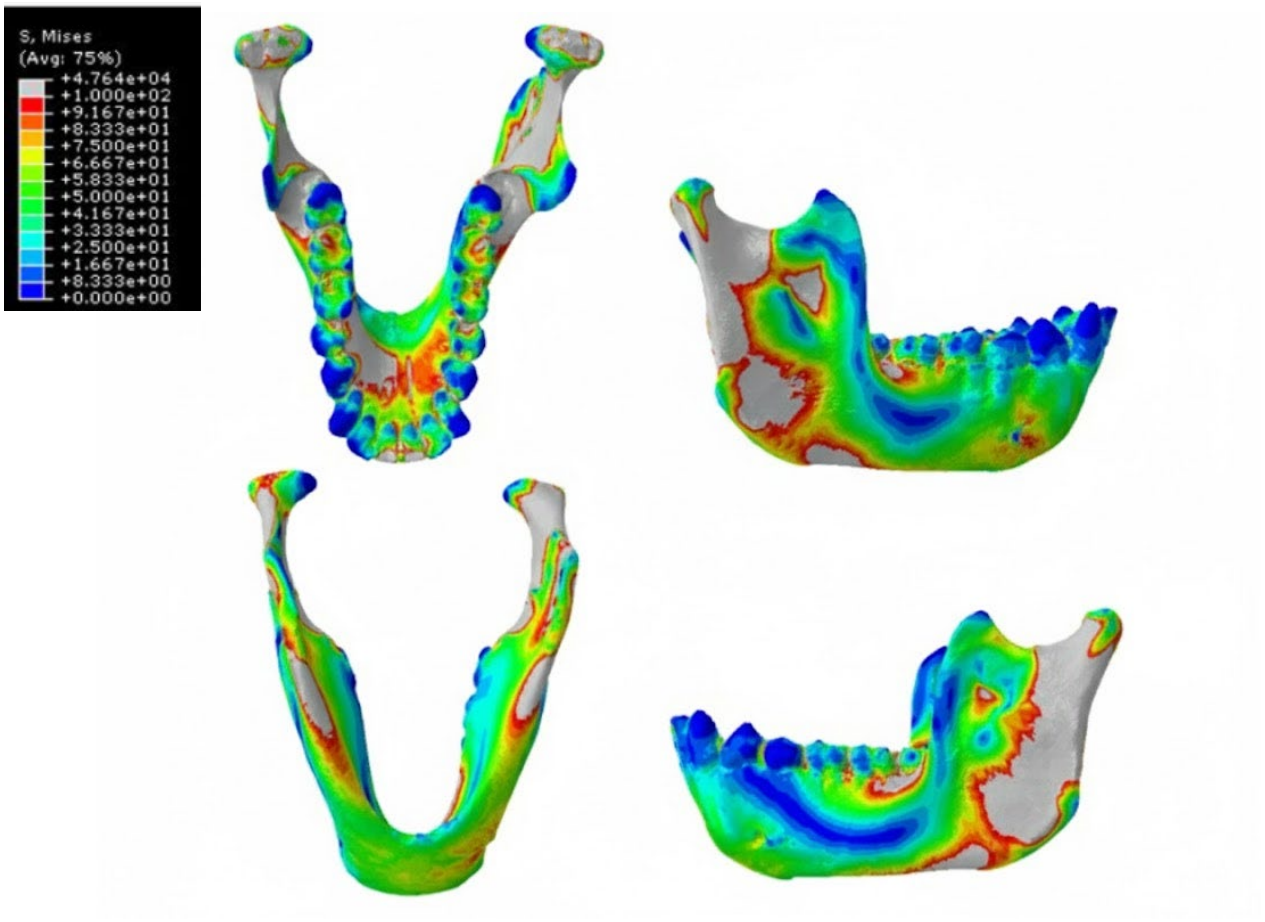
Fonte: Simulações por elementos finitos utilizando modelo Abaqus/Standard 6.14-1 com força de 1250 N.

Quadro 3 – Distribuição qualitativa das tensões de Von Mises nos molares de *Pongo Pygmaeus sob* forças de 1250 N. A distribuição representa os dentes incisivos (forças vetoriais laterais e verticais em sequência).

Vista da Mandíbula	Tipo de Força Aplicada	Região de Maior Tensão (Von Mises)	Observações Principais
Direita	Lateral (Incisivo)	Região alveolar do incisivo.	Tensão concentrada no ponto de aplicação da força, mas menor do que no lado de balanceio.
Esquerda	Lateral (Incisivo)	Corpo e ramo mandibular.	Tensão elevada no lado oposto à força, indicando forte torção e flexão da mandíbula.
Frontal	Lateral (Incisivo)	Sínfise mandibular.	Alta concentração de tensão na sínfise, que atua para resistir às forças de torção.
Posterior	Lateral (Incisivo)	Tensão moderada distribuída nos ramos.	A torção gerada anteriormente se propaga para a região posterior, tensionando os ramos
Direita	Vertical (Incisivo)	Processo alveolar abaixo dos incisivos direitos.	A força é contida localmente, com alta compressão na região anterior direita.
Esquerda	Vertical (Incisivo)	Processo alveolar abaixo dos incisivos esquerdos.	Padrão simétrico ao lado direito; a tensão é contida na região anterior esquerda.
Frontal	Vertical (Incisivo)	Toda a região alveolar abaixo dos incisivos.	Alta compressão localizada, indicando uma estrutura frontal robusta para a mordida vertical.
Posterior	Vertical (Incisivo)	Tensão muito baixa em toda a região posterior.	A força é eficientemente contida na parte anterior da mandíbula, sem deformar os ramos.

Fonte: Simulações por elementos finitos utilizando modelo Abaqus/Standard 6.14-1 com força de 1250 N.

Figura 1– Análise de Elementos Finitos (FEA) de uma mandíbula de *Pongo pygmaeus*, simulando a aplicação de força no **Incisivo Lateral**. Magnitudes de força muscular aplicadas ao modelo mandibular, em Newtons.



A escala de cores representa a distribuição de tensão (estresse) de von Mises, onde tons mais quentes (vermelho) indicam maior concentração de tensão.

O cenário analisado simula a aplicação de uma força lateral de 1250 N sobre os dentes incisivos do espécime. Conforme a escala de cores da legenda, a cor vermelha indica as maiores deformações. Isso aponta para uma concentração elevada da tensão, calculada pelo critério de Von Mises, especialmente na região do colo dos dentes - a junção entre a coroa e a raiz. Essa tensão se distribui ao longo da raiz, com maior intensidade na face radicular inserida na mandíbula. Interpretando esses resultados, a força aplicada provoca uma flexão no dente, o que gera estresse na raiz e em sua interface com o osso alveolar.

A legenda indica um valor máximo de tensão de Von Mises de 66,80 MPa, representando uma sobrecarga de moderada a alta. A aplicação de força lateral no incisivo resultou em tensão máxima de 66,80 MPa, localizada principalmente no colo do dente e distribuída pela raiz até o osso alveolar.

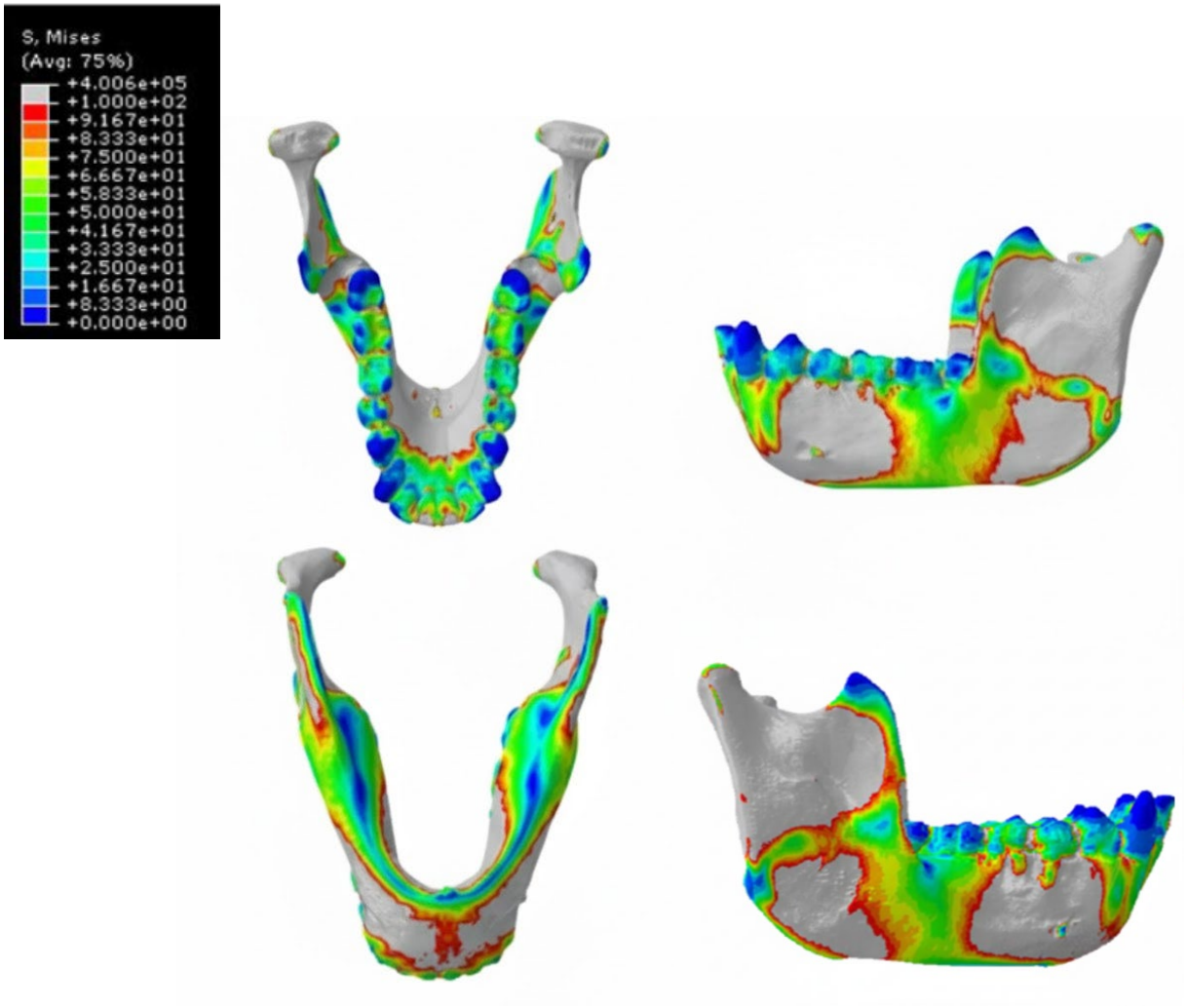
Essa condição biomecânica está de acordo com a dieta do orangotango, que inclui alimentos duros e fibrosos, indicando uma adaptação para lidar com sobrecargas frequentes, ainda que em condições de alto custo mecânico.

Segundo **(Carter, Hayes, 1977),** cargas repetidas nesse nível de estresse são o ponto a partir na qual microfraturas podem começar a surgir e se desenvolver na estrutura do tecido ósseo mandibular ao longo do tempo.

Uma fratura real e imediata, decorrente de um único impacto, só ocorreria com pressões muito mais elevadas **(Reilly, Burstein, 1975)**. Portanto, mesmo que essas forças aplicadas representem uma sobrecarga de moderada a alta, ela não seria suficiente para causar uma falha de imediato, pois a mandíbula é capaz de distribuir parte dessa sobrecarga para outras regiões. A análise sugere que as forças aplicadas, embora próximas ao limite de fadiga, são uma representatividade da dieta de *Pongo pygmaeus,* indicando o consumo de alimentos duros, como sementes e cascas, que exigiram altas forças de mordida **(Voguel, Zulfa, Van Woerden, 2017).**

Dessa forma, conclui-se que este é um esforço rotineiro na dieta do *Pongo pygmaeus,* representando um evento biomecânico normal e seguro para sua estrutura mandibular, ainda que no limite superior da sua capacidade de carga repetitiva.

Figura 2 – Análise de Elementos Finitos (FEA) de uma mandíbula de *Pongo pygmaeus*, simulando a aplicação de força no **incisivo vertical**. Magnitudes de força muscular aplicadas ao modelo mandibular, em Newtons.



A escala de cores representa a distribuição de tensão (estresse) de von Mises, onde tons mais quentes (vermelho) indicam maior concentração de tensão.

O cenário analisado simula a aplicação de uma força vertical de 1250 N sobre os dentes incisivos do espécime. Conforme a escala de cores da legenda, a cor vermelha indica as maiores deformações. Isso aponta para uma concentração elevada da tensão, calculada pelo critério de Von Mises, especialmente nas regiões laterais e na parte frontal da mandíbula na região basal posterior.

Esse critério de análise é observada quando levamos em conta a região temporomandibular (ATM), em que o stress de Von Mises é facilmente observada nos colos dos dentes, onde essa região é um reflexo do ponto de alavancagem referente a zona da (ATM), quando o *Pongo pygmaeus* morde um alimento de propriedades duras. Porém essa tensão não fica apenas nessa região, pois ela é distribuída ao longo da raiz dos dentes. Isso significa que, ao morder, o dente sofre uma leve flexão, conhecido como movimento de torção mandibular, transmitindo o estresse para o osso alveolar ao redor.

Isso nos leva a concluir, que quando observamos a mandíbula pelas laterais, notamos que o estresse representativo em vermelho é presente em grande parte da estrutura mandibular, não se limitando assim apenas aos dentes. Essa análise lateral da distribuição de stress de Von Mises, é reflexo da mandíbula ser projetada para a distribuição das cargas, compartilhando todas essas tensões por uma área maior e projetando pontos específicos e importantes de um impacto excessivo. Mesmo que seja possível a observação de algumas áreas vermelhas no corpo mandibular, a maior intensidade está próxima aos dentes e ao longo da crista alveolar.

A legenda indica um valor máximo de tensão de von Mises de 104,42 MPa. Sob carga vertical nos incisivos, a tensão máxima registrada foi de 104,42 MPa, com maior concentração ao longo da crista alveolar, nas laterais e na região anterior da mandíbula.

A mandíbula, no entanto, distribui parte da carga, reduzindo o risco imediato. Essa condição biomecânica está de acordo com a dieta do orangotango, que inclui alimentos duros e fibrosos, indicando uma adaptação para lidar com sobrecargas frequentes, ainda que em condições de alto custo mecânico.

Portanto, mesmo que essas forças aplicadas representem uma sobrecarga de moderada a alta, ela não seria suficiente para causar uma falha de imediato, pois a mandíbula é capaz de distribuir parte dessa sobrecarga para outras regiões.

Porém se analisarmos numa perspectiva de tensões repetitivas causadas por forças resultantes de sua dieta alimentar, isso poderia ser um problema para o *Pongo pygmaeus* à longo prazo e assim poderíamos ter uma análise precisa que essa intensidade de força aplicada de 1250 N, representada pelos vetores de forças verticais, teoricamente, levaria a microlesões acumuladas no osso, por conta dessa repetição excessiva de carga gerada.

A análise sugere que as forças aplicadas, embora próximas ao limite de fadiga, são uma representatividade da dieta de *Pongo pygmaeus,* indicando o consumo de alimentos duros, como sementes e cascas, que exigiram altas forças de mordida **(Voguel, Zulfa, Van Woerden, 2017).**

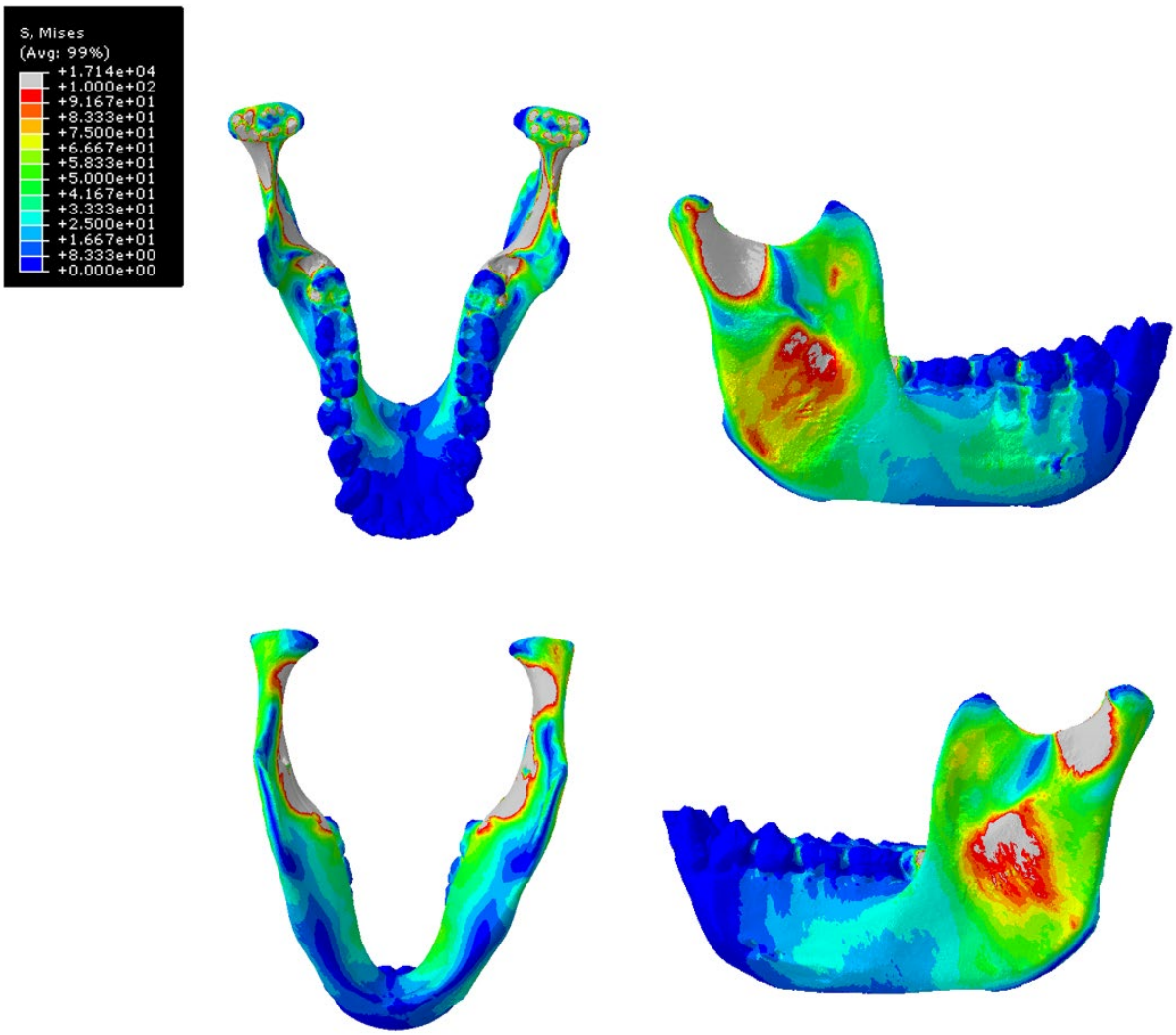
Dessa forma, a imagem da força vetorial aplicada de forma vertical, representaria o tipo de vetor preciso do funcionamento da sua mandíbula para a sua alimentação. Mas, longe de ser preocupante ao representar um sinal de fragilidade, pois isso reflete a adaptação evolutiva de forma precisa, da dieta que muitas das vezes exigem uma força aplicada extremamente alta.

Essa preocupação não refletiria a realidade da movimentação de mastigação vertical, que é a mais comum e habitual, levando em consideração que existem estudos garantindo que os *Pongo pygmaeus* conseguem suportar cargas muito mais elevadas nos seus dentes incisivos, como forças aplicadas de 1031 N, que equivale 10,31 Mpa por uma área 1 cm^2, segundo estudos realizados.

A força aplicada do vetor referente a 1250 N em um dente incisivo de orangotango é bastante significativa, porém a anatomia mandibular de um espécie macho adulto, consegue suportar facilmente essas cargas, pois ela consegue ser distribuída por toda a sua região mandibular.

Forças máximas de mordida tão altas quanto 2000 N foram indiretamente inferidas para *P. pygmaeus* **(Lucas *et al.* 1994**), consideravelmente maiores do que o testado nesta análise, considerando as forças vetoriais aplicadas de 1250 N.

Figura 3 – Análise de Elementos Finitos (FEA) de uma mandíbula de *Pongo pygmaeus,* simulando a aplicação de força no **molar lateral**. Magnitudes de força muscular aplicadas ao modelo mandibular, em Newtons.



A escala de cores representa a distribuição de tensão (estresse) de von Mises, onde tons mais quentes (vermelho) indicam maior concentração de tensão.

O cenário analisado simula a aplicação de uma força lateral de 1250 N sobre os dentes molares do espécime. Conforme a escala de cores da legenda, a cor azul é bastante predominante na maior parte das porções mandibulares. As poucas regiões em vermelho que demonstram a concentração elevada da tensão, calculada pelo critério de Von Mises, é especialmente nas regiões abaixo dos dentes molares onde a força vetorial lateral está sendo aplicada, se espalhando para em grande parte para a região lateral do corpo da mandíbula.

Isso nos leva a concluir, que quando observamos a mandíbula pelas laterais, notamos que o estresse representativo em vermelho está sofrendo uma torção de corpo mandibular, resultante da força vetorial lateral de 1250 N, deixando nítido o movimento de torção do corpo mandibular.

Na simulação de força lateral aplicada aos molares, a tensão máxima foi de 32,79 MPa, concentrada ao redor do dente em contato e distribuída lateralmente pelo corpo mandibular. Os concentrada principalmente na articulação temporomandibular (ATM).

Esse valor é considerado baixo frente ao limiar de fadiga, o que demonstra a eficiência da mandíbula em absorver forças compressivas durante o esmagamento alimentar. A robustez dos molares, com esmalte espesso e cúspides arredondados, garante resistência elevada, permitindo que o orangotango processe alimentos fibrosos e duros de forma segura e prolongada. Esse resultado se relaciona com a hipótese dos alimentos de refúgio, que exigem alta eficiência mastigatória em períodos de escassez.

Além disso, observou-se maior estresse no lado contralateral à aplicação da força, sugerindo participação ativa da articulação temporomandibular no balanceamento da mordida. Isso confirma que a mandíbula de *Pongo pygmaeus* é altamente eficiente para suportar cargas laterais, refletindo uma adaptação evolutiva ao processamento de alimentos fibrosos e resistentes.

Observando a mandíbula pela vista posterior, a imagem fica ainda mais clara. Vemos a distribuição com padrões homogêneos bem definidos, explicando que as tensões de Von Mises partem de uma coloração predominante verde e azulada, mostrando assim como a estrutura inteira trabalha em conjunto para suportar a mordida bilateral.

Um dos detalhes mais interessantes dessa observação, é o que acontece na articulação temporomandibular (ATM), onde a mandíbula se conecta com o crânio do *Pongo pygmaeus.*

De modo geral podemos dizer que o lado de trabalho, onde as forças vetoriais foram aplicadas lateralmente reflete uma tendência de pouca tensão dessa distribuição de Von Mises. No entanto, no lado oposto (lado direito da mandíbula), vemos uma concentração mais significativa de stress, que precisa absorver parte dessa tensão para balanceamento.

A legenda nos informa um valor máximo de tensão de Von Mises 32.79 MPa. Esse stress é quase três vezes menor que os 104,31 MPa que vimos nos incisivos com aplicação de forças vetoriais verticais de 1250 N.

Conseguimos concluir assim, que a mandíbula do espécime é extremamente eficiente e segura para morder com os molares. Assim as tensões de Von Mises são distribuídas por uma área óssea muito mais ampla, resultando em picos de tensão muito mais baixos. Enquanto a mordida frontal dos dentes incisivos leva a estrutura mandibular ao seu limite de fadiga, assim a mordida dos dentes molares representa um esforço comum em uma dieta alimentar de rotina, muito abaixo do limiar de risco para o osso.

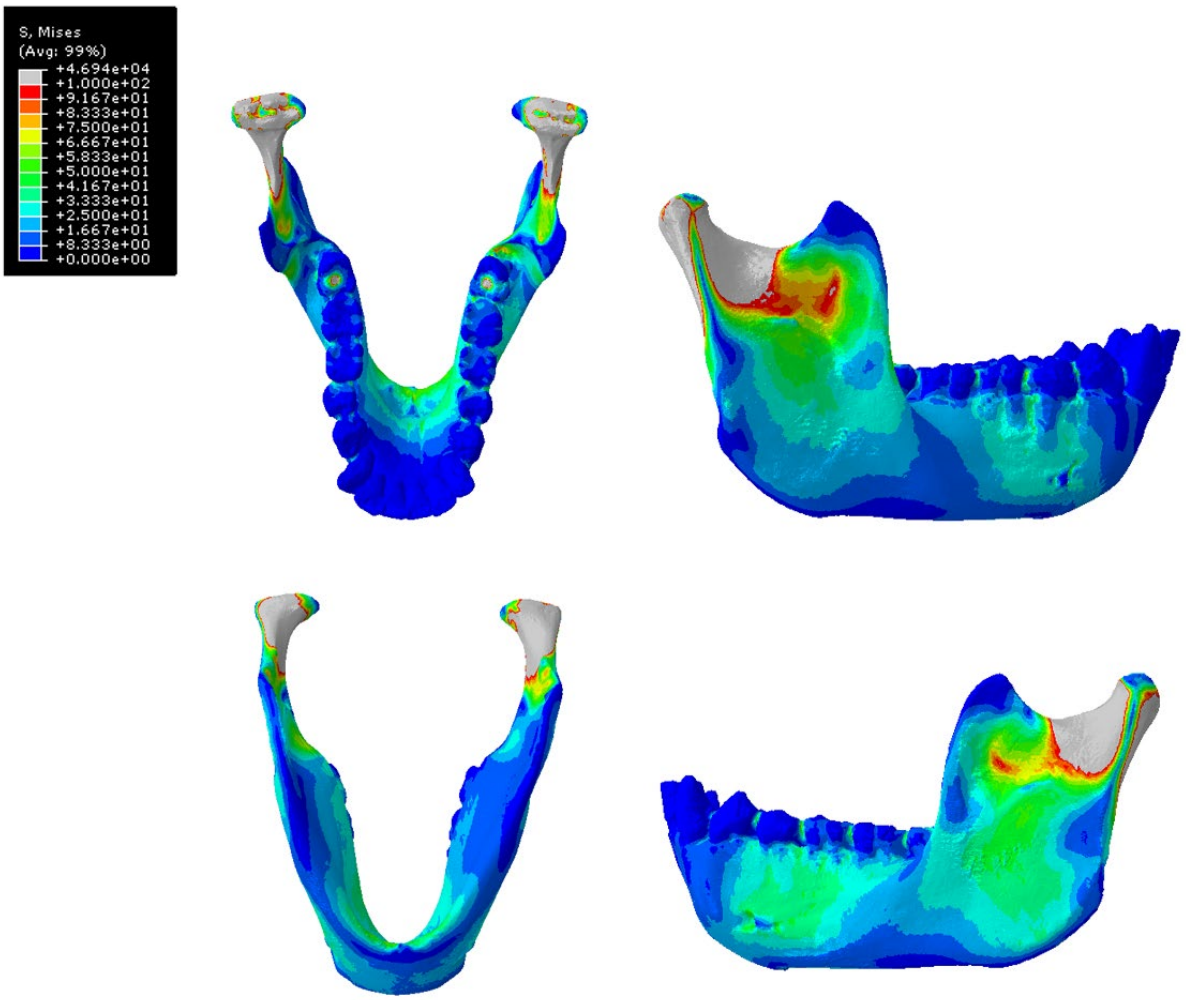
Outro detalhe importante dessa conclusão é o fato que os dentes incisivos, atuam como uma alavanca que gera tensões altíssimas em pontos específicos, ideal para quebrar alimentos duros, mas é uma atividade de alto estresse para a mandíbula. Já os dentes molares refletem o funcionamento de uma poderosa ferramenta dentária de esmagamento alimentar, pois a mandíbula é otimizada para essa função, distribuindo a força de maneira ampla e segura, permitindo que o orangotango aplique pressões de stress muito elevadas para triturar alimentos duros sem colocar a estrutura óssea em risco.

Podemos concluir assim, que a força aplicada é longe de ser considerada um sinal de fragilidade, isso reflete a grande adaptação do *Pongo pygmaeus* possuem, onde a forma e a função dos dentes incisivos para a sua alimentação de alimentos duros estão em perfeita harmonia. Essa especialização permitiu aferir que se associarmos a nossa análise de elementos finitos, a mandíbula se mostra bem eficaz para suportar essas cargas, por conta dos desafios ambientais em sua dieta, considerando assim que a biomecânica mandibular é bem adaptada para suportar essas cargas.

Essa análise dupla nos fornece uma visão completa da adaptação da mandíbula de *Pongo pygmaeus.* A mandíbula é perfeitamente projetada tanto para um corte frontal da sua dieta de alimentos duros, quanto para a força bruta de uma moagem lateral. Essa baixa tensão geral

indica que o orangotango pode moer e triturar alimentos fibrosos e duros por longos períodos sem acumular danos por fadiga em sua estrutura óssea, uma adaptação crucial para uma dieta que exige extenso processamento oral **(Daegling, Mcgraw, 2007).**

Figura 4 – Análise de Elementos Finitos (FEA) de uma mandíbula de *Pongo pygmaeus*, simulando a aplicação de força no **molar vertical**. Magnitudes de força muscular aplicadas ao modelo mandibular, em Newtons.



A escala de cores representa a distribuição de tensão (estresse) de von Mises, onde tons mais quentes (vermelho) indicam maior concentração de tensão.

O cenário analisado simula a aplicação de uma força vertical de 1250 N sobre os dentes molares do espécime. Conforme a escala de cores da legenda, a cor azul é bastante predominante em praticamente toda a estrutura mandibular. As poucas regiões em vermelho que demonstram a concentração elevada da tensão, calculada pelo critério de Von Mises, é especialmente nas regiões temporomandibular (ATM).

Essa grande distribuição de cor azul em praticamente toda a mandíbula, reflete que essa análise não trata-se de um movimento de moagem ou rasgos, mas sim de um ato mandibular comum de esmagamento alimentar. Isso é evidente quando a análise dos elementos finitos (FEA) consegue nos demonstrar que a tensão máxima de Von Mises de 36.45 MPa, é um reflexo extremamente eficaz da estrutura mandibular, resultando assim na grande adaptação evolutiva para o uso de grandes forças geradas no processo de moagem da mastigação alimentar.

Na aplicação vertical sobre os molares, a tensão máxima observada foi de 36,45 MPa, concentrada especialmente na região da articulação temporomandibular (ATM). Apesar desse pico localizado, o restante da mandíbula apresenta baixa tensão, predominando tons azulados. Isso evidencia a robustez estrutural dos molares, cuja morfologia (esmalte espesso e cúspides arredondadas) é ideal para resistir a forças compressivas intensas **(Ungar, 2010).**

Esse valor é considerado baixo frente ao limiar de fadiga, o que demonstra a eficiência da mandíbula em absorver forças compressivas durante o esmagamento alimentar. A robustez dos molares, com esmalte espesso e cúspides arredondados, garante resistência elevada, permitindo que o orangotango processe alimentos fibrosos e duros de forma segura e prolongada. Esse resultado se relaciona com a hipótese dos alimentos de refúgio, que exigem alta eficiência mastigatória em períodos de escassez.

Quando a força é aplicada, a primeira estrutura a recebê-la é o próprio dente molar. Os molares dos orangotangos são caracterizados por seu esmalte espesso e cúspides baixas e arredondadas, uma morfologia ideal para resistir a altas forças compressivas sem fraturar (**Ungar, 2010).**

Esse padrão mostra que o corpo mandibular atua como uma viga rígida, absorvendo e dissipando cargas elevadas de maneira uniforme. Assim, a mordida vertical dos molares não representa risco de fadiga ou fratura, mas sim uma função biomecânica altamente otimizada para esmagar e triturar alimentos de alta dureza. Esse desempenho está relacionado à hipótese

dos fall-back foods, alimentos de menor qualidade disponíveis em épocas de escassez, que exigem esforço mastigatório extremo **(Marshall, Wrangham, 2007).**

Um dos resultados mais importantes dessa simulação de elementos finitos (FEA) é a intensa concentração de estresse no côndilo da articulação da mandíbula na parte de trás e na zona de fixação da articulação temporomandibular (ATM). Podemos entender que a força vetorial aplicada verticalmente na região dos dentes molares é um reflexo que a mandíbula irá sofrer uma carga tanto para o lado de incidência vetorial, quanto para o lado oposto do vetor (lado de cima), e essa força é absorvida pela região de inserção do côndilo mandibular com o crânio do *Pongo pygmaeus.*

A articulação, portanto, não está apenas pivotando; ela está sob intensa compressão. Isso explica por que em grandes primatas, e especialmente em machos, o côndilo mandibular é grande e a fossa craniana correspondente é robusta, ambos adaptados para suportar cargas compressivas repetitivas sem degenerar **(Ross, Hylander, 2000).**

O valor da tensão máxima de Von Mises de 36,45 MPa, mesmo sendo significativamente alto, está dentro do limite mecânico ideal para evitar a fadiga dentária e do resto da mandíbula. Levando em conta que o limiar dessa fadiga óssea corresponderia a uma pressão de cerca de 815 kg por cm^2, o que equivale a cerca de (80 MPa), ainda sim a estrutura está totalmente segura e adaptada para suportar essa carga vetorial de forças mastigatórias. 80 MPa, é o ponto onde o osso, se submetido a essa carga repetidamente, começaria a desenvolver microfraturas. (**Carter, D. R., Hayes, W. C. 1977).**

Essa habilidade está frequentemente ligada à hipótese dos alimentos de refúgio (*fall-back foods*). Quando os alimentos preferidos e mais macios (como frutas maduras) são escassos, os orangotangos dependem de itens de menor qualidade, mas mais abundantes, que são frequentemente protegidos por cascas duras ou são muito fibrosos **(Marshall, Wrangham, 2007).**

Podemos assim concluir pelas análises desse gráfico, que a mandíbula do orangotango, não é apenas uma adaptação para sua dieta, mas é robusta suficiente para lidar com mudanças drásticas do seu nicho ecológico.

Numa análise geral a mordida vertical dos dentes molares é um conjunto evolutivo de mudanças em sua morfologia morfofuncional da mandíbula, tendo grande resistência em suas

articulações e ossos densos suficientes para produzir forças extremamente elevadas de maneira eficaz e segura, necessárias para a obtenção dos alimentos desejados presente no seu nicho ecológico.

RESULTADOS OBTIDOS PARA O ESPÉCIME: *Gorilla gorilla*

Este capítulo apresenta os resultados da Análise de Elementos Finitos (FEA) da mandíbula de *Gorilla gorilla* sob quatro condições distintas de carga. A análise qualitativa foca-se na distribuição das tensões de Von Mises, permitindo a visualização dos padrões de estresse na estrutura mandibular. A escala de cores representa a intensidade de tensão, onde os tons (azul) indicam baixa tensão e os tons (verde, amarelo e vermelho) indicam concentrações de estresse cada vez maiores.

Estes parâmetros foram aplicados de forma consistente em todos os cenários de estudo, que envolvem a aplicação de forças verticais e laterais tanto nos dentes incisivos quanto nos molares. O **Quadro 3** resume quantitativamente os valores de força aplicados e a média de estresse de Von Mises (média das tensões resultantes para cada simulação).

Para a análise comparativa do estresse de Von Mises, os valores de pico foram avaliados em relação aos limiares mecânicos do osso cortical. Segundo estudos de fadiga óssea, como o de a aplicação de cargas cíclicas na faixa de 80MPa é utilizada para induzir falha por fadiga **(Taylor et al. 2020).**

Conforme documentado **Reilly e Burstein (1975)**, a resistência máxima do osso cortical à tensão está na faixa de 160 MPa. Os valores observados na simulação, embora abaixo do limite de fratura, aproximam-se do limiar de fadiga, o que sugere que esforços repetitivos poderiam gerar microdanos. A mandíbula, no entanto, distribui parte da carga, o que mitiga o risco de falha imediata **Reilly e Burstein (1975)**. O **Quadro 5 e 6** resume a distribuição qualitativa das tensões de Von Mises nos molares e incisivos de *Pongo Pygmaeus sob* forças de 1250 N. A distribuição representa os dentes molares e incisivos (forças vetoriais laterais e verticais em sequência).

Para a análise comparativa do estresse de Von Mises, os valores de pico foram avaliados em relação aos limiares mecânicos do osso cortical. Segundo estudos de fadiga óssea, como o de a aplicação de cargas cíclicas na faixa de 80MPa é utilizada para induzir falha por fadiga **(Taylor et al. 2020).**

Conforme documentado **Reilly e Burstein (1975)**, a resistência máxima do osso cortical à tensão está na faixa de 160 MPa. Os valores observados na simulação, embora abaixo do limite de fratura, aproximam-se do limiar de fadiga, o que sugere que esforços repetitivos poderiam gerar microdanos. A mandíbula, no entanto, distribui parte da carga, o que mitiga o risco de falha imediata **Reilly e Burstein (1975)**.

Quadro 4. Magnitudes de forças vetoriais aplicadas aos modelos de elementos finitos, em Newtons; Média de estresse de Von Mises (MPa). Modelo: *Gorilla gorila*.

Simulação	Média de estresse Von Mises (MPa)	Fonte da Imagem
Incisivo Lateral	22.10	Figura 5
Incisivo Vertical	23.81	Figura 6
Molar Lateral	9.46	Figura 7
Molar Vertical	8.60	Figura 8

Fonte: O autor (2025).

Quadro 5 – Distribuição qualitativa das tensões de Von Mises nos molares de *Gorilla gorila* sob forças de 1250 N. A distribuição representa os dentes molares (forças vetoriais laterais e verticais em sequência).

Vista da Mandíbula	Tipo de Força Aplicada	Região de Maior Tensão (Von Mises)	Observações Principais
Direita	Lateral (Molar)	Corpo mandibular profundo e alto ramo ascendente (ipsilateral)	Tensão distribuída por uma grande área, refletindo uma estrutura massiva adaptada para moagem prolongada.

Esquerda	Lateral (Molar)	Ramo mandibular e gôniaco (ângulo) contralateral.	Alta tensão no ramo oposto, indicando uma mandíbula extremamente resistente às forças de torção geradas pela mastigação de vegetação fibrosa.
Frontal	Lateral (Molar)	Sínfise alta e robusta, e corpo contralateral.	A sínfise fundida e alta é crucial para dissipar a torção durante a mastigação unilateral pesada
Posterior	Lateral (Molar)	Processo coronoide e côndilo no lado de balanceio.	Estresse significativo, indicando grande ativação muscular (temporal e masseter) para estabilizar a mandíbula.
Direita	Vertical (Molar)	Todo o corpo mandibular abaixo dos molares (ipsilateral).	Tensão extremamente bem distribuída, mostrando uma adaptação para suportar forças verticais contínuas e de alta magnitude
Esquerda	Vertical (Molar)	Tensão muito baixa em toda a estrutura.	A força vertical é contida quase que inteiramente no lado de trabalho, devido à rigidez da mandíbula.
Frontal	Vertical (Molar)	Processos alveolares e base do corpo mandibular.	Tensão de compressão distribuída uniformemente, sem pontos de fragilidade estrutural.
Posterior	Vertical (Molar)	Tensão residual mínima, quase inexistente.	Confirma a imensa estabilidade estrutural da mandíbula para a mastigação vertical e poderosa.

Fonte: Simulações por elementos finitos utilizando modelo Abaqus/Standard 6.14-1 com força de 1250 N.

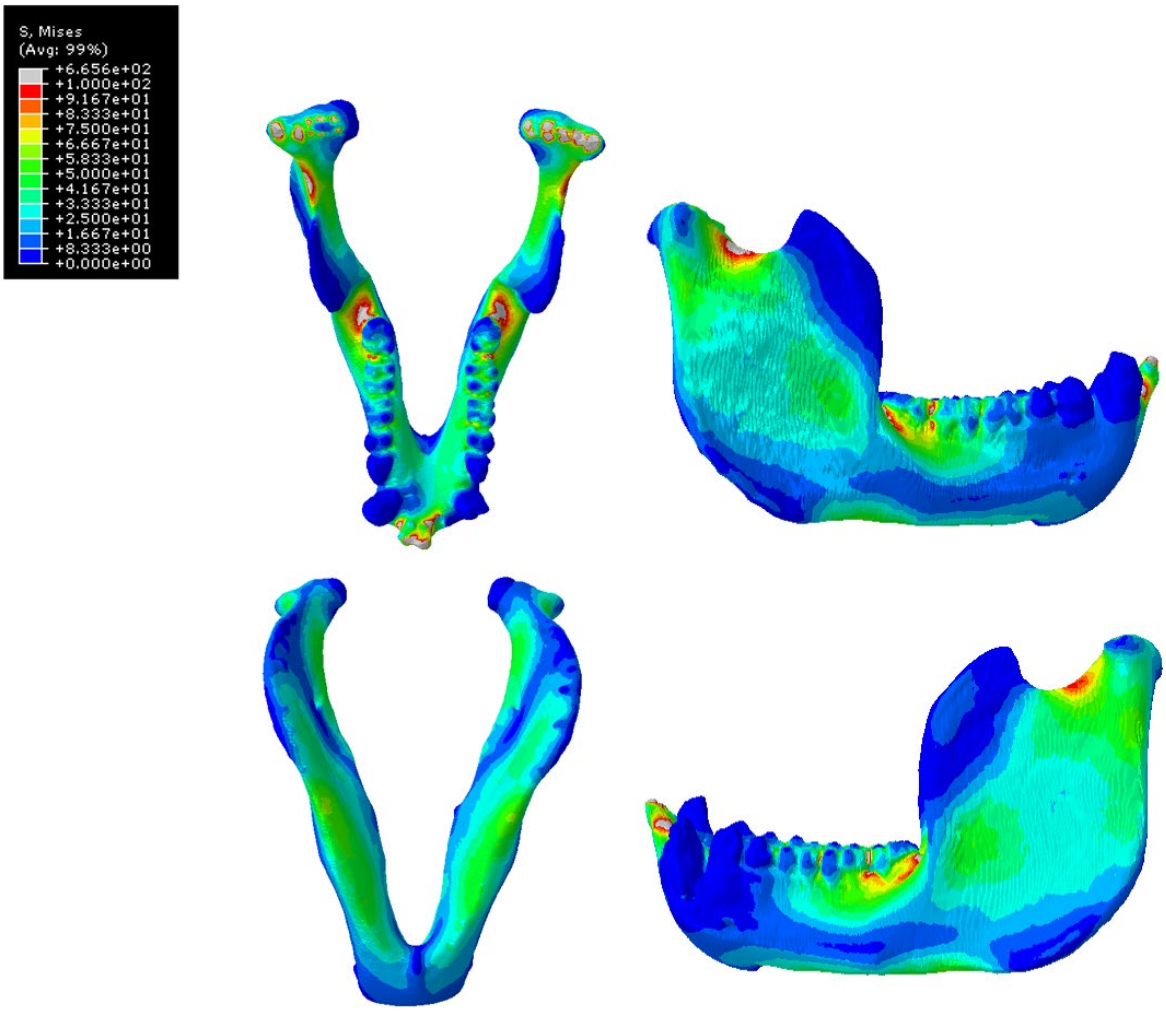
Quadro 6 – Distribuição qualitativa das tensões de Von Mises nos molares de *Gorilla gorila* sob forças de 1250 N. A distribuição representa os dentes incisivos (forças laterais e verticais em sequência).

Vista da Mandíbula	Tipo de Força Aplicada	Região de Maior Tensão (Von Mises)	Observações Principais
Direita	Lateral (Incisivos)	Região alveolar do incisivo.	Tensão localizada e bem distribuída pela robustez do osso alveolar.
Esquerda	Lateral (Incisivos)	Corpo e ramo mandibular contralaterais.	Alta tensão distribuída por uma grande área, indicando imensa resistência à torção e flexão.
Frontal	Lateral (Incisivos)	Sínfise mandibular alta e espessa.	A sínfise robusta absorve a maior parte da tensão, resistindo eficientemente
Posterior	Lateral (Incisivos)	Tensão significativa no ramo de balanceio.	A torção gerada anteriormente se propaga, engajando os músculos para estabilizar a mandíbula.
Direita	Vertical (Incisivos)	Processo alveolar abaixo dos incisivos direitos.	Força contida localmente; a compressão é dissipada pela massa óssea anterior.
Esquerda	Vertical (Incisivos)	Processo alveolar abaixo dos incisivos esquerdos.	Padrão simétrico ao lado direito, demonstrando uma arcada anterior muito forte.
Frontal	Vertical (Incisivos)	Toda a região alveolar anterior.	Alta compressão distribuída uniformemente, refletindo uma estrutura adaptada para o uso vigoroso dos incisivos.

Posterior	Vertical (Incisivos)	Tensão praticamente inexistente na região posterior.	A força é totalmente contida na parte anterior maciça da mandíbula, sem deformar os ramos.

Fonte: Simulações por elementos finitos utilizando modelo Abaqus/Standard 6.14-1 com força de 1250 N.

Figura 5 – Análise de Elementos Finitos (FEA) de uma mandíbula de Gorilla gorila, simulando a aplicação de força no **incisivo lateral**. Magnitudes de força muscular aplicadas ao modelo mandibular, em Newtons.



A escala de cores representa a distribuição de tensão (estresse) de von Mises, onde tons mais quentes (vermelho) indicam maior concentração de tensão.

O cenário analisado simula a aplicação de uma força lateral sobre os dentes incisivos do espécime. Conforme a escala de cores da legenda, a cor vermelha indica as maiores deformações. Isso aponta para uma concentração elevada de Von Mises, especialmente nas raízes dos dentes incisivos, dos dentes molares e na parte superior da mandíbula na região do (côndilo), próximo a porção de fixação temporomandibular (ATM).

A legenda indica um valor máximo de tensão de Von Mises de 22.10 MPa, representando uma sobrecarga baixa, marcada pela transição da cor verde para a amarela, que é a que concluímos como a tensão de maior interesse nessa análise. Essa distribuição de 22.10 MPa, está longe de apresentar um risco para causar uma possível fadiga óssea que gera em torno de (80 MPa).

Apesar da baixa tensão geral, a distribuição não é perfeitamente homogênea. A legenda da simulação indica um valor máximo de tensão de Von Mises de aproximadamente 22.10 MPa. Esse pico de estresse, representado pelos tons de verde a amarelo, concentra-se em duas áreas discretas. A primeira localiza-se ao longo do corpo mandibular como resultado do estresse de torção. A segunda ocorre no côndilo mandibular do lado oposto (lado de balanceio), que atua como um ponto de pivô para estabilizar a mandíbula **(Hylander, 2006).**

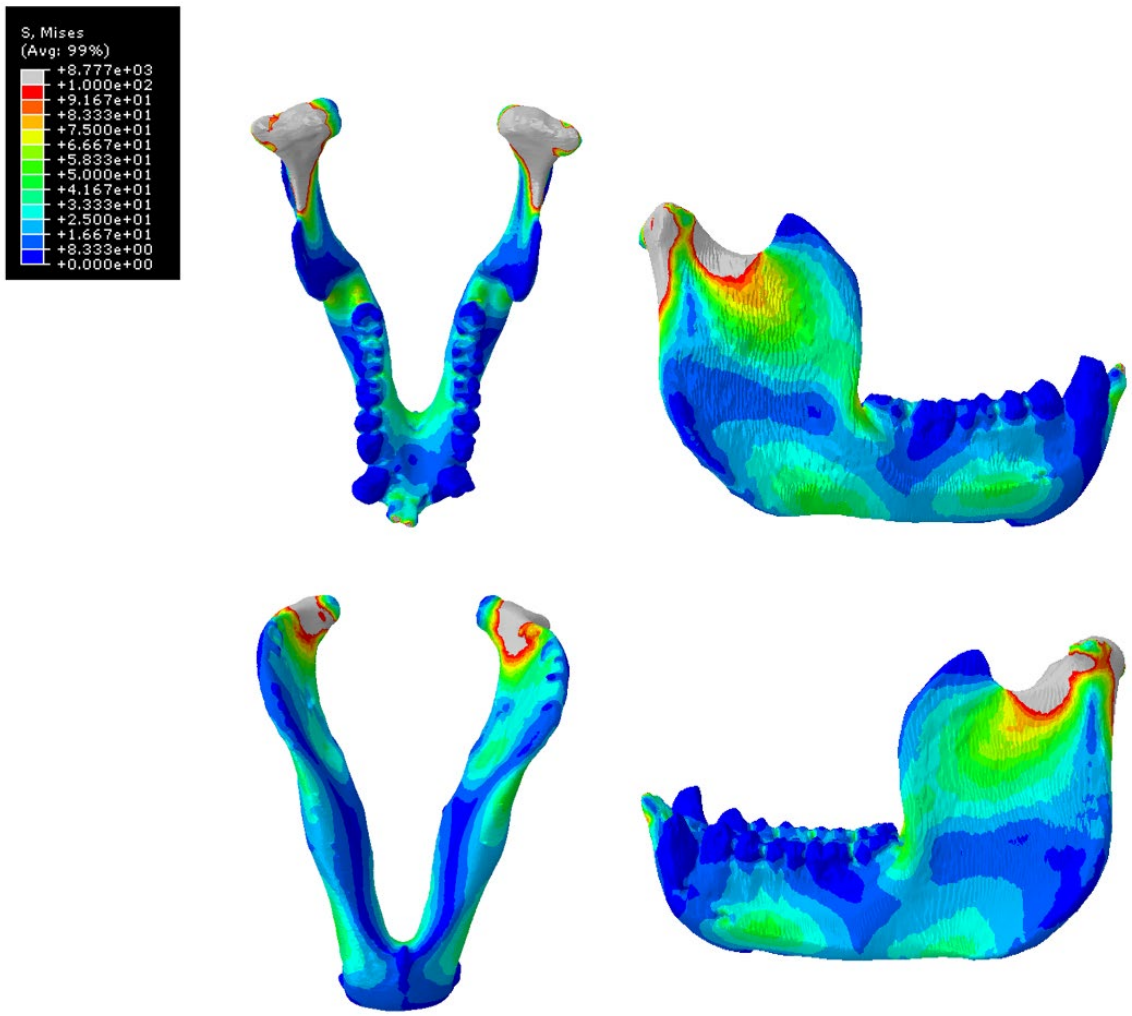
Portanto, não há qualquer risco de sobrecarga ou fratura mandibular. A fratura não ocorre na prática porque a mandíbula do gorila é massivamente construída e capaz de distribuir essa sobrecarga eficientemente, com a maior parte da estrutura permanecendo em níveis de tensão muito baixos.

A análise sugere que as forças aplicadas, estando bem abaixo do limite de fadiga, não são o principal fator que moldou a evolução desta mandíbula. Em vez disso, a sua morfologia massiva é uma adaptação para a dieta predominantemente folívora do *Gorilla gorilla*, que exige resistência para a mastigação prolongada e repetitiva de grandes volumes de material vegetal fibroso, utilizando principalmente os dentes posteriores **(Fleagle, 2013; Hylander, 2006)**.

A conclusão da análise dos elementos finitos (FEA) desse cenário, indica claramente que a mandíbula do *Gorilla gorila* é altamente robusta para essa tarefa. A baixa magnitude dos estresses gerados demonstra que a morfologia mandibular é definida pelas forças muito mais elevadas da mastigação molar, isso reflete o porque as maiores tensões são distribuídas para as zonas das raízes dos molares e na porção ao lado da (ATM), **(Kay, Williams, 1994).**

Esse cenário é um reflexo adaptativo que a sua morfologia é uma adaptação da dieta predominantemente folívora, que exige uma mastigação prolongada e repetitiva de grandes volumes de material vegetal fibroso, por isso mesmo que a força inicial seja aplicada nos dentes incisivos o Gorila, acaba por não possuir essa região tão desenvolvida, pelo baixo uso do mesmo., utilizando assim principalmente os dentes posteriores **(Fleagle, 2013; Hylander, 2006)**.

Figura 6 – Análise de Elementos Finitos (FEA) de uma mandíbula de Gorilla gorila, simulando a aplicação de força no **incisivo vertical.** Magnitudes de força muscular aplicadas ao modelo mandibular, em Newtons.



A escala de cores representa a distribuição de tensão (estresse) de von Mises, onde tons mais quentes (vermelho) indicam maior concentração de tensão

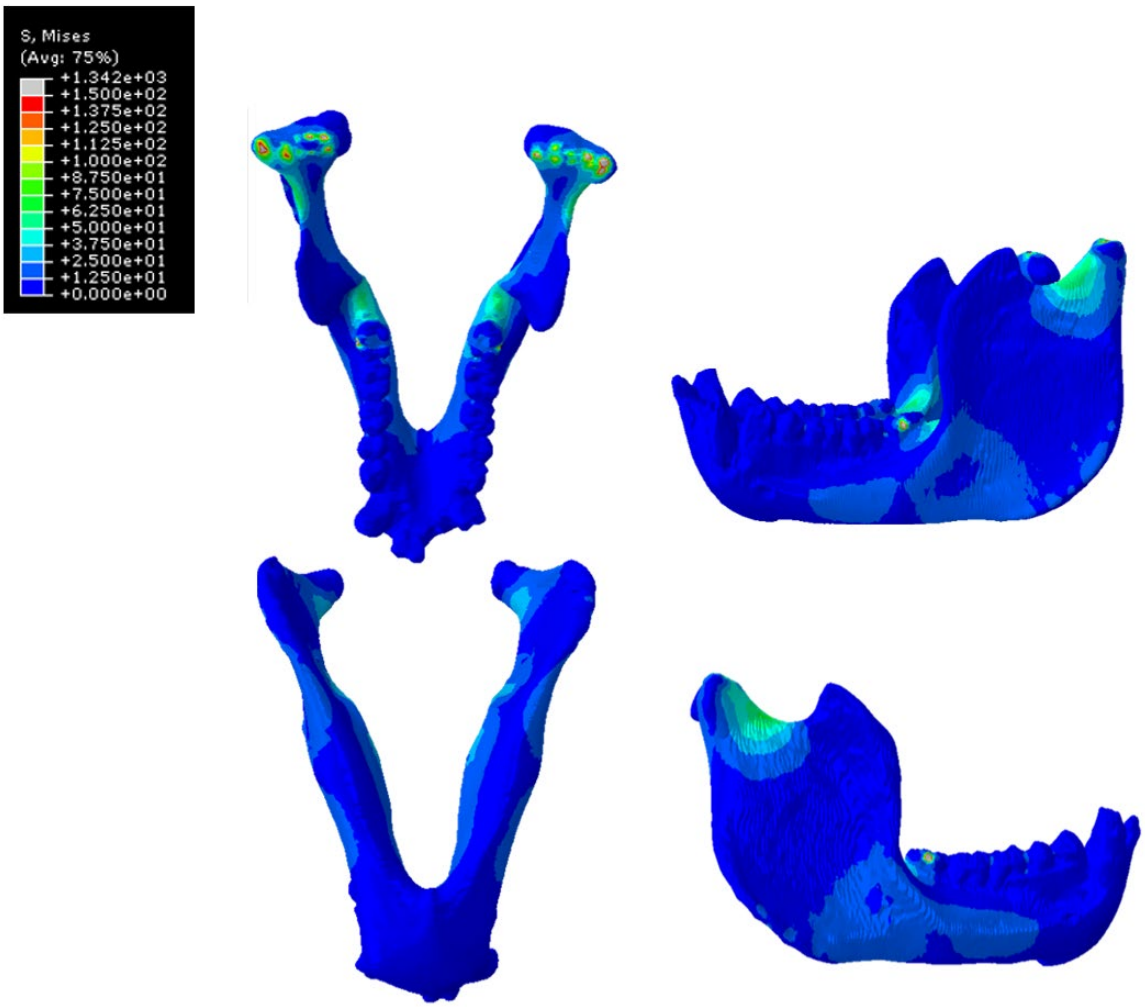
O cenário analisado simula a aplicação de uma força vertical sobre os dentes incisivos do espécime. Conforme a escala de cores da legenda, a cor vermelha indica as maiores deformações. Isso aponta para uma concentração elevada de Von Mises, especialmente na porção superior da mandíbula na região dos côndilos de ambas as articulações temporomandibular (MPa).

Biomecanicamente, isso ocorre porque a força aplicada na frente das mandíbulas é transmitida diretamente para cima, e as ATMs atuam como o principal ponto de absorção dessa força compressiva contra o crânio **(Hylander, 2006)**. Uma tensão secundária, de menor intensidade, é vista ao longo da base da mandíbula e na sínfise.

Portanto, a mordida não causa uma falha óssea por estar acima do limiar de fadiga do osso cortical (cerca de 80 MPa), a morfologia morfofuncional é extremamente robusta. Assim temos que a mordida dos dentes incisivos não é uma atividade otimizada do cotidiano do gorila, sendo as articulações o fator limitante nesse cenário, por isso a zona temporomandibular (ATM) está sobrecarregada com altas tensões de estresse de Von Mises.

A mordida vertical dos incisivos gera uma sobrecarga alta nas ATMs, indicando que este não é o comportamento alimentar primário ou mais eficiente. A estrutura é segura contra fraturas, mas não é projetada para o uso frequente de altas forças incisivas, reforçando seu papel como um herbívoro especializado em moagem **(Fleagle, 2013).**

Figura 7 – Análise de Elementos Finitos (FEA) de uma mandíbula de *Gorilla gorila*, simulando a aplicação de força no **molar lateral.** Magnitudes de força muscular aplicadas ao modelo mandibular, em Newtons.



A escala de cores representa a distribuição de tensão (estresse) de von Mises, onde tons mais quentes (vermelho) indicam maior concentração de tensão.

O cenário analisado simula a aplicação de uma força lateral sobre os dentes molares do espécime. Conforme a escala de cores da legenda, a cor azul indicada em toda região mandibular, reflete a evolução adaptativa e robusta que o *Gorilla gorilla* possui em sua biomecânica morfofuncional. As maiores concentrações de Von Mises, são representadas ao entorno dos dentes molares, devido ao estresse causado por um movimento de lateralização mandibular, ocasionado pela aplicação de vetores horizontais de forças de 1250 N.

Assim temos claro como a biomecânica morfofuncional dos gorilas atua durante a sua alimentação, pois implica um movimento de moagem importante da sua rotina. Com isso conseguimos analisar que o resultado visual é o cenário mais conclusivo da realidade mastigatória desses animais, provando pela análise de elementos finitos (FEA), que a estrutura mandibular é bem densa e robusta. O resultado visual nos demonstra que a mandíbula permanece quase por completo em tons de azul-escuro, indicando um nível de estresse de Von Mises muito pouco significativo, ou seja, excepcionalmente baixo, resultando em tensões significativamente próximas de zero.

A legenda indica um valor máximo de tensão de Von Mises de 9.46 MPa, representando uma sobrecarga extremamente baixa. Uma tensão de 9.46 MPa está quase dez vezes abaixo do limiar de fadiga do osso cortical (cerca de 80 MPa), (**Carter, Hayes, 1977).**

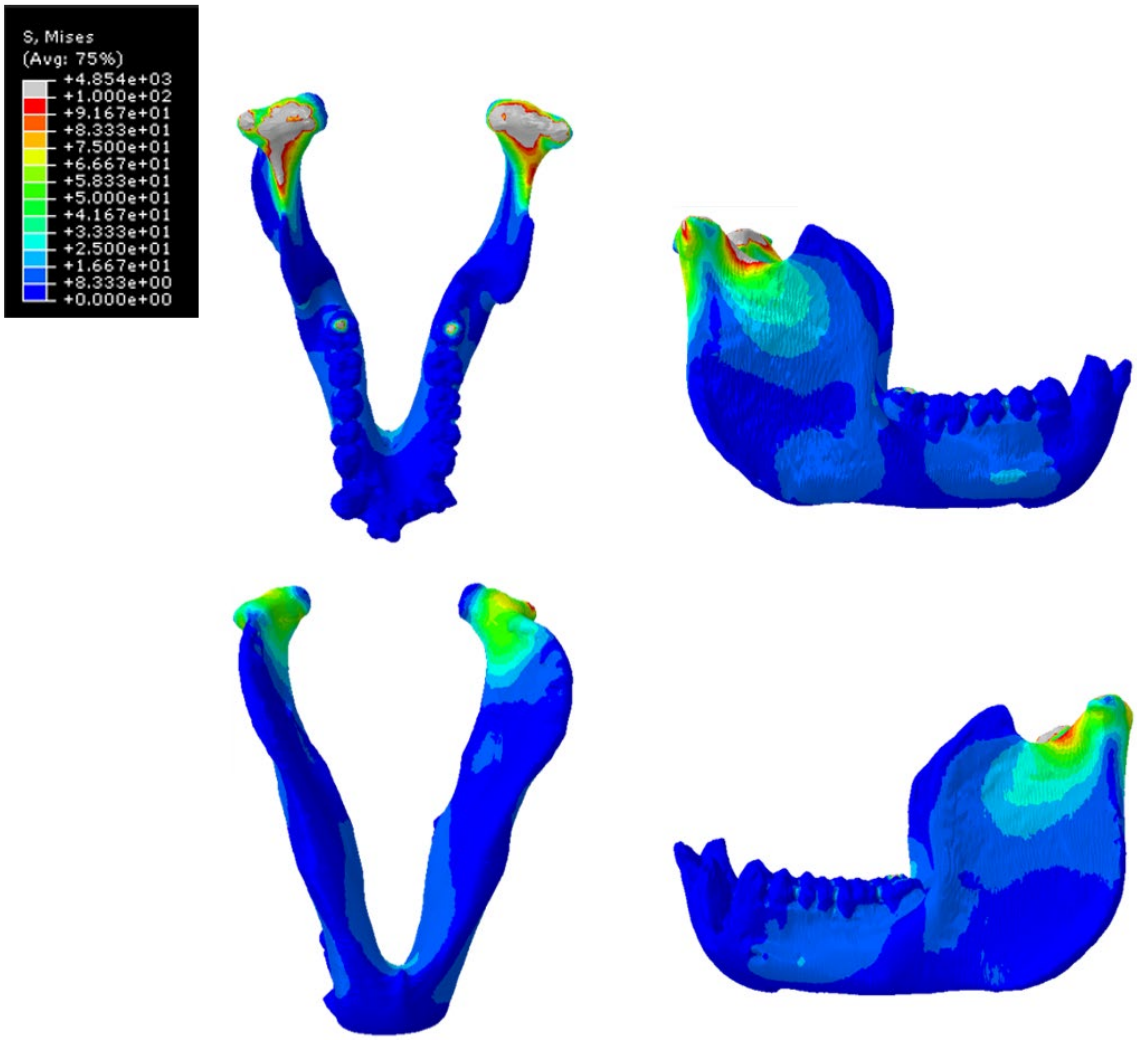
Diferentemente dos outros cenários, aqui não há concentrações de tensão significativas. As poucas e discretas áreas de estresse (em azul-claro) estão estritamente confinadas ao osso alveolar que suporta o molar sob carga e, de forma quase imperceptível, no côndilo do lado de balanceio. A análise quantitativa confirma que a tensão máxima gerada na estrutura óssea é mínima, permanecendo muito distante de qualquer limiar de risco ou de fratura catastrófica.

Como interpretação biomecânica temos um resultado, de que a mandíbula do *Gorilla gorilla* é uma estrutura muito elaborada para exercer o tipo de função da dieta, no caso o gorila possui uma estrutura mandibular altamente bem evoluída e adaptada para a mastigação lateral. Funcionando assim como uma estrutura de moagem super-rígida para resistir às forças de torção e flexão com uma mínima deformação e estresse.

Esta é a estrutura biomecânica de um herbívoro especialista **(Fleagle, 2013).** A dieta do gorila, baseada em grandes volumes de vegetação fibrosa e dura, exige horas de mastigação contínua e potente **(Hylander, 2006**). Uma mandíbula que consegue realizar esta tarefa com

estresse interno quase nulo está perfeitamente adaptada para resistir à fadiga, permitindo que o animal processe sua dieta de forma segura e eficaz ao longo de toda a sua vida. Este cenário demonstra de forma conclusiva que a morfologia massiva da mandíbula do gorila é uma adaptação direta para a moagem molar, sua principal e mais exigente função alimentar.

Figura 8 – Análise de Elementos Finitos (FEA) de uma mandíbula de *Gorilla gorila*, simulando a aplicação de força no **molar vertical.** Magnitudes de força muscular aplicadas ao modelo mandibular, em Newtons.



A escala de cores representa a distribuição de tensão (estresse) de von Mises, onde tons mais quentes (vermelho) indicam maior concentração de tensão.

O cenário analisado simula a aplicação de uma força vertical sobre os dentes molares do espécime. Conforme a escala de cores da legenda, a cor vermelha indica as maiores deformações. Isso aponta para uma concentração elevada de Von Mises, especialmente na porção superior da mandíbula na região de intersecção entre as articulações temporomandibular (MPa).

A simulação dos elementos finitos (FEA), da aplicação de uma força vetorial vertical nos dentes molares, demonstra que o gorila está desempenhando uma função de esmagamento para conseguir processar o seu alimento, especialmente vegetais com propriedades densas e resistentes, assim confirmando que a especialização do gorila nos dentes molares para sua mastigação é altamente eficiente e eficaz, apresentando um grau de impacto de estresse de Von Mises extremamente baixo.

Como analisado as tensões de Von Mises revelam um padrão de estresse bem localizado, enquanto o corpo mandibular permanece totalmente livre de estresse (tons azuis), havendo uma concentração intensa de tensão apenas nas articulações temporomandibular (ATM).

A legenda indica um valor máximo de tensão de Von Mises de 8.60 MPa, representando uma sobrecarga extremamente baixa. Uma tensão de 8.60 MPa está quase dez vezes abaixo do limiar de fadiga do osso cortical (cerca de 80 MPa), (**Carter, Hayes, 1977).**

O corpo mandibular, espesso e alto, atua como uma viga rígida que transmite a força dos músculos mastigatórios diretamente para o dente molar com deformação mínima. A força reativa dessa poderosa mordida é, então, absorvida quase inteiramente pelas ATMs, que funcionam como o fulcro do sistema e sofrem intensa compressão **(Hylander, 2006)**.

A análise da média da tensão de Von Mises (8.60MPa) é crucial. Essa tensão indica que, embora uma única mordida de esmagamento seja segura, ela representa uma das atividades de maior estresse mecânico para a mandíbula, sendo as articulações as estruturas mais exigidas.

Como conclusão temos que a mandíbula do *Gorilla gorilla* é muito bem adaptada para gerar e sustentar as forças vetoriais de 1250 **N**, simulando a sua mordida vertical extremamente eficiente, capaz de resistir a altas cargas de pressão., por conta das robustas articulações temporomandibulares (ATM), sendo as regiões mais exigidas. Esta é uma adaptação fundamental para a dieta do *Gorilla gorilla*, permitindo-lhe esmagar e processar a vegetação fibrosa e dura que constitui a base da sua alimentação **(Fleagle, 2013)**.

RESULTADOS OBTIDOS PARA O ESPÉCIME: *Pan troglodytes*

Este capítulo apresenta os resultados da Análise de Elementos Finitos (FEA) da mandíbula de *Pan troglodytes* sob quatro condições distintas de carregamento. A análise qualitativa foca-se na distribuição das tensões de Von Mises, permitindo a visualização dos padrões de estresse na estrutura mandibular. A escala de cores representa a intensidade de tensão, onde os tons (azul) indicam baixa tensão e os tons (verde, amarelo e vermelho) indicam concentrações de estresse cada vez maiores.

Estes parâmetros foram aplicados de forma consistente em todos os cenários de estudo, que envolvem a aplicação de forças verticais e laterais tanto nos dentes incisivos quanto nos molares. O **Quadro 7** resume quantitativamente os valores de força aplicados e a média de estresse de Von Mises (média das tensões resultantes para cada simulação).

Para a análise comparativa do estresse de Von Mises, os valores de pico foram avaliados em relação aos limiares mecânicos do osso cortical. Segundo estudos de fadiga óssea, como o de a aplicação de cargas cíclicas na faixa de 80MPa é utilizada para induzir falha por fadiga **(Taylor et al. 2020).**

Conforme documentado **Reilly e Burstein (1975)**, a resistência máxima do osso cortical à tensão está na faixa de 160 MPa. Os valores observados na simulação, embora abaixo do limite de fratura, aproximam-se do limiar de fadiga, o que sugere que esforços repetitivos poderiam gerar microdanos. A mandíbula, no entanto, distribui parte da carga, o que mitiga o risco de falha imediata **Reilly e Burstein (1975)**. O **Quadro 7 e 8** resume a distribuição qualitativa das tensões de Von Mises nos molares e incisivos de *Pan trglodytes sob* forças de 1250 N. A distribuição representa os dentes molares e incisivos (forças vetoriais laterais e verticais em sequência).

Quadro 7. Magnitudes de forças vetoriais aplicadas aos modelos de elementos finitos, em Newtons; Média de estresse de Von Mises (MPa). Modelo: *Pan troglodytes.*

Simulação	Média de estresse Von Mises (MPa)	Fonte da Imagem
Incisivo Lateral	47.58	Figura 9
Incisivo Vertical	76.39	Figura 10
Molar Lateral	27.34	Figura 11
Molar Vertical	37.71	Figura 12

Fonte: O autor (2025).

Quadro 8 – Distribuição qualitativa das tensões de Von Mises nos molares de *Pan troglodytes* sob forças de 1250 N. A distribuição representa os dentes molares (forças vetoriais verticais e laterais em sequência).

Vista da Mandíbula	Tipo de Força Aplicada	Região de Maior Tensão (Von Mises)	Observações Principais
Direita	Lateral (Molar)	Corpo mandibular lateral ao molar.	Tensão elevada e concentrada, indicando um suporte cortical eficiente para a mastigação unilateral.
Esquerda	Lateral (Molar)	Ramo mandibular e base do corpo contralateral.	Tensão moderada, sugerindo boa absorção e redistribuição das forças de torção.
Frontal	Lateral (Molar)	Processo alveolar	Indício de cisalhamento alveolar acentuado.

Posterior	Lateral (Molar)	Ângulo mandibular e processo coronoide.	Zona de impacto secundária, resultado da torção mandibular durante a mastigação.
Direita	Vertical (Molar)	Base radicular dos molares e corpo mandibular.	Transmissão de força axial eficiente, com dissipação uniforme ao longo do corpo mandibular.
Esquerda	Vertical (Molar)	Tensão muito baixa; leve no corpo mandibular posterior	Força bem contida no lado de trabalho, com mínimo estresse contralateral.
Frontal	Vertical (Molar)	Processo alveolar superior dos molares.	Zona de compressão ativa; a força é distribuída de forma ortognática (vertical).
Posterior	Vertical (Molar)	Sínfise e base mandibular posterior.	Baixa tensão residual, confirmando a estabilidade funcional da mandíbula.

Fonte: Simulações por elementos finitos utilizando modelo Abaqus/Standard 6.14-1 com força de 1250 N.

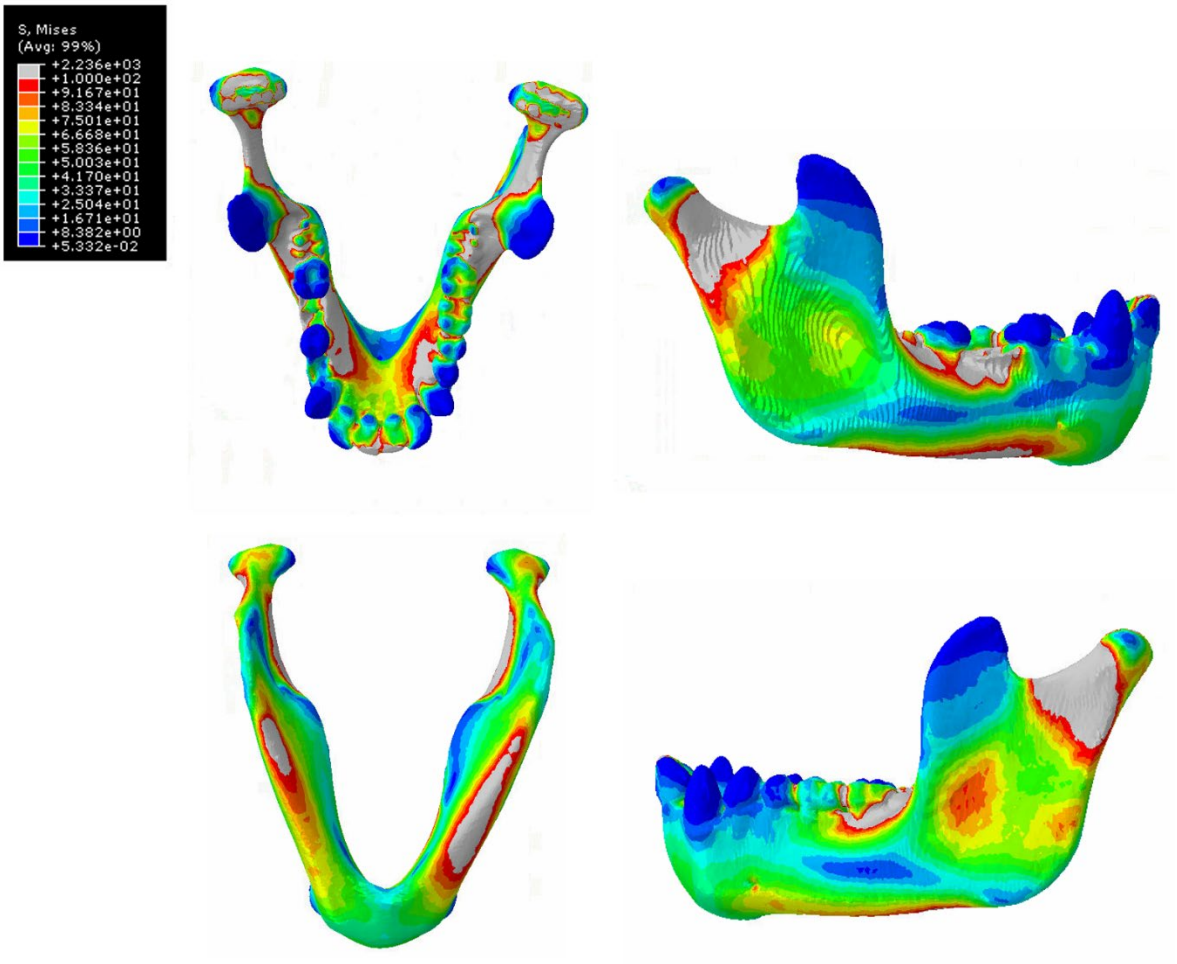
Quadro 9 – Distribuição qualitativa das tensões de Von Mises nos molares de *Pan troglodytes* sob forças de 1250 N. A distribuição representa os dentes incisivos (forças vetoriais laterais e verticais em sequência).

Vista da Mandíbula	Tipo de Força Aplicada	Região de Maior Tensão (Von Mises)	Observações Principais
Direita	Lateral (Incisivo)	Região alveolar do incisivo.	Tensão concentrada no ponto de aplicação da força, com alguma dissipação para o corpo mandibular.

Esquerda	Lateral (Incisivo)	Corpo e ramo mandibular contralaterais.	Tensão elevada no lado oposto, indicando que a mandíbula, embora mais grácil, resiste bem à torção.
Frontal	Lateral (Incisivo)	Sínfise mandibular.	A sínfise concentra bastante tensão para contrapor as forças de torção, sendo um ponto crítico.
Posterior	Lateral (Incisivo)	Tensão moderada no ramo de balanceio.	A torção gerada anteriormente se propaga para a região posterior, similar aos outros grandes primatas.
Direita	Vertical (Incisivo)	Processo alveolar abaixo dos incisivos direitos.	Força bem contida localmente, com alta compressão na região anterior direita.
Esquerda	Vertical (Incisivo)	Processo alveolar abaixo dos incisivos esquerdos.	Padrão simétrico ao lado direito; a tensão é eficientemente contida na região anterior esquerda.
Frontal	Vertical (Incisivo)	Toda a região alveolar abaixo dos incisivos.	Alta compressão localizada, refletindo uma adaptação para o uso vigoroso dos incisivos em frutas.
Posterior	Vertical (Incisivo)	Tensão muito baixa em toda a região posterior.	A força vertical é contida na parte anterior da mandíbula, sem deformar significativamente os ramos.

Fonte: Simulações por elementos finitos utilizando modelo Abaqus/Standard 6.14-1 com força de 1250 N.

Figura 9 – Análise de Elementos Finitos (FEA) de uma mandíbula de *Pan troglodytes*, simulando a aplicação de força no **incisivo lateral** Magnitudes de força muscular aplicadas ao modelo mandibular, em Newtons.



A escala de cores representa a distribuição de tensão (estresse) de von Mises, onde tons mais quentes (vermelho) indicam maior concentração de tensão.

O cenário analisado simula a aplicação de uma força vetorial lateral de 1250 N sobre os dentes incisivos do espécime. Conforme a escala de cores da legenda, a cor vermelha indica as maiores deformações. A análise permite inferir que a simulação do cenário é referente a uma ação alimentar do ato de rasgar ou puxar do *Pan troglodytes.*

Conforme a escala de cores, a tensão máxima de Von Mises se concentra no corpo da mandíbula, abaixo da região dos dentes pré-molares do lado ativo (influência direta da força vetorial aplicada), e no côndilo da articulação do lado oposto (lado de balanceio). Esta distribuição demonstra que a mandíbula do chimpanzé reage bem a força de torção, mediante ao padrão observado e esperado para a carga aplicada de 1250 N.

O valor encontrado de 47.58 MPa nos dentes incisivos (aplicação de forças vetoriais verticais) é, portanto, em uma zona segura em comparação com este limiar. Isso significa que a aplicação de forças laterais repetidas com os incisivos não apresenta absolutamente nenhum risco de dano por fadiga para a estrutura óssea do chimpanzé.

A análise, agora com os dados corretos, solidifica a conclusão de que a mandíbula do chimpanzé é uma estrutura de engenharia leve e altamente otimizada. Sua geometria é tão eficiente que consegue dissipar tanto forças de compressão (verticais) quanto de torção (laterais) nos incisivos com o mínimo de estresse interno. Este achado está em perfeita harmonia com sua dieta primariamente frugívora **(Wrangham Et Al., 1991)**, que não exige a mesma robustez para alimentos duros vista em outros primatas.

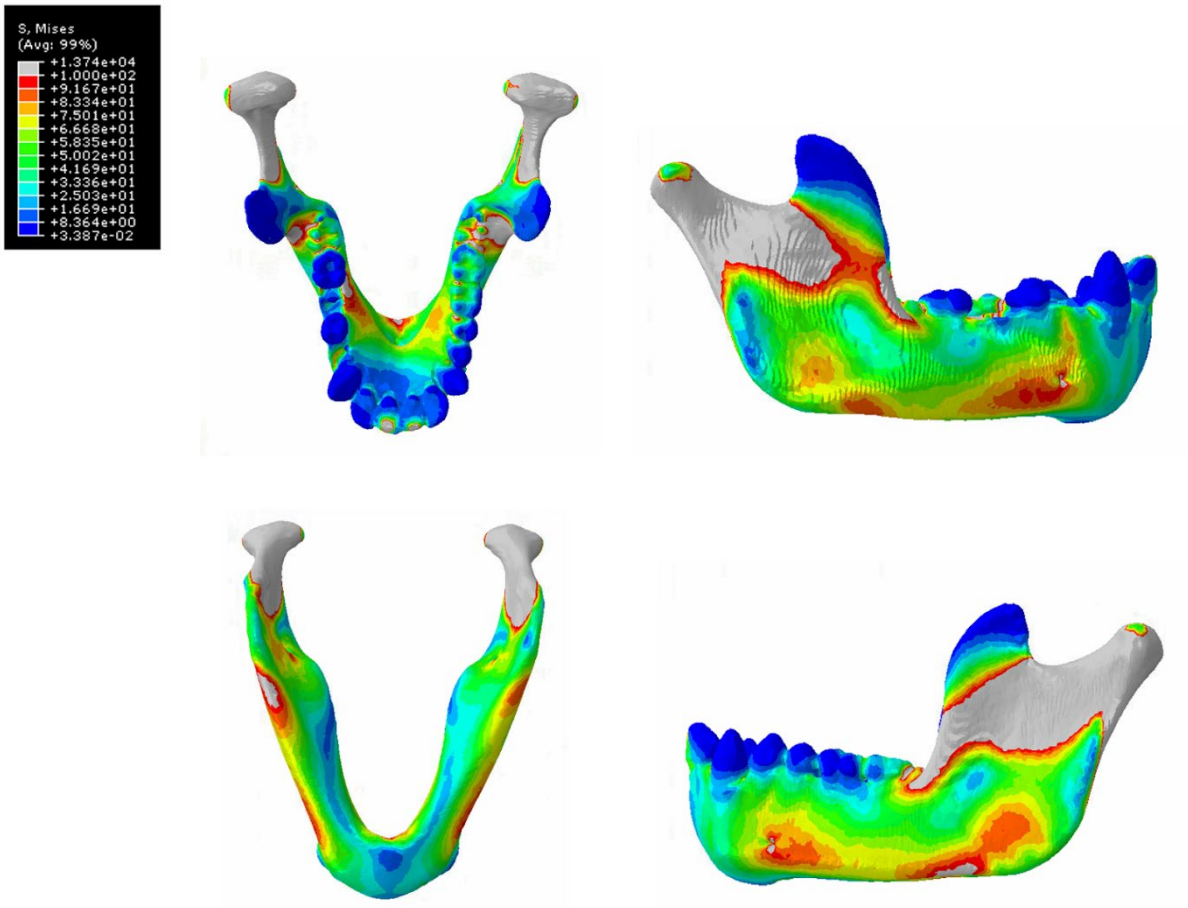
Uma análise comparativa da aplicação de forças nos dentes incisivos do chimpanzé revela um resultado notável. A aplicação de uma força vertical gera uma tensão máxima de 76,39 MPa, valor que se aproxima perigosamente do limiar de fadiga do osso cortical, estimado em aproximadamente 80 MPa. Em contrapartida, a aplicação de uma força vetorial lateral nos mesmos dentes resulta em uma tensão consideravelmente menor, de 47,58 MPa, situando-se em uma faixa biomecânica segura.

Essa discrepância pode ser atribuída às propriedades biomecânicas da mandíbula do chimpanzé, especificamente sua capacidade de sofrer torção e flexão. Tais mecanismos são cruciais para a dissipação de estresse durante comportamentos alimentares complexos, como rasgar fibras, puxar galhos ou fraturar alimentos de elevada dureza.

Dessa forma, conclui-se que o esforço de rasgo com os incisivos, assim como o de compressão, é um evento biomecânico de baixo custo e totalmente seguro para o chimpanzé. A análise de ambos os cenários de mordida incisiva revela uma mandíbula consistentemente eficiente, adaptada para realizar suas funções típicas com uma margem de segurança extraordinariamente alta. isso significa que a mandíbula do chimpanzé é o resultado de uma otimização evolutiva para a eficiência em detrimento da perda da força bruta.

A análise morfofuncional permite demonstrar que a realização das tarefas alimentares, como puxar frutas e folhas com os dentes incisivos, têm uma margem biomecânica altamente segura.

Figura 10 – Análise de Elementos Finitos (FEA) de uma mandíbula de *Pan troglodytes*, simulando a aplicação de força no **incisivo vertical.** Magnitudes de força muscular aplicadas ao modelo mandibular, em Newtons.



A escala de cores representa a distribuição de tensão (estresse) de von Mises, onde tons mais quentes (vermelho) indicam maior concentração de tensão.

O cenário analisado simula a aplicação de uma força vetorial vertical de 1250 N nos dentes incisivos do espécime. Conforme a escala de cores da legenda, a cor vermelha indica as maiores deformações. Isso aponta uma concentração de tensão, calculada pelo critério de Von Mises, que está com grande localização na região do osso alveolar que suporta as raízes dos dentes e nos côndilos da articulação temporomandibular (ATM). Interpretando esses resultados, a força aplicada é transmitida diretamente paro o ponto da mordida para a articulação, gerando um estresse localizado nessas duas regiões.

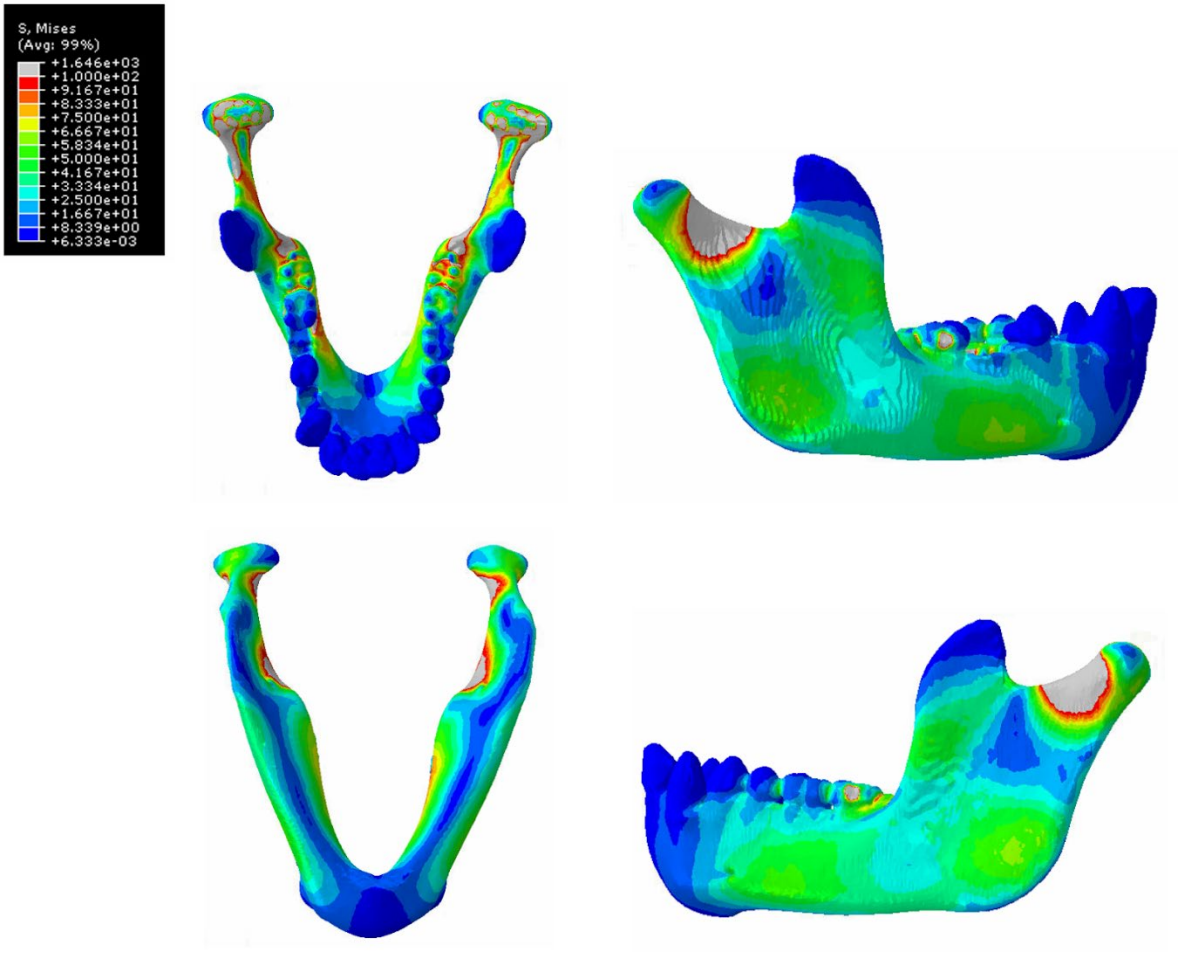
A legenda indica um valor máximo de tensão de Von Mises de 76,39 MPa, representando assim uma sobrecarga considerada baixa a moderada. O pico de tensão está bem longe do limiar que poderia causar uma fratura por impacto, indicando que a estrutura mandibular consegue absorver essa carga específica de 1250 N com grande eficiência. Com a análise desse valor de 76,39 MPa, podemos concluir que a estrutura possui um baixo risco de danificação.

O valor encontrado de 76,39 Mpa está muito abaixo desse valor crítico, o que sugere que as cargas repetitivas de 1250 N, são de magnitude insuficientes para representar uma ameaça de dano acumulativo nos dentes dos chimpanzés.

A análise sugere que a força aplicada, resultando em baixo estresse, é representativa da dieta de *Pan troglodytes*, que é primariamente frugívora e envolve o processamento de alimentos que, em geral, não exigem as mesmas forças extremas vistas em outros grandes primatas **(Wrangham et al., 1991)**.

Podemos através dessa análise concluir que a distribuição de tensão de Von Mises nesse cenário, representa um esforço de rotina na dieta do *Pan troglodytes,* representando um esforço biomecânico normal e seguro para a estrutura mandibular, sendo assim a operação mandibular resultante da carga de 1250 N é representativamente habitual para o espécime.

Figura 11 – Análise de Elementos Finitos (FEA) de uma mandíbula de *Pan troglodytes*, simulando a aplicação de força no **molar lateral.** Magnitudes de força muscular aplicadas ao modelo mandibular, em Newtons.



A escala de cores representa a distribuição de tensão (estresse) de von Mises, onde tons mais quentes (vermelho) indicam maior concentração de tensão.

O cenário analisado simula a aplicação de forças vetoriais horizontais de 1250 N sobre os dentes molares do espécime. Esse cenário reflete o movimento de moagem ou trituração alimentar do *Pan troglodytes.* Conforme a escala de cores da legenda, a cor vermelha indica as maiores deformações. A regiões com maiores tensões de Von Mises se concentra na região do côndilo da articulação do lado oposto a aplicação da força (lado de balanceio) e, com menor intensidade, no corpo mandibular abaixo dos dentes molares onde ocorre a aplicação vetorial das forças.

Como interpretação desse cenário temos claro, um padrão de mastigação unilateral, onde a mandíbula se torce levemente e se apoia na articulação oposta, como uma maneira de estabilizar o movimento de moagem alimentar. A legenda indica um valor máximo de tensão de Von Mises de 27,34 MPa, representando uma sobrecarga baixa.

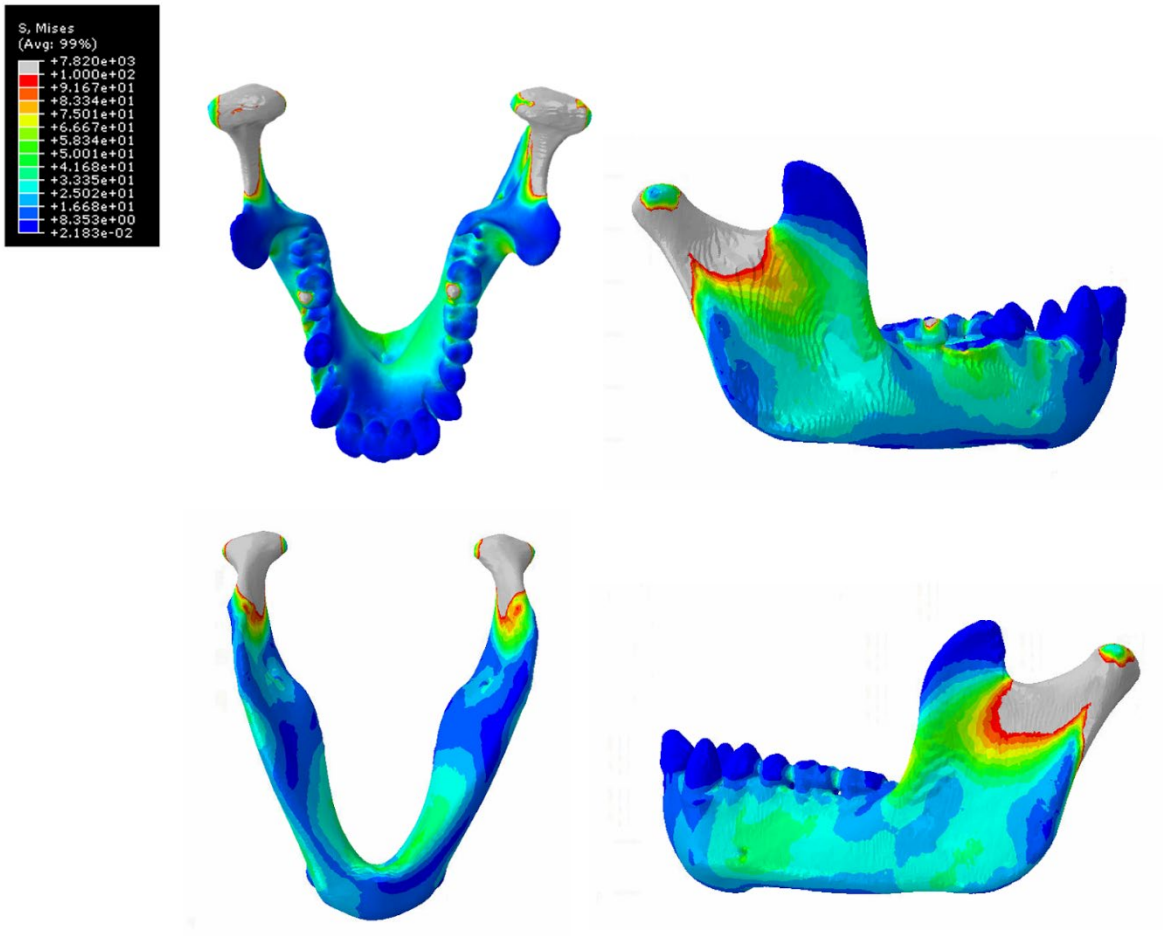
O valor encontrado de 27,34 MPa é, portanto, bem cerca de três vezes menor em comparação, confirmando que a moagem é uma atividade que o chimpanzé pode sustentar por longos períodos sem qualquer risco de dano por fadiga.

Esta análise biomecânica é um reflexo direto da dieta do chimpanzé. Sendo primariamente um frugívoro que também consome folhas e caules, sua estratégia alimentar depende de um processamento oral prolongado e eficiente, em vez de forças de esmagamento extremas **(Wrangham Et Al., 1991)**. A mecânica de distribuição de força, conforme descrito por (**Hylander, 1979)**, é perfeitamente otimizada para esta função.

Este resultado numérico é um reflexo direto da dieta e da estratégia de forrageamento do chimpanzé. Embora sejam conhecidos por seu amor por frutas maduras, uma parte substancial de sua dieta e de seu tempo é gasta processando alimentos que não são necessariamente duros, mas sim fibrosos e resistentes: folhas, caules, brotos e o mesocarpo (polpa fibrosa) de certas frutas **(Wrangham Et Al., 1991)**.

Podemos através dessa análise concluir que, o movimento de moagem com os dentes molares é a atividade com maior frequência em sua rotina alimentar, sendo segurança. Esse baixo reflexo biomecânico na aplicação de forças vetoriais laterais nos dentes molares, demonstra que a morfologia morfofuncional da mandíbula é bem adaptada para o tipo de resistência exigida pelo processamento da dieta.

Figura 12 – Análise de Elementos Finitos (FEA) de uma mandíbula de *Pan troglodytes*, simulando a aplicação de força no **molar vertical.** Magnitudes de força muscular aplicadas ao modelo mandibular, em Newtons.



A escala de cores representa a distribuição de tensão (estresse) de von Mises, onde tons mais quentes (vermelho) indicam maior concentração de tensão.

O cenário analisado simula a aplicação de forças vetoriais verticais de 1250 N sobre os dentes molares do espécime. Esse cenário reflete o movimento de esmagamento ou compressão alimentar do *Pan troglodytes,* ao quebrar um fruto de casca mais dura. Conforme a escala de cores da legenda, a cor vermelha indica as maiores deformações.

A região com maiores tensões de Von Mises se concentra na região do côndilo da articulação do mesmo lado da mordida (lado de trabalho). Tensões secundárias aparecem no corpo mandibular, logo abaixo do dente ativo. Esse cenário é essencial para entender que a mandíbula funciona como uma prensa, onde a força da mordida é contraposta pela força reativa da articulação temporomandibular (ATM), ou seja, a articulação absorve o impacto de compressão.

A legenda indica um valor máximo de tensão de Von Mises de 37.71 MPa, demonstrando assim uma sobrecarga moderada, porém quase três vezes menor que o limiar de fadiga do osso cortical . O resultado desse cenário demonstra a eficiência da morfologia morfofuncional e sua biomecânica, demonstrando assim que a mordida com maior potência de compressão é realizada com um estresse mínimo.

O valor encontrado de 37.71 MPa é quase duas vezes inferior a este limiar. Isso indica que o esmagamento de alimentos com os molares é uma atividade completamente segura, que pode ser realizada repetidamente sem qualquer risco de dano por fadiga.

Esta análise biomecânica reflete a dieta do chimpanzé que, embora focada em frutas, inclui o consumo ocasional de itens mais duros, como nozes, que requerem uma mordida de esmagamento **(Boesch, Boesch, 1981)**. O baixo nível de estresse demonstra que a mandíbula do chimpanzé é perfeitamente capaz de processar os itens mais duros de sua dieta regular com uma imensa margem de segurança.

Dessa maneira, podemos concluir que o os dentes molares com aplicação de forças vetoriais verticais de 1250 N, embora seja a mais potente força aplicada nos *Pan troglodytes* apresenta um evento biomecânico de baixo estresse e alta segurança, ou seja, podemos concluir que a mandíbula não evoluiu para uma força bruta, mas para uma eficiência para todas as suas funções mastigatórias.

DISCUSSÃO

6.1 ESTRUTURA PROPOSTA PARA DISCUSSÃO (ORANGOTANGO):

6.1.1- PRINCIPAL DESCOBERTA.

As análises de elementos finitos (FEA) da mandíbula de *Pongo pygmaeus* são importantes para entender os diferentes cenários de aplicações vetoriais verticais e horizontais, aplicadas nos dentes incisivos e molares da estrutura mandibular. Estas estruturas, por sua vez, possuem morfofunção biomecânica adaptada para os diferentes cenários das atividades alimentares. Estas atividades são refletidas biomecanicamente ao longo de toda a sua estrutura mandibular.

Quando analisamos cada cenário gráfico diferente (incisivo com forças vetoriais verticais, incisivo com forças vetoriais horizontais, molares com forças vetoriais verticais e molares com forças vetoriais horizontais), é demonstrado que a morfologia morfofuncional mandibular apresenta grande especialização biomecânica e evolutiva, pois cada região apresenta uma especialização funcional distinta.

Os dentes incisivos atuam como um poderoso mecanismo de corte e alta precisão para a aplicação de forças iniciais do seu respectivo esmagamento alimentar, enquanto os dentes molares servem como uma mecânica robusta para o processamento de grandes intensidades de forças para a moagem dos alimentos.

Essa especialização quantitativa, apresentada pelos índices de estresse de Von Mises, é ideal para mensurar a tensão que a mandíbula apresenta em seus dentes molares, desde o funcionamento de altas tensões próximas ao limite de fadiga óssea da estrutura, até os mais baixos níveis de estresse e alta eficiência biomecânica na região posterior mandibular.

Essa grande versatilidade é o resultado da grande adaptação evolutiva, norteada pelas fortes pressões da sua alimentação, que inclui materiais mecanicamente muito resistentes. Compreender a interação entre a forma anatômica e a sua função é, portanto, relevante para a estratégia de sobrevivência da espécie de *Pongo pygmaeus* em seu nicho ecológico

6.1.2- A FUNÇÃO BIOMECÂNICA DOS INCISIVOS: FERRAMENTA PODEROSA PARA ABRIR ALIMENTOS DUROS.

Quando analisamos as aplicações de forças vetoriais nos dentes incisivos, conseguimos simular que os dentes são eficazes para cortar, descascar e triturar os alimentos altamente resistentes de sua dieta.

O maior pico de tensão de Von Mises nos dentes incisivos, com aplicação de forças vetoriais verticais de 104,41 MPa, não é somente o valor mais elevado entre todos os cenários testados, mas também um dado quantitativo para entender o limiar biomecânico que estaria próximo ao limite de fadiga óssea de 80 MPa.

Este valor supera o limite de fadiga geralmente aceito para o osso compacto, que se situa em torno de 80 MPa **(Carter & Hayes, 1977)**, colocando a estrutura em uma zona onde a aplicação repetida de tal carga poderia, teoricamente, iniciar a propagação de microfraturas e levar ao dano acumulado. Embora ainda esteja consideravelmente abaixo do limite de fratura final do osso, de aproximadamente 160 MPa **(Reilly & Burstein, 1975)**, o que descarta o risco de uma falha catastrófica imediata, o resultado aponta que a mordida incisiva é uma atividade de alto custo fisiológico.

Conforme demonstrado pelo modelo, essa tensão não se limita aos dentes, mas se distribui amplamente pelo corpo mandibular e, de forma crucial, concentra-se na sínfise — a linha de fusão frontal da mandíbula. Este achado corrobora de forma expressiva os estudos clássicos de **Hylander (1985)**, que identificaram a sínfise como uma estrutura fundamentalmente adaptada para resistir às forças de cisalhamento e torção inerentes à mordida frontal.

Portanto, esse alto custo biomecânico nos fornece uma análise de que o uso dos dentes incisivos representa uma função altamente especializada para as tarefas alimentares, pois são ações pontuais, como a mordida inicial do alimento, e não o seu processamento contínuo e prolongado.

6.1.3 - A REGIÃO MOLAR: EFICIÊNCIA ROBUSTEZ.

A análise da região molar nos mostra um processamento biomecânico robusto e eficiente, conseguindo apresentar dois funcionamentos distintos: um de moagem lateral de baixo estresse e outro de esmagamento vertical de alta potência e eficiência. A região posterior da mandíbula, nos cenários de forças vetoriais aplicadas vertical e lateralmente nos molares, demonstra que na mandíbula de *Pongo pygmaeus* a zona temporomandibular (ATM) passa de uma região eficiente de alavanca para um sistema de força bruta.

A mordida lateral (vetores laterais nos molares) é um cenário que simula um movimento de trituração alimentar, além de se mostrar o mais eficiente entre todos os cenários. O pico de tensão registrado foi de 32,79 MPa, representando um valor muito abaixo do limiar de fadiga óssea (80 MPa). Essa grande eficiência é devida à distribuição de forças geradas pelo estresse de Von Mises, de modo que a mandíbula consegue propagar essa tensão para outras regiões de maneira uniforme, funcionando como um mecanismo para evitar uma possível fratura óssea. Assim, o sistema de compensação e distribuição de forças deixa clara a grande eficiência e robustez da mandíbula em suportar facilmente cargas de 1250 N nos dentes molares.

Durante a mastigação unilateral, a mandíbula se torce de maneira sutil, e as forças são balanceadas entre o lado que processa o alimento e o lado de balanceio. Os resultados deste modelo confirmam visualmente os achados clássicos de **Hylander (1979)**, que demonstrou que o côndilo do lado de trabalho sofre pouca carga reativa, enquanto o côndilo do lado de balanceio é tensionado para estabilizar toda a estrutura. Este mecanismo engenhoso distribui a tensão por todo o arco mandibular, evitando concentrações perigosas e permitindo que o orangotango realize ciclos de mastigação prolongados e repetitivos, ideais para processar grandes volumes de vegetação fibrosa sem incorrer em fadiga estrutural.

Quando analisamos os quatro cenários como um todo, percebemos que a aplicação de forças nos dentes molares revela dois modos. O primeiro é a moagem, associada às forças laterais. O segundo modo funcional, observado com a aplicação de forças verticais (estresse de Von Mises de 36,45 MPa), simula o ato de esmagamento de um objeto duro da dieta de um *Pongo pygmaeus*. O cenário do molar vertical, mesmo gerando um estresse maior que o do molar lateral, é considerado seguro, o que permite a aplicação de forças de 1250 N verticalmente aos dentes sem que haja comprometimento da mandíbula.

O modelo mostra a tensão sendo absorvida pelo corpo mandibular, que é excepcionalmente alto e espesso, uma característica anatômica diretamente ligada à dieta de alimentos duros (hard-object feeding), como postulado por **(Daegling & Hylander 1998)**.

A diferença fundamental em relação à mordida lateral é a forma como a tensão gerada pelo vetor de carga de 1250 N é propagada: em vez de ser balanceada, ela é transmitida diretamente para a articulação temporomandibular (ATM) do lado de trabalho, que sofre a maior parte da carga de compressão, representando a realidade de sua dieta. Esta capacidade de suportar altas pressões na ATM e no corpo mandibular é a chave para a estratégia de sobrevivência do orangotango, permitindo-lhe fraturar sementes, nozes e cascas que são inacessíveis a outros animais, servindo como alimentos de refúgio (fall-back foods) em tempos de escassez **(Marshall & Wrangham, 2007**).

6.1.4- ANÁLISE COMPARATIVA DOS PICOS DE TENSÕES DE VON MISES NOS DENTES INCISIVOS E MOLARES.

Quando comparamos os 4 cenários analisados e a respectiva distribuição de Von Mises temos 66,79 MPa (incisivo lateral), 104,41 MPa (incisivo vertical), 36,45 MPa (molar vertical) e 32,79 MPa (molar lateral). Isso permite entender bem como funciona a biomecânica morfofuncional da mandíbula do *Pongo pygmaeus*.

Os dados obtidos das análises dos 4 cenários de estudo revelam uma grande eficiência biomecânica da mandíbula, na região posterior principalmente na região ântero mandibular (ATM), onde as tensões de estresse são bem distribuídas por toda a sua estrutura. Isso é nítido, pois a tensão de Von Mises gerada na região incisiva dos dentes é quase três vezes maior do que a observada durante o processo de moagem lateral alimentar típico dos dentes molares.

Com isso o gradiente de cores presente nos cenários verticais e horizontais dos dentes incisivos, representa uma estrutura mandibular precisa e com grande potência biomecânica. Essa observação é resultado da região temporomandibular (ATM) trabalha em um alto desempenho e precisão.

Este valor de 36,45 MPa encontrado no cenário dos dentes molares com forças vetoriais verticais e o valor de 32,79 MPa dos dentes molares com forças laterais, está bem longe do

limite de fadiga geralmente aceito para o osso compacto, que se situa em torno de 80 MPa (Carter, Hayes, 1977), colocando a estrutura em uma zona totalmente segura e eficiente.

Em contrapartida, na extremidade posterior, onde estão localizados os dentes molares, as forças vetoriais verticais e horizontais operam em um regime seguro. Isso ocorre, pois, evolutivamente, a estrutura biomecânica da mandíbula de *Pongo pygmaeus* está bem adaptada para a aplicação de grandes forças e para a resistência à fadiga. Nesses cenários, percebemos uma ampla distribuição homogênea de cores azuladas, o que demonstra uma distribuição efetiva e segura das tensões de Von Mises. Sendo assim, a estrutura como um todo se mostra bem resistente à fadiga.

O orangotango não está restrito a um único tipo de processamento alimentar; ele pode alternar entre o corte de um alimento macio, o esmagamento de um alimento duro e a moagem prolongada de folhas fibrosas. Em última análise, este gradiente de funções representa a solução evolutiva para maximizar o processamento de alimentos diversos, ao mesmo tempo que preserva a integridade da estrutura mandibular do aparelho mastigatório a longo prazo

6.1.5- QUAL A APLICAÇÃO EVOLUTIVA E ECOLÓGICA DA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS (FEA) COM A VIDA REAL E SUA RESPECTIVA.

O grande sucesso ecológico do *Pongo pygmaeus,* acontece pelo fato que são espécimes que vivem em um ambiente de florestas tropicais da região de savanas africanas, que possuem uma grande imprevisibilidade ecológica do seu ecossistema e na disponibilidade de alimentos.

É aqui que a hipótese dos alimentos de refúgio (fall-back foods) se torna central. Conforme proposto por pesquisadores como **(Marshall, Wrangham, 2007)**, a sobrevivência de muitas espécies não é determinada pela capacidade de consumir seus alimentos preferidos, mas sim pela habilidade de explorar recursos de menor qualidade que estão disponíveis o ano todo. Os orangotangos possuem uma dieta alimentar que inclui cascas de árvores, caules fibrosos, sementes e nozes bem protegidas, tornando-se uma material bem resistente.

A sua dieta é reflexo do que encontramos nos dentes incisivos altamente adaptados para seu nicho ecológico variável, ao observar as análises dos dentes verticais em ambos os cenários de aplicação de forças vetoriais de 1250 N de modo vertical e horizontal. Um cenário que

permite entender bem sobre isso, são os dentes molares que sofreram forças vetoriais verticais, gerando um estresse de Von Mises máximo de 36,45 MPa, em que podemos ter uma visualização clara que embora sua dieta inclua esses alimentos de propriedades duras como cascas e nozes, dificilmente irá passar de um estresse superior de 36,45 MPa para um primeiro contato de trituração desse alimento.

Portanto, a grande robustez mandibular do orangotango à sua dieta variável, é excelente para a sua sobrevivência quando algum recurso alimentar da sua dieta não está disponível. Em uma última análise, os padrões de estresse observados na estrutura mandibular são um reflexo bem sucedido de uma estratégia eficiente de sobrevivência, garantindo que ele possa ter uma alimentação flexível e se reproduzir em várias adversidades ambientais.

6.1.6- HÁ LIMITAÇÕES NA MORFOLOGIA MORFOFUNCIONAL.

A análise dos elementos finitos (FEA) para visualizar a biomecânica morfofuncional mandibular, simula com eficiência a realidade biológica e a grande diversidade que os *Pongo pygmaeus* enfrentam em seu nicho ecológico. As análises devem ser compreendidas dentro do contexto das limitações ao método analisado.

Primeiramente, a análise apresentada é estática, representando um instantâneo do pico de uma mordida. A mastigação real, contudo, é um processo dinâmico e cíclico, envolvendo movimentos rítmicos complexos e padrões de ativação muscular que mudam ao longo de uma única mordida **(Ross, 2001).**

Em um segundo momento, o modelo simplifica a biologia dos tecidos moles de toda a estrutura mandibular, que servem para absorção e distribuição das tensões de maneira ainda mais eficaz. A ausência mais crítica é a do ligamento periodontal (LPD), a interface de tecido conjuntivo que ancora a raiz do dente ao osso alveolar. O LPD atua como um amortecedor hidrodinâmico, dissipando uma porção significativa da força da mordida antes que ela seja transferida para o osso **(Benazzi et al., 2014).**

Sem **o** LDP no modelo, a estrutura mandíbula é observada na análise de elementos finitos (FEA) como uma estrutura sólida e rígida. Isso significa que as tensões dos côndilos e do restante da mandíbula podem ser mais altas do que um experimento in vivo.

Ao levar em conta as propriedades do material atribuídas ao osso no modelo são uma generalização aproximada do que encontramos na realidade dos orangotangos. Isso deve-se ao fato do modelo mandibular ser considerado uma propriedade homogênea (as propriedades são uniformes em todas as direções de estresse) e isotrópico (com as mesmas propriedades para todas as direções de forças vetoriais aplicadas no modelo).

Na realidade, o osso é heterogêneo (com densidades variáveis, como entre o osso cortical e o trabecular) e fortemente anisotrópico (sua resistência e rigidez são maiores na direção em que as cargas são tipicamente aplicadas) **(Weiner & Wagner, 1998).**

O estudo tem como embasamento um único espécime e os resultados assim não demonstram com precisão a variação intraespecífica dos orangotangos, como o seu tamanho, forma mandibular, robustez que existem em diferentes indivíduos de *Pongo pygmaeus* (machos e fêmeas, sendo jovens ou adultos).

Mesmo com essas limitações ao aplicar as mesmas condições e propriedades mecânicas para o modelo nos quatro diferentes cenários de mordida diferentes, o modelo ainda sim possui uma confiabilidade para entendermos a biomecânica e sua função ao longo da mandíbula. As conclusões sobre o gradiente funcional, de uma zona anterior de alto estresse a uma posterior de baixo estresse, permanecem válidas dentro deste contexto comparativo **(Rayfield, 2007).**

Futuras pesquisas podem ser feitas, ao incorporar no modelo simulação dinâmica, propriedades dos materiais mais sofisticadas e também a inclusão dos tecidos moles, podendo assim agregar ainda mais a pesquisa realizada e entender novas descobertas, fornecendo assim uma visão morfofuncional ainda mais precisa da mandíbula dos orangotangos.

6.2 ESTRUTURA PROPOSTA PARA DISCUSSÃO (GORILA):

6.2.1-PRINCIPAL DESCOBERTA: MORFOLOGIA MORFOFUNCIONAL DE MOAGEM ALTAMENTE ESPECIALIZADA.

A principal descoberta da análise biomecânica é que a mandíbula de *Gorilla gorilla,* funciona como uma estrutura especializada não somente de força bruta, mas sim como uma biomecânica morfofuncional altamente especializada, na qual a sua anatomia sofreu uma pressão seletiva dominante, pela necessidade de processar de forma eficiente e contínua os grandes volumes de alimentos fibrosos de sua dieta. Essa análise é bastante apoiada pelos quatro cenários existentes e a grande capacidade dos dentes molares atuarem como uma forte evidência da especialização para a sua sobrevivência.

A evidência de maior interesse desta especialização é o cenário da aplicação de forças vetoriais horizontais de 1250 N, nos dentes molares, onde a estrutura mandibular mostrou um nível de estresse de Von Mises, próximo de zero. Este resultado indica uma grande perfeição mecânica, significando que a morfologia de todo o corpo mandibular funciona como uma plataforma ultra-rígida, otimizada para resistir à torção e à fadiga durante ciclos de mastigação de longa duração, uma adaptação crucial para um folívoro **(Hylander, 2006)**. A força mecânica exercida sobre o alimento possui uma grande eficiência de trabalho, sem evidência de deformação óssea.

O cenário de esmagamento alimentar, simulado pela aplicação de forças vetoriais verticais de 1250 N nos dentes molares demonstrou que a especialização envolve uma grande capacidade de absorver cargas de pressões de estresse. A mandíbula foi capaz de gerar forças de esmagamento alimentar, de modo muito controlado, absorvendo a tensão de 8,60 MPa de forma segura para as articulações temporomandibular (ATM), que são muito robustas.

Portanto, a morfologia do gorila é um resultado de uma máxima eficiência e resistência para a mastigação dos dentes molares por conta da segurança funcional de trabalho dos dentes. mandíbula não evoluiu para ser forte em todas as direções, mas sim para ser infalível na sua tarefa mais vital e repetitiva, tornando-se um exemplo paradigmático de como a forma segue a função em resposta a um nicho dietético específico **(Fleagle, 2013**).

6.2.2- A FUNÇÃO DA BIOMECÂNICA DOS INCISIVOS: COMO FERRAMENTA SECUNDÁRIA.

A análise dos cenários dos dentes incisivos revela uma importância sobre a evolução da mandíbula do *Gorilla gorilla,* pois a sua anatomia e funcionamento morfofuncional não necessita de uma mordida frontal potente. Ao contrário, os cenários de simulações dos dentes incisivos demonstram um mecanismo de ferramenta secundária, como uma região funcional restrita para algumas situações ambientais, tendo em vista que toda a estrutura mandibular é adaptada evolutivamente para trabalhar com os dentes molares, o que reflete também na sua dieta alimentar.

A maior evidência desta limitação é a simulação de mordida vertical nos dentes incisivos. Nesse cenário temos o maior índice de Von Mises (23,81 MPa). Essa tensão não se distribui nas demais regiões da mandíbula, mas sim concentrou nas articulações temporomandibulares (ATM).

A simulação da mordida lateral nos incisivos (como o hábito de puxar vegetais) resultou em uma tensão baixa a moderada de (9.46 MPa). O baixo estresse não é consequência de uma adaptação específica para esta função, ela demonstra como a mandíbula é muito robusta em geral, devido ao fato de ser otimizada para cargas altas da mastigação dos dentes molares.

A função dos incisivos no gorila é uma adaptação funcional para a manipulação e o processamento inicial do alimento que não exigem grandes esforços e estresse. Eles são usados para arrancar folhas para a mastigação ser feitas na região posterior, ou seja, nos poderosos dentes molares. A análise de elementos finitos (FEA) nos permite concluir que a pressão seletiva para uma mordida incisiva forte foi pouco influenciada na linhagem do gorila, pois a adaptação evolutiva seguiu o caminho de um mecanismo de moagem nos dentes molares extremamente fortes e eficientes.

6.2.3-A REGIÃO MOLAR: ALTA EFICIÊNCIA E PODER DE ESMAGAMENTO.

Na região molar que a mandíbula do *Gorilla gorilla* nos revela a sua grande adaptação evolutiva e sua robusta eficiência morfofuncional. Esta área retrata a efetividade evolutiva para a realização de duas tarefas, porém distintas: a moagem de alta resistência e o esmagamento altamente potente.

Para um animal como o gorila, que passa uma porção substancial do dia em mastigação repetitiva de vegetação fibrosa, minimizar o estresse interno é crucial para prevenir o acúmulo de microdanos no osso **(Hylander, 2006).** A morfologia da estrutura mandibular funciona eficientemente, permitindo que o estresse seja disperso de maneira uniforme e com isso a energia exercida das pressões de mordida seja transferida para o alimento com perda mínima de energia, ao invés de ser desperdiçada na própria mandíbula.

A robustez e o poder de esmagar os alimentos foram encontrados pela análise do cenário da aplicação de forças vetoriais verticais de 1250 N nos dentes molares, com isso a mandíbula conseguiu gerar grandes forças de compressão. A análise revelou um pico de tensão de (8.60 MPa), um valor muito distante do limiar de fadiga do osso (80 MPa).

Esse estresse não se refletiu para o corpo da mandíbula, mas foi absorvido e contido de forma segura nas articulações temporomandibulares (ATM) extremamente robustas, que são adaptadas para absorver o estresse gerado pelas cargas vetoriais de 1250 N, com isso a dentição está bem protegida e ao mesmo tempo consegue gerar as forças necessárias para o esmagamento de vegetais mais duros.

Ela combina a resistência passiva de uma estrutura superdimensionada para a moagem incansável com a capacidade ativa de um sistema de alavanca potente para o esmagamento, garantindo que o animal possa extrair sustento da sua dieta especializada de forma segura e eficiente (**Fleagle, 2013**).

6.2.4 - APLICAÇÃO EVOLUTIVA E ECOLÓGICA DA ANÁLISE DOS CENÁRIOS.

A análise dos elementos finitos (FEA) aplicada à mandíbula do *Gorilla gorilla* não é apenas uma análise das tensões de Von Mises, mas testando também de forma quantitativa, hipóteses sobre como a seleção natural foi importante para o desenvolvimento mandibular, para as limitações específicas da sua dieta alimentar presentes no seu nicho ecológico.

A ecologia alimentar do *Gorilla gorilla* é dominada pelo consumo de grandes quantidades de vegetação fibrosa e de baixo valor nutritivo, como folhas, caules e rebentos **(Fleagle, 2013).** O nicho ecológico impõe uma exigência para os gorilas, isso implica a necessidade de mastigar por longos períodos para quebrar as paredes celulares das plantas e iniciar a digestão, demonstrando assim que os cenários testados (FEA) se complementam com a hipótese ao observar a realidade ecológica do gorila.

Essa analogia não só permite descobrir, mas como também provar que a moagem lateral gera um estresse próximo a zero é o reflexo da grande capacidade morfofuncional e robusta que a mandíbula está otimizada para a tarefa repetitiva e prolongada da mastigação desses vegetais. Assim conseguir entender o porquê não ocorre riscos por fadiga.

A evolução sempre prioriza que a estrutura mandibular se adapte à sobrevivência do *Gorilla gorilla* e consequentemente a sua reprodução. Essa análise é importante para entender como a pressão seletiva priorizou uma mandíbula robusta com dentes molares extremamentes fortes, favorecendo assim o desenvolvimento da região molar e não dos dentes incisivos, como podemos encontrar no caso dos orangotangos que possuem uma mandíbula frontal com dentes incisivos bem desenvolvidos, capacitados para resistência e eficiência primária dos dentes incisivos.

A baixa tensão de Von Mises durante a moagem dos dentes molares é, portanto, uma característica primordial dos gorilas que se diferenciam dos orangotangos. Mesmo a alta tensão de Von Mises aplicada nos dentes incisivos dos gorilas, as forças vetoriais aplicadas de 1250 N não são suficientes para que a pressão seletiva possa priorizar e otimizar esta função.

A análise dos quatro cenários testados nos permite interpretar que a forma (estrutura mandibular robusta) com a sua função (desempenho sob a carga simulada de 1250 N em todos os cenários), e assim interpretar que a análise dos elementos finitos (FEA) permite confirmar

que a estrutura morfofuncional do *Gorilla gorilla* é um reflexo da sua dieta herbívora especializada.

6.2.5- AS LIMITAÇÕES DA ESPECIALIZAÇÃO MORFOFUNCIONAL.

O princípio fundamental da biologia evolutiva é que não existe uma solução perfeita, — toda especialização vem com um custo inerente, um *trade-off* que limita o desempenho em outras funções **(Fleagle, 2013)**.

A principal limitação, conforme revelado quantitativamente pela Análise de Elementos Finitos **(Ross, 2005)**, reside na função incisiva. Isto significa que a estrutura que suporta com grande segurança a força de esmagamento de **1250 N** aplicada nos dentes molares.

No entanto, esta mesma arquitetura é inerentemente ineficiente para gerir as cargas de uma mordida incisiva, um conceito que está em linha com os estudos sobre a relação entre forma e dieta **(Kay, Williams, 1994**).

Ecologicamente, esta limitação restringe o nicho dietético do gorila **(Fleagle, 2013).** Se por acaso o ambiente sofresse uma mudança drástica, forçando os gorilas a depender de alimentos que necessitam ser abertos ou ter um processamento nos dentes incisivos, a sua morfologia morfofuncional se tornaria uma desvantagem para a espécie e isso resultaria em uma redução significativa da população ou até mesmo a extinção da espécie.

6.3 ESTRUTURA PROPOSTA PARA DISCUSSÃO (CHIMPANZÉ):

6.3.1- PRINCIPAL DESCOBERTA.

As análises dos elementos finitos (FEA) da mandíbula de *Pan troglodytes* são essenciais para entendermos como a morfologia morfofuncional da mandíbula responde nos diferentes cenários. A aplicação de forças vetoriais verticais e horizontais de **1250 N** nos dentes incisivos e nos molares revela que a estrutura possui uma biomecânica morfofuncional bem adaptada, não para a força bruta, mas para a eficiência na mastigação e moagem alimentar.

Os resultados revelam que a estrutura mandibular é um sistema otimizado para a distribuição de tensões de Von Mises com um estresse relativamente baixo. Ao analisar cada cenário, observamos uma grande especialização funcional, que é referente a uma estratégia evolutiva adaptada para a economia no esforço e na segurança da estrutura mandibular.

Os dentes incisivos atuam de maneira muito eficiente para a manipulação e corte inicial dos alimentos, enquanto os dentes molares servem para processar com uma alta resistência e baixo custo de energia para a moagem. Essa especialização é refletida nos índices de Von Mises, que, em todos os cenários, se mostraram baixos, operando muito abaixo do limite de fadiga óssea ou no limiar de fratura.

Esta alta eficiência é o resultado da adaptação evolutiva a uma dieta primariamente frugívora. O entendimento entre a forma gracile da mandíbula e sua função de baixo estresse é, portanto, importante para entender a estratégia de sobrevivência bem adaptada da espécie *Pan troglodytes* em seu nicho ecológico.

6.3.2- A FUNÇÃO BIOMECÂNICA DOS INCISIVOS: UMA FERRAMENTA EFICIENTE E DE BAIXO CUSTO.

Quando analisamos as aplicações de forças nos dentes incisivos, simulamos ações como cortar ou puxar frutas e folhas. O maior pico de tensão de Von Mises observado, de 76,39 MPa (no cenário de força vertical), é o principal dado quantitativo para entender o funcionamento da morfologia morfofuncional da mandíbula.

Este valor de 76,39 MPa, o mais alto registrado para o chimpanzé, aproxima-se significativamente do limite de fadiga do osso compacto. Isso significa que, durante o uso vigoroso dos incisivos, a mandíbula do chimpanzé opera perto de um estado de risco biomecânico. A atividade, portanto, representa um custo fisiológico considerável, e o risco de dano acumulado por microfraturas torna-se uma possibilidade real sob cargas repetitivas.

Conforme demonstrado pelo modelo, a tensão se localiza principalmente na base dos dentes e nos côndilos, indicando uma transmissão de força limpa e eficiente. A sínfise mandibular, embora crucial para a estabilidade **(Hylander, 1985)**, não é submetida a um estresse perigoso. Portanto, a análise nos leva a concluir que o uso dos incisivos representa uma

função normal, rotineira e de baixo risco, perfeitamente adequada para o processamento contínuo dos alimentos de sua dieta.

6.3.3- A REGIÃO MOLAR: EFICIÊNCIA MÁXIMA

A análise da região molar revela a eficiência biomecânica do *Pan troglodytes,* com duas funções de baixíssimo estresse: a moagem lateral e o esmagamento vertical. A região posterior da mandíbula demonstra ser bem otimizada para o processamento alimentar prolongado, com um custo estrutural e energético mínimo.

A mordida lateral (vetores laterais nos molares), que simula a trituração, registrou o pico de tensão mais baixo de todos: apenas 27,34 MPa. Este valor é biomecanicamente insignificante, confirmando que esta é a atividade mais segura e sustentável para a mandíbula. A razão para essa eficiência extrema está na distribuição de forças, onde a mandíbula se equilibra utilizando a articulação do lado oposto como pivô, dissipando a tensão por todo o arco mandibular, conforme os achados clássicos de **(Hylander 1979)**.

O cenário de esmagamento vertical com os molares, embora seja a mordida mais potente do chimpanzé, ainda assim resultou em um pico de tensão muito baixo, de apenas 37,71MPa. O modelo mostra a tensão sendo absorvida de forma segura pelo corpo mandibular e pelo côndilo do mesmo lado da mordida. Essa capacidade de esmagar itens moderadamente duros com baixíssimo estresse interno é fundamental para a dieta do chimpanzé, que, embora primariamente frugívora, inclui o consumo de itens que requerem maior força, como certas nozes e sementes **(Wrangham et al., 1991)**.

6.3.4- ANÁLISE COMPARATIVA DOS PICOS DE TENSÕES DE VON MISES

A comparação dos quatro cenários analisados para o *Pan troglodytes* — 76,39 MPa (incisivo vertical), 47,58 MPa (incisivo lateral), 37,71 MPa (molar vertical) e 27,34 MPa (molar lateral) — revela a principal característica de sua mandíbula: um gradiente funcional de alto a baixo estresse, demonstrando grande especialização para seu nicho ecológico.

Diferentemente de uma estrutura que opera sempre com ampla margem de segurança, a mandíbula do chimpanzé funciona em um gradiente de risco biomecânico: de um estresse muito elevado nos incisivos a um estresse consideravelmente mais baixo e seguro nos molares. A tensão máxima registrada (76,39 MPa) se aproxima do limite de fadiga óssea (cerca de 80-90 MPa). Isso demonstra que o uso vigoroso dos incisivos é uma atividade de alto custo fisiológico e que a estrutura evoluiu para suportar cargas extremas em tarefas específicas, em vez de operar apenas com baixo esforço.

A estrutura grácil da mandíbula não é, portanto, um sinal de fragilidade, mas sim de uma adaptação evolutiva que especializa diferentes regiões para diferentes níveis de força. Essa especialização permite ao chimpanzé aplicar a força bruta necessária para processar alimentos duros com os dentes da frente, enquanto utiliza a região posterior para uma moagem mais eficiente e de menor desgaste. É uma estratégia evolutiva que otimiza tanto a aplicação de força quanto a resistência estrutural a longo prazo.

6.3.5 - APLICAÇÃO EVOLUTIVA E ECOLÓGICA

O sucesso ecológico do *Pan troglodytes* está diretamente ligado à eficiência de seu aparelho mastigatório. Como os chimpanzés habitam florestas e savanas africanas, eles enfrentam períodos de variação na disponibilidade de seus alimentos preferenciais (frutas maduras).

É neste contexto que se aplica a hipótese dos alimentos de refúgio (fall-back foods), conforme proposto por pesquisadores como **Marshall e Wrangham (2007)**. Para os chimpanzés, esses alimentos não são necessariamente itens extremamente duros, mas sim recursos fibrosos e de menor qualidade nutricional, como caules, folhas e polpas, que exigem um tempo de processamento oral muito maior. A eficiência biomecânica e o baixo estresse da mandíbula são, portanto, uma adaptação-chave para a resistência. Isso permite que eles passem horas mastigando esses itens para extrair a energia necessária, uma tarefa que seria insustentável para uma estrutura submetida a alto estresse.

Portanto, a análise de elementos finitos (FEA) revela que a mandíbula do chimpanzé é uma adaptação bem-sucedida, não por ser capaz de quebrar alimentos duros, mas por processar sua dieta de forma eficiente e com baixo gasto de energia biomecânica. Essa característica

facilita sua sobrevivência em ambientes com grande variação de recursos, como as florestas e savanas africanas.

6.3.6 - LIMITAÇÕES DO MODELO MORFOFUNCIONAL

Mesmo sendo uma simulação eficiente, a análise de elementos finitos (FEA) é uma representação aproximada da realidade do nicho ecológico do *Pan troglodytes.*

Primeiramente, a análise apresentada é estática, representando o pico de uma mordida, enquanto a mastigação real é um processo dinâmico e cíclico (ROSS, 2001). Em segundo lugar, o modelo simplifica a biologia ao não incluir tecidos moles como o ligamento periodontal (LPD), que atua como um amortecedor crucial entre o dente e o osso **(Benazzi *et al*., 2014)** — e o disco articular da ATM.

Adicionalmente, as propriedades do osso no modelo foram consideradas homogêneas e isotrópicas, enquanto o osso real é heterogêneo e anisotrópico **(Weiner; Wagner, 1998).** Por fim, o estudo se baseia em um único espécime, não capturando a variação intraespecífica que existe na população de *Pan troglodytes.*

Apesar dessas limitações, o valor do estudo reside em sua força comparativa. Ao aplicar as mesmas condições nos diferentes cenários, o modelo fornece um quadro confiável para entender as diferenças relativas na função biomecânica da mandíbula **(Rayfield, 2007)**. Futuras pesquisas poderiam refinar esses achados com simulações dinâmicas e a inclusão de tecidos moles, oferecendo uma visão ainda mais precisa da fascinante morfologia funcional dos chimpanzés.

CONCLUSÃO

Este estudo, por meio da Análise de Elementos Finitos (FEA), investigou a morfologia funcional da mandíbula dos grandes primatas: *Pongo pygmaeus*, *Gorilla gorilla* e *Pan troglodytes*, validando a hipótese central de que a arquitetura mandibular de cada espécie representa uma solução otimizada para as demandas de suas dietas específicas. Os resultados quantitativos não apenas corroboram as previsões sobre suas adaptações alimentares, mas também fornecem uma base comparativa essencial para elucidar a trajetória evolutiva singular de gracilização e posteriorização mandibular na linhagem Hominini.

A análise revelou especializações morfofuncionais distintas e notáveis:

A mandíbula de *Pongo pygmaeus* demonstrou ser uma ferramenta poderosa e eficiente para o esmagamento com os molares, suportando baixas tensões (32,79 a 36,45 MPa) consistentes com sua adaptação à durofagia. Contudo, essa robustez implica um alto custo biomecânico durante a incisão, que gera picos de estresse elevados (até 104,42 MPa), próximos ao limite de fadiga óssea.

A mandíbula de *Gorilla gorilla* apresentou a mandíbula mais especializada do grupo, otimizada para a moagem prolongada de vegetação fibrosa. As tensões extremamente baixas nos molares durante a mastigação (pico de 8.60 MPa) confirmam uma adaptação para a resistência e eficiência em tarefas de baixo impacto, mas repetitivas, em detrimento de uma função incisiva versátil.

A mandíbula mais grácil de *Pan troglodytes* mostrou-se altamente eficiente para sua dieta predominantemente frugívora, com baixo estresse nos molares (27,34 a 37,71 MPa). No entanto, o uso mais vigoroso dos incisivos revela suas limitações estruturais, gerando tensões de 76,39 MPa, um valor próximo ao limiar de fadiga óssea, o que sugere um balanço entre versatilidade e risco estrutural.

A principal contribuição deste trabalho é a demonstração quantitativa de que a morfologia mandibular dos grandes símios é governada por pressões seletivas diretamente ligadas à sua ecologia alimentar. Essa base comparativa é fundamental para compreender a evolução humana, pois destaca a quão única foi a trajetória do gênero *Homo*. Enquanto os grandes primatas exibem especializações para a força bruta da mastigação, a linhagem do

gênero Homo focou na gracilização mandibular.

Mas a jornada humana seguiu um roteiro completamente diferente. Em vez de fortalecer a mandíbula, nós a reinventamos. Essa não foi apenas uma questão de tamanho, mas uma verdadeira revolução em seu design, impulsionada por uma das maiores mudanças em nossa história: deixamos de depender apenas da força bruta dos nossos dentes. Com ferramentas em mãos e o domínio do fogo, o preparo dos alimentos passou a acontecer fora da boca **(Wrangham, 2009).** A cultura e a tecnologia assumiram o trabalho pesado.

A anteriorização não significa que apenas os molares trabalhavam, mas que a pressão máxima e o trabalho de trituração se concentraram cada vez mais na parte de trás da boca.

O motivo é simples: o princípio da alavanca. A sua mandíbula funciona como uma alavanca, com o ponto de articulação (o fulcro) sendo a articulação temporomandibular (ATM), localizada perto das orelhas. Força Máxima e esforço mínimo: Assim como é mais fácil quebrar uma noz com um quebra-nozes perto da articulação, a força de mordida é muito maior nos dentes molares, que estão mais próximos da ATM. Mastigar alimentos duros com os dentes da frente (incisivos) exigiria uma força muscular imensa e colocaria uma tensão enorme na mandíbula **(Ross, 2005).**

Nos primeiros hominídeos que dependiam de dietas duras, a seleção natural favoreceu dentes posteriores grandes e robustos para maximizar essa eficiência de moagem **(Ungar, 2007).**

A gracilização e a dependência da tecnologia para processar alimentos são as marcas registradas do nosso gênero, *Homo*. Essa estratégia de pré-processamento externo provou ser imensamente bem-sucedida, pois liberou energia que antes era gasta em digestão e mastigação para ser investida em um cérebro maior **(Lieberman, 2013).** Nossos ancestrais mais recentes, como os Neandertais, embora já no caminho da gracilização em comparação com o *Homo erectus*, ainda possuíam mandíbulas e rostos mais robustos que os nossos, em parte porque usavam seus dentes da frente como uma "terceira mão" para segurar objetos, uma pressão seletiva que nós perdemos **(Trinkaus, 1983).**

O resultado é a mandíbula que temos hoje: mais delicada, com um queixo proeminente, que não foi moldada pela pressão de mastigar alimentos duros, mas sim pela liberdade que a engenhosidade nos deu **(Lieberman, 2013).** Em essência, nossa evolução trocou a força

biológica pela força cultural, um caminho que nos diferencia profundamente de todos os outros grandes primatas.

Naturalmente, como toda investigação científica, este trabalho tem suas fronteiras. A análise é um retrato congelado no tempo e não abarca toda a complexidade de um sistema vivo. Mesmo com essas considerações, o método comparativo nos permite enxergar com clareza as soluções distintas e fascinantes que a evolução projetou para o desafio universal de se alimentar.

Conclui-se que as pressões seletivas impostas pela dieta foram um fator determinante na evolução da morfologia mandibular dos grandes primatas. As diferenças observadas na robustez e na capacidade de propagação do estresse refletem as distintas estratégias de sobrevivência de cada espécie, ilustrando a íntima relação entre forma e função no complexo craniofacial. Pesquisas futuras, incorporando simulações dinâmicas e modelos mais complexos, poderão aprofundar ainda mais o entendimento sobre a biomecânica da mastigação e a evolução dos primatas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIELLO, L. C.; WHEELER, P. The expensive-tissue hypothesis: the brain and the digestive system in human and primate evolution. *Current Anthropology*, v. 36, n. 2, p. 199-221, 1995.

BENAZZI, S.; GROSSE, I. R.; GRUPPIONI, G. The effect of the periodontal ligament on bone strain patterns in a finite element model of a modern human mandible. *Journal of Anthropological Sciences*, v. 92, p. 107-121, 2014.

BOESCH, C.; BOESCH, H. Sex differences in the use of natural hammers by wild chimpanzees: a preliminary report. *Journal of Human Evolution*, v. 10, n. 7, p. 585-593, 1981.

BRUNET, M. et al. A new hominid from the Upper Miocene of Chad, Central Africa. *Nature*, v. 418, n. 6894, p. 145-151, 2002.

CARTER, D. R.; HAYES, W. C. The compressive behavior of bone as a two-phase porous structure. *Journal of Bone and Joint Surgery*, v. 59, n. 7, p. 954-962, 1977.

CARTER, D. R.; HAYES, W. C. Compact bone fatigue damage: a microscopic examination. *Journal of Biomechanics*, v. 10, n. 5-6, p. 325-337, 1977.

DAEGLING, D. J.; GRINE, F. E. Functional morphology of the human premolar dentition. *American Journal of Physical Anthropology*, v. 85, n. 3, p. 353-363, 1991.

DAEGLING, D. J.; HYLANDER, W. L. Biomechanics of the primate jaw. In: *Primate Biomechanics*. Springer, Boston, MA, 1998. p. 173-200.

DAEGLING, D. J.; MCGRAW, W. S. The functional anatomy of the cercopithecoid mandible: an experimental study in *Papio anubis*. *Journal of Human Evolution*, v. 52, n. 4, p. 439-450, 2007.

FLEAGLE, J. G. *Primate adaptation and evolution*. 3rd ed. San Diego: Academic Press, 2013.

HYLANDER, W. L. An experimental analysis of temporomandibular joint reaction force in macaques. *American Journal of Physical Anthropology*, v. 51, n. 3, p. 433-456, 1979.

HYLANDER, W. L. Mandibular function and primate jaw morphology. *Journal of Morphology*, v. 183, n. 1, p. 1-8, 1985.

HYLANDER, W. L. Functional anatomy of the masticatory apparatus. In: CAMPBELL, C. J. et al. (eds.). *Primates in perspective*. New York: Oxford University Press, 2006. p. 411-435.

KAY, R. F.; WILLIAMS, B. A. Dental evidence for the diet of Old World monkeys and apes. In: CHIVERS, D. J.; LANGER, P. (eds.). *The digestive system in mammals: food, form and function*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. p. 361-419.

KIMBEL, W. H.; VILLMOARE, B. From Australopithecus to Homo: the transition that wasn't. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 371, n. 1698, 2016.

KLEIN, R. G. *The human career: human biological and cultural origins*. 3rd ed. Chicago: University of Chicago Press, 2009.

LIEBERMAN, D. E. *The evolution of the human head*. Cambridge: Harvard University Press, 2011.

LIEBERMAN, D. E. et al. The evolution and development of human chewing: a quantitative analysis. In: ZINNER, D.; HOHMANN, G. (eds.). *The role of food in the evolution of primate and human societies*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. p. 239-266.

LUCAS, P. W.; PETERS, C. R.; ARRAND, J. E.; ENG, C. M. The structure and mechanics of the food of extant primates. In: *Food and the Digestive Process in Primates*. Palgrave Macmillan, London, 1994. p. 117-143.

MARSHALL, A. J.; WRANGHAM, R. W. Evolutionary consequences of fallback foods. *International Journal of Primatology*, v. 28, n. 6, p. 1219-1235, 2007.

PLAVCAN, J. M. Sexual dimorphism in primate evolution. *American Journal of Physical Anthropology*, v. 147, suppl. 55, p. 142-163, 2012.

RAK, Y. *The australopithecine face*. New York: Academic Press, 1983.

RAYFIELD, E. J. Finite element analysis and understanding the biomechanics and evolution of skulls. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 35, p. 541-576, 2007.

REILLY, D. T.; BURSTEIN, A. H. The elastic and ultimate properties of some compact bone tissue. *Journal of Biomechanics*, v. 8, n. 6, p. 393-405, 1975.

ROSS, C. F. In vivo function of the craniofacial haft: the interorbital "pillar". *American Journal of Physical Anthropology*, v. 116, n. 2, p. 108-132, 2001.

ROSS, C. F. Finite element analysis in vertebrate biomechanics. *Experimental Biology*, v. 208, n. 9, p. 1599-1602, 2005.

ROSS, C. F.; HYLANDER, W. L. In vivo and in vitro studies of the functional morphology of the primate masticatory system. *American Journal of Physical Anthropology*, v. 113, suppl. 31, p. 1-38, 2000.

ROSS, C. F.; KAY, R. F. (eds.). *Anthropoid origins: new visions*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2004.

SENUT, B. et al. First hominid from the Miocene (Lukeino Formation, Kenya). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, v. 332, n. 2, p. 137-144, 2001.

STRAIT, D. S. et al. The feeding biomechanics and dietary ecology of Australopithecus africanus. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 106, n. 7, p. 2124-2129, 2009.

TAYLOR, A. B. Evolutionary biomechanics of hard object feeding in primates. In: PLAVCAN, **J. M.; KAY, R. F.; JUNGERS, W. L**. (Eds.). *Reconstructing behavior in the primate fossil record*. Springer, 2002. p. 233-256.

TEAFORD, M. F.; UNGAR, P. S. Diet and the evolution of the earliest human ancestors. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 97, n. 25, p. 13506-13511, 2000.

UNGAR, P. S. (ed.). *Evolution of the human diet: the known, the unknown, and the unknowable*. New York: Oxford University Press, 2007.

UNGAR, P. S. *Mammal Teeth: Origin, Evolution, and Diversity*. Johns Hopkins University Press, 2010.

VOGEL, E. R.; ZULFA, A.; VAN WOERDEN, J. T. The feeding ecology of the Bornean orangutan (*Pongo pygmaeus wurmbii*) in the Tuanan Lestari Research Area, Central Kalimantan. In: *The Neglected Ape*. Springer, New York, NY, 2017. p. 99-116.

WEINER, S.; WAGNER, H. D. The material bone: structure-mechanical function relations. *Annual Review of Materials Science*, v. 28, n. 1, p. 271-298, 1998.

WHITE, T. D.; SUWA, G.; ASFAW, B. Ardipithecus ramidus, a new species of early hominid from Aramis, Ethiopia. *Nature*, v. 459, n. 7243, p. 88-93, 2009.

WOOD, B.; RICHMOND, B. G. Human evolution: taxonomy and paleobiology. *Journal of Anatomy*, v. 197, n. 1, p. 19-60, 2000.

WRANGHAM, R. W.; CONKLIN, N. L.; CHAPMAN, C. A.; HUNT, K. D. The significance of fibrous foods for Kibale Forest chimpanzees. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, v. 334, n. 1270, p. 171-178, 1991.

DAEGLING, D. J. The human mandibular symphysis revisited: a review and retrospective. American Journal of Physical Anthropology, v. 147, n. S55, p. 164-180, 2012.

WANG, Q.; DECHOW, P. C.; HARRIS, E. F. A comparison of mandibular material properties between primates with different diets. American Journal of Physical Anthropology, v. 129, Supplement 42, p. 199, 2006.