

FÍSICA E BIOMECÂNICA DE ANIMAIS

ANIMALS PHYSICS AND BIOMECHANICS

FÍSICA Y BIOMECÁNICA DE ANIMALES

Alyson Fernando de Barros¹
Roberto Aguilar de Souza Júnior²

Resumo

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de apresentar soluções alternativas para o ensino da física; uma área do conhecimento e mostra aplicações da física em diversos contextos, com a intenção de atrair o interesse dos estudantes. Realizou-se uma pesquisa qualitativa multidisciplinar englobando mecânica, anatomia e fisiologia, conjunto chamado de biomecânica; esse conhecimento foi aplicado em situações da zoologia, com ênfase nas explicações físicas. O artigo divide-se em duas etapas; inicialmente apresentam-se as grandezas físicas que serão trabalhadas, citando aplicações no reino animal; na segunda etapa, analisam-se quatro animais. Como o objetivo é promover o ensino da física, não se aprofundou na análise de cada animal, mas buscou-se relacionar cada grandeza física a um animal, ampliando os exemplos de aplicação da física. Chegou-se a resultados esperados — como a forte relação entre as ciências — e a resultados curiosos, como a aplicação da física não apenas na biomecânica, mas também em estratégias de caça.

Palavras-chave: biomecânica; física do corpo; forças; biomecânica dos animais.

Abstract

This work was developed to present alternative solutions for teaching physics; it brings together areas of knowledge and shows applications of physics in different contexts, with the intention of attracting the interest of students.⁵ Multidisciplinary qualitative research was carried out, encompassing mechanics, anatomy, and physiology, a group called biomechanics; this knowledge was applied in zoological situations, with an emphasis on physical explanations. The article is divided into two stages; initially, the physical quantities that will be worked are presented, citing applications in the animal kingdom; in the second stage, four animals are analyzed. As the objective is to promote the teaching of physics, it did not go deep into the analysis of each animal, but sought to relate each physical quantity to an animal, expanding the examples of physics application. Expected results were reached — such as the strong relationship between the sciences — and curious results, such as the application of physics not only in biomechanics but also in hunting strategies.

Keywords: biomechanics; body physics; forces; biomechanics of animals.

Resumen

Este trabajo se desarrolló con el objetivo de presentar soluciones alternativas para la enseñanza de la física; una área del conocimiento y muestra aplicaciones de la física en diversos contextos, con la intención de atraer el interés de los estudiantes. Se realizó una investigación cualitativa multidisciplinaria que incluye mecánica, anatomía y fisiología, conjunto denominado de biomecánica; ese conocimiento se aplicó en situaciones de la zoología, con énfasis en las explicaciones físicas. El artículo se divide en dos etapas; inicialmente se presentan las magnitudes físicas a ser trabajadas, citando aplicaciones en el reino animal; en la segunda etapa, se estudian cuatro animales. Como el objetivo es hacerle promoción a la enseñanza de la física, no se profundiza en el análisis de cada animal, sino que se trató de relacionar cada magnitud física con un animal, ampliando, con eso, los ejemplos de aplicación de la física. Se obtuvieron resultados esperados — como la fuerte relación entre las ciencias — y resultados curiosos, como la aplicación de la física no solo en la biomecánica, sino también en estrategias de caza.

Palabras-clave: biomecánica; física del cuerpo; fuerzas; biomecánica de los animales.

¹ Acadêmico do curso de Física no Centro Universitário Internacional UNINTER. E-mail: afb_2312@hotmail.com.

² Docente no Centro Universitário Internacional UNINTER. E-mail: roberto.so@uninter.com.

1 Introdução

Com o propósito de oferecer opções para o ensino da física, mostrando algumas aplicações para torná-la mais agradável para os estudantes, este trabalho apresenta diversas situações do mundo animal onde a física explica a estática e a dinâmica dos movimentos, com tópicos de biomecânica.

A biomecânica é o estudo do movimento de animais; em geral, está associada a humanos, porém pode ser estendida perfeitamente para outras espécies. Se baseia em anatomia e fisiologia, explicada pela mecânica, que será o principal foco desse trabalho. Trata-se de descrever as grandezas físicas e exemplificar a sua aplicação na biomecânica, estática, dinâmica ou em características físicas do meio e, posteriormente, aplicá-las em situações da natureza, auxiliados pelo software de biomecânica Kinovea. Utilizaremos esse software para apontar as movimentações, forças, grandezas físicas e grupos musculares; como o objetivo é utilizar animais como exemplos, também se fez um estudo comportamental, que leva a entender como os animais utilizam a física a seu favor.

Na paleontologia, a biomecânica é uma ferramenta importante para a análise da movimentação de fósseis; principalmente para analisar as regiões de inserção muscular, estrutura da dentição e provável centro de massa. Toma-se como referência o estudo de animais atuais e faz-se anatomia comparada.

É importante descrever a biomecânica dos animais, também, pela sua utilidade na educação física, como destaca a física Emico Okuno na apresentação do seu livro *Desvendando a física do corpo humano* (OKUNO; FRATIN, 2017). Não há dúvidas sobre a importância da aplicação da biomecânica em todas as atividades da educação física que, em níveis profissionais, utiliza constantemente softwares, estudos e profissionais da biomecânica visando um aumento de performance.

2 Metodologia

Este estudo está embasado em pesquisas bibliográficas prévias de diferentes áreas, englobando mecânica, fisiologia, anatomia e zoologia. Utiliza uma abordagem qualitativa, aplicando estudos consolidados no meio acadêmico, em situações rotineiras da natureza.

A principal motivação para o tema foi aproximar o estudo da física, normalmente visto como pouco atraente, de áreas que despertem mais interesse nos alunos. O público-alvo são os professores de ensino médio ou superior de física básica, além de outros interessados na área.

A pesquisa bibliográfica foi feita pelo Google Acadêmico, que conta com um grande acervo, incluindo outras plataformas de arquivos de artigos. Para analisar a movimentação dos animais, as buscas fizeram-se pelo Youtube; os movimentos logo foram estudados pelo software Kinovea. A plataforma de vídeo permite a visualização fluida do comportamento dos animais e o software permite análise biomecânica e física; unem-se assim o conhecimento acadêmico com situações reais.

A segunda edição do livro *Desvendando a física do corpo humano: biomecânica*, de 2017 (OKUNO; FRATIN, 2017), foi a base principal para a elaboração dessa pesquisa.

O estudo se divide em duas etapas; a primeira focada em apresentar as grandezas físicas que serão trabalhadas com algumas aplicações em situações reais; a segunda aborda a movimentação dos animais escolhidos (falcão-peregrino, chimpanzé e pinguim) e faz a descrição da física que atua nos corpos. Embora todos os conceitos possam ser aplicados nos animais escolhidos, procurou-se abordar cada tópico/grandeza física em apenas um deles. Como auxílio, utilizou-se o software de análises biomecânicas Kinovea, que facilita a elucidação das forças atuantes no animal.

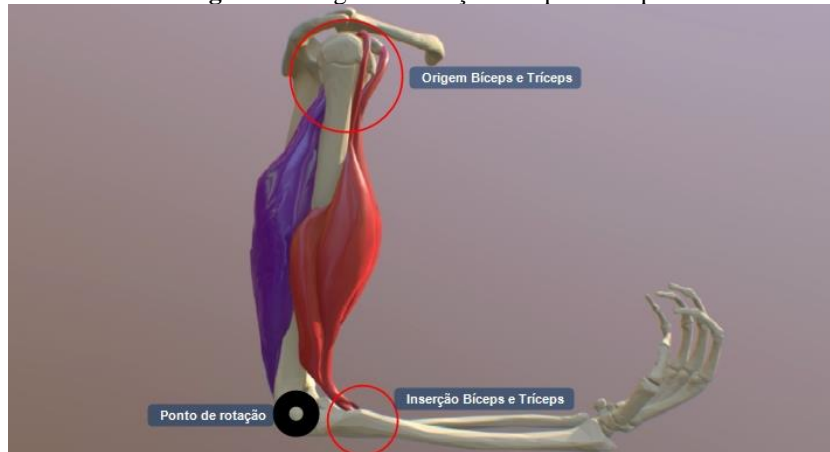
3 Grandezas Físicas Aplicadas à Biomecânica

Para um que indivíduo possa se sustentar e se locomover, faz-se necessária uma série de grandezas físicas trabalhando em conjunto. Cada espécie deverá aproveitar de forma diferente a física a seu favor; então, nesse capítulo, as grandezas físicas serão introduzidas junto com exemplos de aplicações. As grandezas estudadas serão: força, torque, centro gravitacional, pressão, momento linear, densidade, coeficiente de atrito e momento de inércia.

3.1 Força Muscular

Para compreendermos como somos capazes de realizar força, é necessário entender como os músculos funcionam. Os músculos responsáveis pela locomoção são chamados de estriados esqueléticos, possuem uma origem e pelo menos uma inserção ligando dois ossos; a origem está fixa em um osso maior e mais próximo do tronco; ao ser contraído, a extremidade do músculo fixa na parte mais extrema do corpo é erguida; pela terceira lei de Newton, a força exercida pelo músculo é igual na origem e na inserção.

Figura 1: Origem e inserção bíceps e tríceps



Fonte: Chrishammang (2018)³.

Segundo Okuno e Fratin (2017), “Essa força máxima, por unidade de área, varia de 30 a 40 N/cm^2 e independe do tamanho do animal, tendo, portanto, o mesmo valor para o músculo de um rato ou de um elefante” (OKUNO; FRATIN, 2017, p. 25). Porém, fora de situações de perigo, normalmente utilizamos entre 60 e 65% da nossa força, como apontado em um estudo japonês de 2009, em que se verificou que a força muscular para homens é de aproximadamente $23.9 \pm 2.4 N/cm^2$. A diferença de força entre um rato e um elefante não se dá por músculos mais resistentes ou eficientes, mas sim por uma maior quantidade muscular. Observando as tabelas abaixo, de volume médio dos músculos, podemos fazer uma comparação de força entre os músculos; como esperado, o maior músculo é o quadríceps.

Tabela 1: Volume muscular dos membros superiores

Grupos musculares da parte superior⁹

Músculo	Volume muscular médio (cm^3)
Deltoide	380,5
Tríceps braquial	372,1
Peitoral maior	290,0
Grande dorsal	262,3
Bíceps braquial	143,7
Braquial	143,7
Braquiorradial	65,1

Fonte: musculacao.net (2019).⁴

³ Disponível em: <https://sketchfab.com/chrishammang>. Acesso em: 6 ago. 2021.

⁴ Disponível em: <https://www.musculacao.net/musculos-grandes-pequenos/>. Acesso em: 6 ago. 2021.

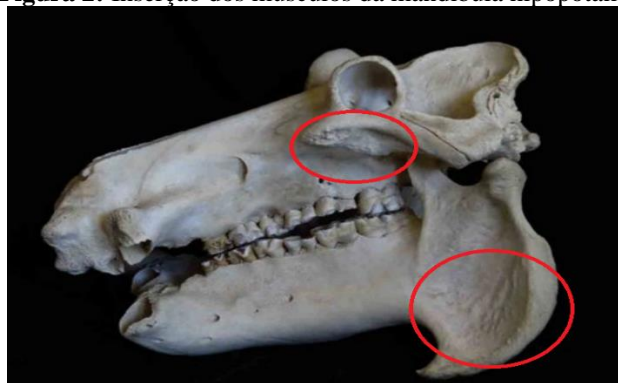
Tabela 2: Volume muscular dos membros inferiores
Grupos musculares da parte inferior^{9,13}

Músculo	Volume muscular médio (cm³)
Quadríceps femoral	1417,4
Glúteo máximo	764,1
Gastrocnémio	642
Iliopsoas	353,0
Bíceps femoral	269,8
Sartório	126,7

Fonte: musculacao.net (2019).⁵

As zonas de fixação muscular são áreas de ancoragem dos músculos, seja origem ou inserção; então, os ossos são a base da estrutura do corpo. Os diversos músculos são responsáveis, cada um, pela contração de uma área especializada, gerando o movimento. Os tendões, densos e flexíveis (características importantes para não sofrer desgastes por atrito nas articulações), são responsáveis por transmitir a força de contração do músculo para os ossos que possuem articulações; esses são os componentes para a movimentação do corpo.

Figura 2: Inserção dos músculos da mandíbula hipopótamo



Fonte: Waking Up Wild (2015).⁶

3.2 Torque

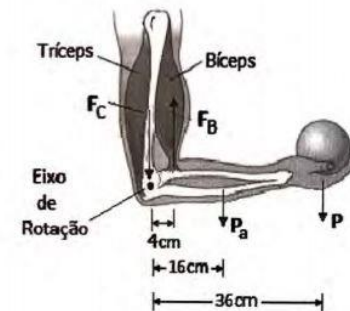
O torque é a grandeza física que mede a facilidade de rotar objetos; sua expressão é dada por $\tau = F \cdot d \cdot \text{sen}(\theta)$, em que F é a força que está rotando o objeto, d é o comprimento do braço de alavanca e θ o ângulo entre a força (F) e o braço de alavanca. Na anatomia, o torque está

⁵ Disponível em: <https://www.musculacao.net/musculos-grandes-pequenos/>. Acesso em: 6 ago. 2021.

⁶ Disponível em: <https://wakingupwild.com/>. Acesso em: 6 ago. 2021.

presente em todas as articulações, pois temos uma articulação servindo de ponto de rotação, uma força muscular e os ossos com um comprimento d servindo de braço de alavanca.

Figura 3: Braço de alavanca do antebraço



Fonte: Me salva (2020)⁷.

Na Figura 3, temos quatro forças atuando: a força peso do objeto que atua na palma da mão, a força peso do antebraço, a força normal representada como F_c (força do cotovelo) e a força do bíceps. Com exceção da força normal, todas possuem um braço de alavanca (d). Na expressão do torque, vemos a relevância do braço de alavanca; portanto, para evitarmos a rotação, precisamos exercer uma força muscular em contrapartida; as forças peso e o torque total devem ser 0. Em outras palavras, o torque produzido pelo peso deve ser igual ao torque produzido pelo músculo: $\tau_p = \tau_m \rightarrow P \cdot d_a \cdot \text{sen}(\phi) = F_m \cdot d \cdot \text{sen}(\theta)$, em que ϕ é o ângulo entre o braço de alavanca e a força peso e θ é o ângulo entre o bíceps e os ossos do braço (rádio e ulna); esses ângulos variam conforme o movimento. É comum que algumas pessoas joguem o tronco para trás, com isso geram um impulso e, diminuindo o ângulo entre o bíceps e o antebraço, diminuem a força muscular necessária para rotar o braço $\tau_m = \downarrow F_m \cdot d \cdot \text{sen}(\pm 175) = \uparrow F_m \cdot d \cdot \text{sen}(\pm 160)$. No levantamento de peso, na última fase do movimento, o halterofilista levanta o peso acima do seu ombro; a intenção desse movimento é alinhar a força peso com o braço, zerando a rotação frontal; assim, não precisa fazer mais força para equilibrar o torque.

⁷ Disponível em: <https://www.mesalva.com/enem-e-vestibulares/banco-de-provas/ufrgs/prova-ufrgs-2020/ufrgs-2020-fisica/ufrgs2020fis10>. Acesso em: 6 ago. 2021.

Figura 4: Halterofilista Fernando Reis

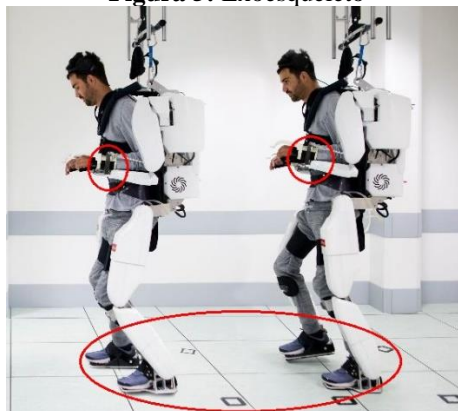


Fonte: Montagem R7/Reprodução/Instagram (2019)⁸.

A grande dificuldade dos músculos de articulações é que anatomicamente a região de inserção está muito próxima do ponto de rotação, o braço de alavanca (d) é muito pequeno, como observado na Figura 4; o braço de alavanca do músculo é cerca de 9 vezes menor do que o braço de alavanca de um peso na palma da nossa mão. Para compensar o torque, a força muscular F_m precisará ser muito maior $\tau_p =$

$\tau_m = \uparrow F_m \cdot \downarrow d \cdot \text{sen}(\theta)$, desperdiçando assim muita força na realização do movimento. Uma configuração mais eficiente seria o músculo ligando diretamente a extremidade do braço à outra extremidade do antebraço; não é à toa que exoesqueletos são presos nas extremidades do corpo, como se vê na figura a seguir.

Figura 5: Exoesqueleto



Fonte: Clinatex Endowment Fund/AFP (2019)⁹.

3.3 Centro gravitacional e centro de massa

⁸ Disponível em: <https://recordtv.r7.com/pan-lima-2019/fotos/tudo-pela-medalha-conheca-a-dieta-de-11-mil-calorias-de-fernando-reis-01082019#/foto/2>. Acesso em: 6 ago. 2021.

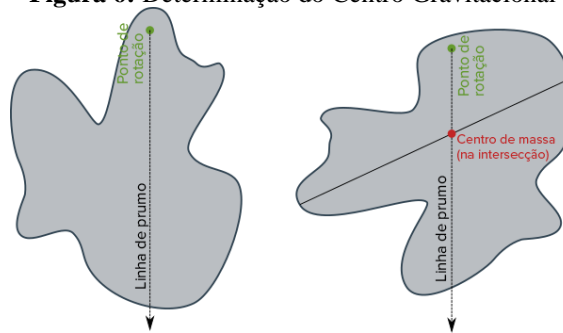
⁹ Disponível em: <https://www.bol.uol.com.br/noticias/2019/10/04/tetraplegico-volta-a-andar-com-exoesqueleto-controlado-pelo-cerebro.htm>. Acesso em: 6 ago. 2021.

O centro gravitacional (CG) de um corpo é um ponto onde podemos considerar a aplicação de toda a força peso exercida sobre ele; o centro de massa (CM) é o ponto onde consideramos que se concentra toda a massa do corpo; exceto em circunstâncias específicas, não há problema em tomar um ponto como responsável por toda a massa do corpo. Centro de massa e centro gravitacional normalmente são coincidentes.

Existem alguns métodos práticos para se determinar o centro gravitacional de um objeto, porém de forma analítica, podemos considerar o CG como uma somatória de cg de um corpo ($CG = \sum cg$), isso porque muitas vezes se torna mais fácil calcular por partes, e seu cálculo pode ser efetuado pela seguinte equação:

$$X_{CM} = \frac{m_1x_1+m_2x_2+\dots+m_nx_n}{\Sigma m_n}; \quad Y_{CM} = \frac{m_1y_1+m_2y_2+\dots+m_ny_n}{\Sigma m_n}; \quad Z_{CM} = \frac{m_1z_1+m_2z_2+\dots+m_nz_n}{\Sigma m_n}$$

Figura 6: Determinação do Centro Gravitacional



Fonte: Khan Academy (c2021)¹⁰.

A localização do centro de massa é extremamente importante para o equilíbrio do corpo, principalmente em animais bípedes, pois o quadrupedalismo aumenta a área da base, de maneira que o centro de massa pode ficar em uma configuração estável. Porém, animais bípedes como os seres humanos, cangurus, pangolins, lebre-saltadora, aves e alguns camundongos do gênero *notomys*, precisam aprender a equilibrar o seu centro gravitacional.

¹⁰ Disponível em: <https://pt.khanacademy.org/science/physics/linear-momentum/center-of-mass/a/what-is-center-of-mass>. Acesso em: 6 ago. 2021.

Figura 7: Centro de Massa do corpo humano



Fonte: Ana Botafogo Mainson (2018)¹¹.

3.4 Pressão

A pressão é definida como $P = \frac{F}{A}$; é uma grandeza extremamente relevante quando se aplica uma força, pois toda força mecânica é aplicada sobre uma área; logo, sempre que uma força for aplicada, estará exercendo pressão. Esse é o princípio do corte; para os animais esse princípio é extremamente relevante nas garras, dentes e chifres, pois o objetivo é justamente perfurar. Portanto, mesmo animais pequenos como pássaros e gatos podem ferir, não pela força que têm, mas pela pressão exercida. Alguns pássaros conseguem aumentar a sua velocidade na hora do bote; sendo assim, aumentam a força do impacto e, com garras afiadas, conseguem facilmente perfurar suas vítimas. Os dentes de carnívoros e herbívoros têm distinções claras, como mostra a figura a seguir; isso porque são especializados em trabalhos diferentes, e são classificados de acordo com a pressão exercida.

Figura 8: Tipos de dentição

Alimentação



Fonte: Censa.edu (2016)¹².

¹¹ Disponível em: <https://anabotafogomaisson.com.br/a-manutencao-do-equilibrio/>. Acesso em: 6 ago. 2021.

¹² Disponível em: [http://www.censa.edu.br/site_novo/web/uploads/files/mam%C3%ADferos%202016%20\(1\).pdf](http://www.censa.edu.br/site_novo/web/uploads/files/mam%C3%ADferos%202016%20(1).pdf). Acesso em: 6 ago. 2021.

Os dentes moedores, principais dentes dos herbívoros, possuem uma área maior para apoiar e triturar a comida, mastigando sem que ela escape. Os dentes perfuradores em geral são utilizados para confrontos, mas podem ser usados para roer ou cortar comida; a função de defesa é facilitada pela sua posição na frente da boca, que aumenta o braço de alavanca e, conseqüentemente, a força e a pressão, além de estarem mais externos ao corpo. Os dentes rasgadores têm uma área pequena, mas ligeiramente superior e normalmente em forma triangular; dessa forma podem rasgar a carne; têm também um comprimento maior para poder rasgar mais fibras. Trabalhando com os músculos do pescoço, o carnívoro consegue se alimentar; assim, a função de cada dente está associada à pressão exercida e à sua finalidade

Grandes áreas são úteis quando se deseja dissipar força, como é o caso de animais pesados, como elefantes e rinocerontes. Contar com áreas maiores nos pés garante que esses animais não afundem em solo macio, também são úteis para reduzir o impacto do corpo nos pés; portanto, patas pequenas proporcionariam um incômodo maior para esses animais. Para um elefante da savana de $6000kg$, sabendo que as patas têm $\pm 30\text{ cm}$ de diâmetro, podemos calcular a pressão que exerce sobre o solo, considerando que o peso está sendo distribuído em

$$\text{todas as patas } P = \frac{F_p}{A} = \frac{6000 \cdot 9,8}{\pi \cdot 0,15^2} = \frac{14700}{0,07} = 208 \text{ kN/m}^2.$$

Figura 9: Patas de elefante



Fonte: Bol.uol (2015)¹³.

3.5 Momento Linear

O momento linear, também chamado de quantidade de movimento, é dado por

¹³ Disponível em: <https://www.bol.uol.com.br/listas/2015/10/31/32-curiosidades-sobre-os-elefantes-que-nao-incomodam-ninguem.htm?foto=23>. Acesso em: 6 ago. 2021.

$\vec{P} = m \cdot \vec{v}$. É a grandeza que caracteriza o impacto, expressa pela quantidade de massa a uma determinada velocidade. Intuitivamente conhecemos a sua importância, pois sabemos, por exemplo, que um caminhão a 60km/h causa muito mais estrago que uma motocicleta na mesma velocidade. Para os animais não é diferente; calculando o momento linear de distintos animais, podemos afirmar que a baleia-azul possui o maior momento linear dos animais mais pesados e rápidos do mundo. Em uma situação mais realista, podemos comparar o momento linear entre o elefante e o rinoceronte, sendo o elefante capaz de empurrar quase dois rinocerontes, o que mostra a vantagem de um momento linear maior.

Tabela 3: Momento linear

ANIMAIS	M (kg)	V (m/s)	P (kg.m/s)
Baleia Azul	150.000	13,89	2.083.500
Baleia jubarte	30.000	8,33	249.900
Canguru	66	19,44	1.283
Cavalo	1.000	24,44	24.440
Chimpanzé	60	11,11	667
Elefante	6.000	11,11	66.660
Falcão	1,5	108,33	162
Girafa	800	16,67	13.336
Gorila	160	11,11	1.778
Guepardo	72	31,95	2.300
Leão	190	22,22	4.222
Leão marinho	190	11,11	2.111
Lobo	80	16,67	1.334
Orca	5.400	15,56	84.024
Rinoceronte	2.200	15,28	33.616
Tigre	170	18,06	3.070
Tubarão	1.100	15,56	17.116
Urso	600	15,56	9.336

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

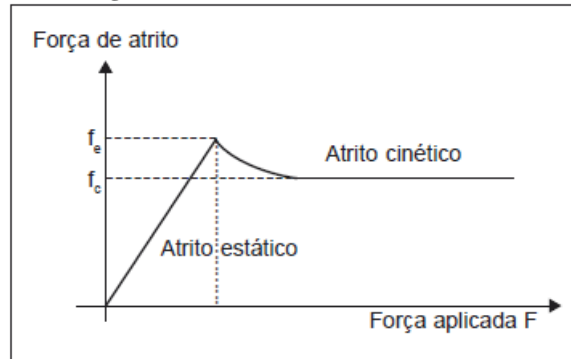
Momentos lineares grandes nem sempre são adequados; enquanto a maior parte dos animais aumenta a sua velocidade para a caça, no intuito de alcançar e ferir a presa, a baleia diminui, pois tamanho volume e momento linear deslocariam muita água na sua frente, empurrando os peixes para longe.

3.6 Coeficiente de atrito

Quando dois sólidos estão em contato, as rugosidades entre as superfícies se encaixam, dificultando o movimento; quanto mais rugosidade as superfícies tiverem, maior será o coeficiente de atrito, conseqüentemente, a dificuldade de movimento. O coeficiente de atrito é representado por μ , e divide-se em estático e cinético. Em geral μ_c é em torno de 30% menor

que μ_e , como nas nossas articulações, em que $\mu_e = 0,01$ e $\mu_c = 0,003$. Quando lubrificamos alguma superfície, estamos preenchendo as rugosidades com um líquido, diminuindo o coeficiente de atrito.

Figura 10: Gráfico coeficiente de atrito



Fonte: Blogdoenem, [s.d.]¹⁴.

O coeficiente de atrito está presente nos sólidos e fluidos; é representado pela letra D ou C. Porém, a origem do atrito é um pouco diferente, pois é causada pela área de contato do sólido com a densidade e viscosidade do fluido; as propriedades do fluido dificultam a passagem do objeto.

3.7 Densidade

Definida como $d = \frac{m}{V}$, densidade é a propriedade que mede a concentração de matéria em determinado volume; é de extrema importância para alguns animais, como as aves, os peixes e animais com casco. Para as aves, é necessário possuir ossos e penas pouco densas, para diminuir o peso e aumentar a superfície de contato com o ar, aumentando assim a sustentação

No caso dos peixes, a densidade é utilizada para controlar a sua profundidade na água. Seja inflando e esvaziando a bexiga natatória (para peixes ósseos), ou concentrando e espalhando um óleo produzido pelo fígado (peixes cartilagosos), eles controlam a densidade conforme desejam alterar a sua profundidade. No caso dos mamíferos aquáticos, eles possuem uma grande quantidade de gordura que, além da função de proteção térmica, funciona como regulador de densidade. Também contam com o auxílio das nadadeiras horizontais da cauda para se impulsionar para cima ou para baixo. Embora esses animais tenham desenvolvido métodos diferentes para a flutuação, o princípio é o mesmo, controlar a densidade.

¹⁴ Disponível em: <https://blogdoenem.com.br/forcas-de-atrito-fisica-enem/>. Acesso em: 6 ago. 2021.

A função da carapaça é a proteção do indivíduo; aumenta a resistência de uma parte externa do corpo pela sua densidade. Alguns animais se destacam, como as tartarugas e os besouros. As carapaças normalmente são formadas de camadas de queratina concentrada; a da tartaruga e as escamas do pangolim são formadas por creatina compactada, o mesmo acontece nos cascos de cavalos e vacas, ainda que tenham finalidades diferentes, pois protegem as patas do animal do contato com o solo e diminuem o coeficiente de atrito, facilitando a corrida.

3.8 Momento de Inércia

O momento de inércia, é a grandeza que mede a inércia rotacional, ou seja, a dificuldade de rotar de um corpo. Calcula-se o momento de inércia para cada eixo; considerando três eixos principais, então teremos I_x, I_y e I_z , pois cada eixo normalmente possui uma geometria diferente. Pode ser calculado a partir de $I = M \cdot R^2$, onde M é a massa total e R o raio de giração. Porém, o momento de inércia tem um coeficiente diferente para cada objeto, pode ser calculado matematicamente através de integrais e difere de objeto para objeto pela geometria. Por exemplo, o momento de inércia de um cilindro oco é $I_x = \frac{M}{2}(R_1^2 + R_2^2)$, e o de um cilindro maciço $I_x = \frac{M \cdot R^2}{2}$, no eixo y (rotação em torno de si) $I_y = \frac{M \cdot R^2}{4} + \frac{M \cdot L^2}{12}$. Um mesmo corpo pode ter diferentes momentos de inércia e o eixo de rotação deve obrigatoriamente passar pelo CG. Quando vemos um equilibrista com um bastão, a intenção é justamente aumentar o raio, pois se aumenta o momento de inércia, dificultando a rotação lateral do corpo. O mesmo princípio é aplicado quando estamos quase caindo e abrimos o braço para nos equilibrarmos; aumentamos o raio e o momento de inercia, dificultando a queda, ou seja, aumentando o equilíbrio. O corpo humano não é um objeto geométrico regular, portanto, não é fácil determinarmos I por métodos matemáticos; estudos com cadáveres dão os seguintes momentos de inercia: $I_y = \pm 1,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ e com os braços abertos $I_y = \pm 2,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, e $I_z = \pm 13,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

3.9 Escamas, pelo, pena, casco e couro

Os acessórios que revestem os animais têm uma clara importância no desempenho e na sobrevivência da espécie, porém, cada um cumpre uma função diferente, de acordo com as necessidades do animal:

- **Escamas:** as placas lisas e resistentes que cobrem o corpo de diversos animais possuem duas funções importantes; a primeira é a proteção, dificultando cortes, pois

normalmente são compostos densos; a segunda é a função hidrodinâmica, no caso dos peixes. Além de densas, as escamas são extremamente lisas, diminuindo o arrasto.

- **Pelo:** o pelo tem a importante função de manter os mamíferos aquecidos. Sabe-se que a transferência de calor pode ser escrita como $Q = m \cdot c \cdot \Delta t$, e o fluxo de calor é dado por $\phi = \frac{K \cdot A \cdot \Delta T}{L}$.
- **Pena:** para animais voarem, é imprescindível possuir uma superfície grande para gerar uma força de sustentação; a força de sustentação atua na vertical e é oposta ao peso. Aumentar a área implica em aumentar obrigatoriamente a massa e, conseqüentemente, aumentar a força vertical para baixo. A baixa densidade da pena consegue proporcionar uma otimização do voo, aumentando a sustentação significativamente enquanto aumenta pouco a massa.
- **Carapaça e couro:** ambos possuem a finalidade de proteção e de isolante térmico (no caso de mamíferos); as carapaças podem derivar de ossos, queratina ou uma combinação de ambos, aumentando a resistência à compressão e perfuração do material. Já o couro é menos resistente, resistência que pode variar conforme a espessura. Segundo uma pesquisa de 2004 (VILLARROEL; COSTA; OLIVEIRA, 2004), a resistência ao rasgamento do couro de cabras é de em média $57,38 \text{ kgf/cm}$ ou $562,71 \text{ N/cm}$; sendo essa a pressão suportada pelo couro, é plausível supor que esses dados sejam semelhantes para outros mamíferos.

4 Análise física dos animais

Este capítulo analisará a biomecânica de animais, aplicando todas as grandezas físicas vistas até aqui como forma de exemplificar como a física está envolvida na dinâmica dos seres vivos; os animais analisados serão o falcão-peregrino, chimpanzé e o pinguim.

4.1 Falcão-peregrino

A característica mais proeminente no falcão-peregrino é a sua velocidade de queda, isso porque inicialmente ele se impulsiona para baixo, aumentando a velocidade; posteriormente ele reduz a área das asas, diminuindo a força de arrasto $f_a = \frac{1}{2} C_a \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$. Então, a segunda lei de Newton para o falcão fica $P - f_{at} = m \cdot g$; como a força de atrito é dependente da velocidade e a força peso é constante em uma determinada velocidade, não existirá mais aceleração sobre o corpo e essa velocidade é chamada de velocidade terminal (v_t). Analisando a fórmula da

velocidade terminal em queda livre, temos, $v_t = \sqrt{\frac{2.m.g}{C.\rho.A}}$. Na equação, vemos que os fatores que aumentam v_t são massa e gravidade; o falcão não tem uma grande massa para auxiliá-lo na queda, de maneira que, em queda livre, encolhe as asas diminuindo a sua área de contato com o ar. Seu formato aerodinâmico diminui o coeficiente de atrito, e como na altura em que ele normalmente voa, a densidade do ar é menor, pode gerar uma velocidade terminal de pouco mais de 320 km/h. Ao atingir altas velocidades, ele consegue maximizar seu sucesso nos botes, tento em vista que boa parte dos alvos do falcão-peregrino são outros pássaros.

Figura 13: Comparação de voo (falcão-peregrino)



Fonte: James Zipp (2019)¹⁵/Meus animais (2019)¹⁶.

Para voar a tamanha velocidade, é preciso lidar com alguns problemas. Pela equação de Bernoulli, $P_1 + \rho gh_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = P_2 + \rho gh_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}$, podemos calcular a diferença de pressão entre o ar atmosférico e o ar dentro do pulmão do falcão. Conseguimos ver que os fatores relevantes são a pressão do ar, a velocidade e a densidade do ar; como a densidade do ar, a gravidade e a altura são praticamente iguais, podemos simplificar de tal forma que $P_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}$. Assim, vemos que pressão e velocidade estão relacionadas. Portanto para $P_1 = 1 \text{ atm}$ e $v_1 = 320 \text{ km/h} = 88,9 \text{ m/s}$; como a velocidade dentro do pulmão é praticamente 0, então a pressão P_2 seria alta o suficiente para explodir o pulmão da ave. A solução encontrada pela natureza foi um sistema de osso dentro do nariz, que diminui a velocidade do ar de tal forma que não faz dano.

Aumentando a velocidade também aumenta o dano causado às presas, pois $P = \frac{F}{A} = \frac{m.a}{A} = \frac{m \Delta V}{A \Delta t}$; dessa forma, quanto maior a velocidade e a massa e quanto menor a área e o intervalo de tempo na perfuração, maior será a pressão.

¹⁵ Disponível em: <https://fineartamerica.com/featured/peregrine-falcon-diving-james-zipp.html>. Acesso em: 6 ago. 2021.

¹⁶ Disponível em: <https://meusanimais.com.br/falcao-uma-ave-imponente/>. Acesso em: 6 ago. 2021.

4.2 Chimpanzé

Notoriamente, a característica mais marcante dos primatas é a sua movimentação através das árvores e o seu equilíbrio. Na movimentação entre um galho e outro, precisamos avaliar a facilidade ou dificuldade de rotação de um corpo, representado pelo momento de inércia I . Como os corpos dos animais não são regulares, não é fácil obtermos esse valor; então, podemos associá-lo ao momento de inércia medido experimentalmente. Para um chimpanzé, podemos supor valores ligeiramente inferiores; na situação em que está pendurado em uma árvore pegando impulso, podemos relacionar o momento de inércia com o torque da seguinte forma, $I = \frac{\tau}{\alpha} \rightarrow \frac{P.d.\text{sen}(\theta)}{\alpha} \rightarrow \frac{m.g.d.\text{sen}(\theta)}{\alpha}$, onde α é a aceleração angular, e o momento de inércia é proporcional ao torque (τ) e inversamente proporcional à aceleração angular.

Figura 14: Torque (Chimpanzé)



Figura 15: Momento de Inércia (Chimpanzé)



Fonte: Disney Nature (2012).

Outra grandeza física presente na locomoção de um macaco é o momento angular, definido como $L = r.m.v.\text{sen}(\theta) = I.\omega$. Expressa a quantidade de movimento em rotação e pode indicar o impacto de colisão com esse corpo, pois quanto mais pesado, mais rápido e maior o raio, maior será a colisão. Portanto, primatas muito pesados têm dificuldades para se locomover pelas árvores, pois esse impacto quebraria os galhos mais finos. O momento angular está diretamente associado ao torque pois, derivando o momento angular, encontramos $\frac{d\vec{L}}{dt} =$

$$\frac{d(\vec{r} \times m\vec{v})}{dt} = \left[\frac{d\vec{r}}{dt} \times m\vec{v} \right] + \left[\vec{r} \times m \frac{d\vec{v}}{dt} \right] = (\vec{v} \times m\vec{v}) + (\vec{r} \times m\vec{a}) = \vec{r} \times \vec{F} = \tau.$$

Sabendo que a energia cinética é dada por $E_c = \frac{1}{2}m.v^2$ e a velocidade linear é $v = \omega.R$, encontramos a energia cinética rotacional $E_R = \frac{1}{2}m.\omega^2R^2$, que é a energia gasta pelo chimpanzé para executar o movimento. Para saltar, consideramos as pernas como molas capazes de impulsionar; então, temos a energia elástica $E_e = \frac{1}{2}k.x^2$, em que x é deformação da mola e k , a constante da mola.

Para subir em árvores, os chimpanzés contam com 4 membros para se segurar, pois os pés são similares às mãos, com os polegares fazendo o movimento de pinça. Ao subir em árvores, os músculos debaixo de cada falange se contraem, fechando a mão; no ato de escalada atuam quatro forças, a força peso, a força muscular (dos dedos para segurar o corpo e dos braços e pernas para subir), a força normal e a força de atrito. A dinâmica do movimento acontece em pares; com a mão direita trabalhando em conjunto com a perna esquerda e a mão esquerda com a perna direita, garante-se um movimento sem rotações laterais. Enquanto o primeiro par de membros garante a sustentação do indivíduo, no segundo par os músculos sartório, deltoide posterior, latíssimo do dorso, entre outros, trabalham para mover braço e perna para cima; então os pares de músculos trocam de função até que o chimpanzé alcance o seu objetivo.

Figura 16: Subida em árvores (chimpanzé)



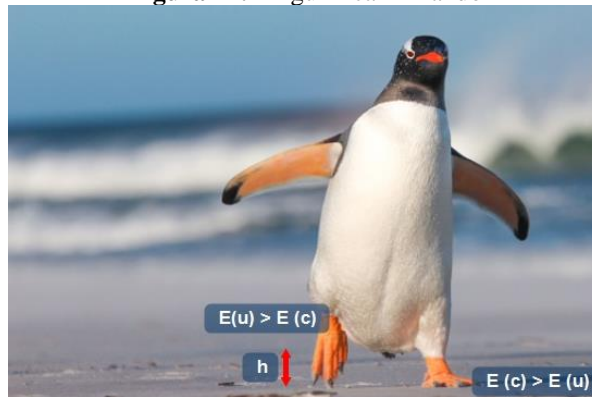
Fonte: Disney Nature (2012).

4.3 Pinguim

Para suportar as condições rígidas de seu habitat, o pinguim possui uma série de adaptações, que vão desde a caminhada até o seu formato. Começaremos a análise do pinguim em terra; basicamente há dois métodos de locomoção, em pé e deitado. O primeiro método é mais eficiente energeticamente e o segundo mais rápido. Quando queremos caminhar, comprimimos e relaxamos uma série de músculos enquanto inclinamos levemente o CG para a frente, inclinação que fica mais visível durante as corridas. Porém, toda essa contração de músculos gastaria muita energia de animais que precisam realizar longas caminhadas e podem ficar meses sem comer. Além da anatomia não muito favorável a caminhadas, a forma que os pinguins encontraram para contornar esse problema foi a utilização da energia cinética ($E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$) e potencial gravitacional ($E_u = m \cdot g \cdot h$) a seu favor. Quando uma pata está erguida, tem energia potencial; então o pinguim descola o seu centro de massa em direção a

essa pata, utilizando a gravidade para transformar E_u em E_c ($\frac{1}{2}m \cdot v_i^2 + m \cdot g \cdot h_i = \frac{1}{2}m \cdot v_f^2 + m \cdot g \cdot h_f \rightarrow 0 + m \cdot g \cdot h_i = \frac{1}{2}m \cdot v_f^2 + 0$) e gasta pouquíssima energia nesse método.

Figura 17: Pinguim caminhando



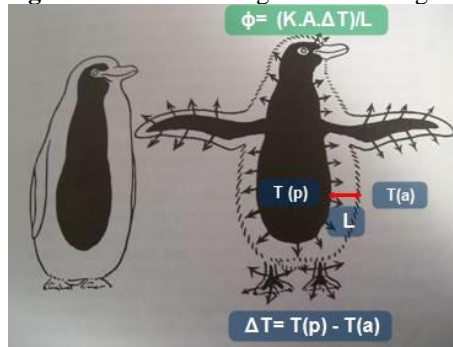
Fonte: Istockphoto (2021c)¹⁷.

Assim como as aves, os pinguins não têm dentes, ao menos não de ossos; o que esses animais têm na boca são papilas pontiagudas, formadas por queratina, muito semelhante aos dentes perfuradores de animais com dietas piscívoras. Os pinguins possuem diversas papilas perfuradoras na língua e no palato, inclinadas para dentro da boca, para perfurar e trazer os animais para a garganta.

Como habitam em ambientes que podem chegar a $-50\text{ }^\circ\text{C}$, é necessário mecanismos para se proteger do frio, a começar pelas penas que, diferentes da maioria das aves, são mais densas, propriedade que se torna importante analisando o fluxo de calor. Como em seu habitat ΔT é muito alto, o coeficiente de K deve ser obrigatoriamente baixo para evitar a perda de temperatura $\phi = \frac{K \cdot A \cdot \Delta T}{L}$; outro recurso interessante é um óleo secretado para impermeabilizar as penas, que diminui o coeficiente de atrito entre o corpo e a água e impede que as penas absorvam água — que aumentaria o peso — e protege do frio. Além disso, contam com uma generosa camada de gordura. Embora ΔT seja alto, o pinguim possui alguns mecanismos de proteção; para temperaturas extremas, os pinguins se aproveitam do fato de serem sociáveis e formam grupos. Cada pinguim gera o seu calor e a distância L entre um pinguim e o meio externo pode aumentar enormemente, pois contam apenas com a cabeça para dissipar calor, justamente a região com a menor área.

¹⁷ Disponível em: <https://www.istockphoto.com/br/foto/pinguim-gentoo-caminhando-na-praia-gm511369366-86621789>. Acesso em: 6 ago. 2021.

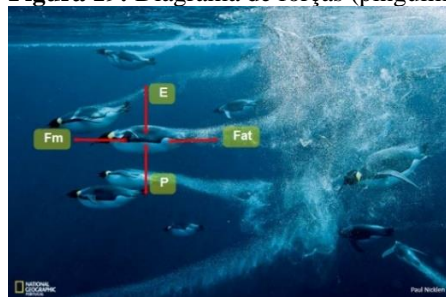
Figura 18: Camada de gordura do Pinguim



Fonte: Emperor Penguin, [s.d.].

O formato de projétil do pinguim otimiza a sua performance na água, pois ao contar com um corpo em formato de cone, com um bico pontudo, otimiza a área de contato com a água à sua frente; o seu corpo e seu formato hidrodinâmico, aliado às penas impermeabilizadas, diminuem a força de atrito sobre ele. A densidade do fluido depende apenas da profundidade (pressão), temperatura e salinidade da água em que se encontra. Sabendo que algumas espécies podem alcançar até 450 m de profundidade e que a cada 10m ganhamos 1 atm de pressão, então teremos 46 atm de pressão a essa profundidade (45 da coluna de água + 1 da coluna de ar). Pela equação de Stevin, podemos relacionar pressão com densidade $\Delta P = \rho \cdot g \cdot \Delta h$, e, assim, calcular a pressão suportada pelo pinguim a essa profundidade. Porém, essa equação não é válida para calcular a densidade, pois na prática a pressão quase não altera o volume da água; a essa profundidade, a densidade da água a 0°C é algo entre 1028 kg/m^3 e 1033 kg/m^3 . O teorema de Stevin implica em diferença de pressão entre alturas de um corpo imerso em um fluido; diferença de pressão gera força, portanto, no eixo vertical temos também o empuxo, que pode ser considerado como a dificuldade de penetração imposta pela água e pode ser calculado como $E = \rho_l \cdot V_{des} \cdot g$. Utilizando a segunda lei de Newton para o pinguim, temos $F_{Result} = m \cdot a \rightarrow -P_y + E_y + F_{m_x} - f_{a_x} = m \cdot a_{xy}$. Como os pinguins são aves, possuem ossos pneumáticos; reduz-se assim a massa e mantém-se o volume.

Figura 19: Diagrama de forças (pinguim)



Fonte: Paul Nicklen (2021c)¹⁸.

¹⁸ Disponível em: <https://mymodernmet.com/paul-nicklen-emperor-penguins/>. Acesso em: 6 ago. 2021.

5 Considerações finais

O desenvolvimento dessa pesquisa teve como objetivo unir áreas do conhecimento com o propósito de apresentar a física de uma maneira mais amigável e despertar maior interesse pelo tema. Embora o objetivo tenha sido alcançado, a pesquisa carece de resultados numéricos, pela dificuldade de obtenção de dados qualitativos. Um fator curioso surgiu durante a elaboração desse estudo: os animais desenvolveram formas extraordinárias de aproveitar a física a seu favor. Tomando como base a evolução, se conclui que a física vem sendo utilizada pelos animais como formas de sobreviver, seja por adaptações, seja por estratégias — como o falcão que aumenta a sua velocidade para obter sucesso nos botes, os chimpanzés que não pisam em galhos finos ou os pinguins que espalham óleo para impermeabilizar o seu corpo. Entender a mecânica de forma intuitiva é uma característica inata dos animais. O forte vínculo entre as ciências demonstra que a natureza é uma só, nós a separamos em áreas do conhecimento para facilitar o seu estudo; portanto, a multidisciplinaridade é essencial para o entendimento de diversos fenômenos.

Na plataforma de pesquisa Google Acadêmico não se encontram resultados com o mesmo objetivo para “física dos animais” ou “biomecânica dos animais” em português; portanto, trabalhos com o objetivo de trazer a física e a biomecânica dos animais para o ensino de física ainda estão sendo desenvolvidos; há espaço a ser explorado em uma continuação deste trabalho.

Referências

ABRANTES, J. **Fundamentos e elementos de análise em biomecânica do movimento humano**. Lisboa: MovLab, 2019. Disponível em: ovlab.ulusofona.pt/wp-content/uploads/sites/202/2020/11/Fundamentos-e-Elementos-de-analise-edicao-2019.pdf. Acesso em: 6 ago. 2021.

AKAGI, R. *et al.* Muscle volume compared to cross-sectional area is more appropriate for evaluating muscle strength in young and elderly individuals. **Age and Ageing**, London, v. 38, n. 5, p. 564-9, Sept. 2009. DOI 10.1093/ageing/afp122.

ANCEL, A. *et al.* New insights into the huddling dynamics of emperor penguins. **Animal Behavior**, [s.l.], v. 110, p. 91-98, Sept. 2015.

ASSIS, A. K. **Arquimedes, o centro de gravidade e a lei da alavanca**. Quebec: Apeiron Montreal, 2008.

BARBOSA, C. M. **Modelação biomecânica do corpo humano**: aplicação na análise da marcha. 2011. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Biomédica) — Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Minho, Guimarães, 2011.

CORRÊA, S. C.; FREIRE, E. S. Biomecânica e educação física escolar. **Revista Mackenzie de Educação Física e Esporte**, São Paulo, v. 3, n. 3, p. 107-123, 2004. Disponível em: https://www.mackenzie.br/fileadmin/OLD/47/Graduacao/CCBS/Cursos/Educacao_Fisica/REMEFE-3-3-2004/art9_edfis3n3.pdf. Acesso em: 6 ago. 2021.

IKAI, M.; FUKUNAGA, T. Calculation of muscle strength per unit cross-sectional area of human muscle by means of ultrasonic measurement. **Internationale Zeitschrift für Angewandte Physiologie, Einschließlich Arbeitsphysiologie**, v. 26, n. 1, p. 26-32, 1968. DOI 10.1007/BF00696087

MACKENZIE, Fred T.; DUXBURY, Alyn C.; BYRNE, Robert Howard. Seawater. *In*: **ENCYCLOPEDIA Britannica**, 5 nov. 2020. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/seawater>. Acesso em: 6 ago. 2021.

MUSCULACAONET. Volume muscular dos principais grupos musculares. **Musculacao.net**, [s.l.], 14 jun. 2019. Disponível em: <https://www.musculacao.net/musculos-grandes-pequenos/>. Acesso em: 6 ago. 2021.

NETO, O. P.; MAGINI, M.; SABA, M. Análise cinemática de um movimento de Kung-Fu: a importância de uma apropriada interpretação física para dados obtidos através de câmeras rápidas. **Rev. Bras. Ensino Fís.**, São Paulo, v. 28, n. 2, jun. 2006.

OKUNO, Emico; FRATIN, Luciano. **Desvendando a física do corpo humano**: biomecânica. Barueri: Manole, 2017.

SELLERS, W. *et al.* Investigating the running abilities of Tyrannosaurus rex using stress-constrained multibody dynamic analysis. **PeerJ**, [s.l.], 18 jul. 2017. DOI <https://doi.org/10.7717/peerj.3420>

VILLARROEL, A.; COSTA, R.; OLIVEIRA, S. Características físico-mecânicas do couro de caprinos mestiços Boer e Anglo Nubianos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 33, n. 6, supl. 3, dez. 2004. DOI <https://doi.org/10.1590/S1516-35982004000900024>