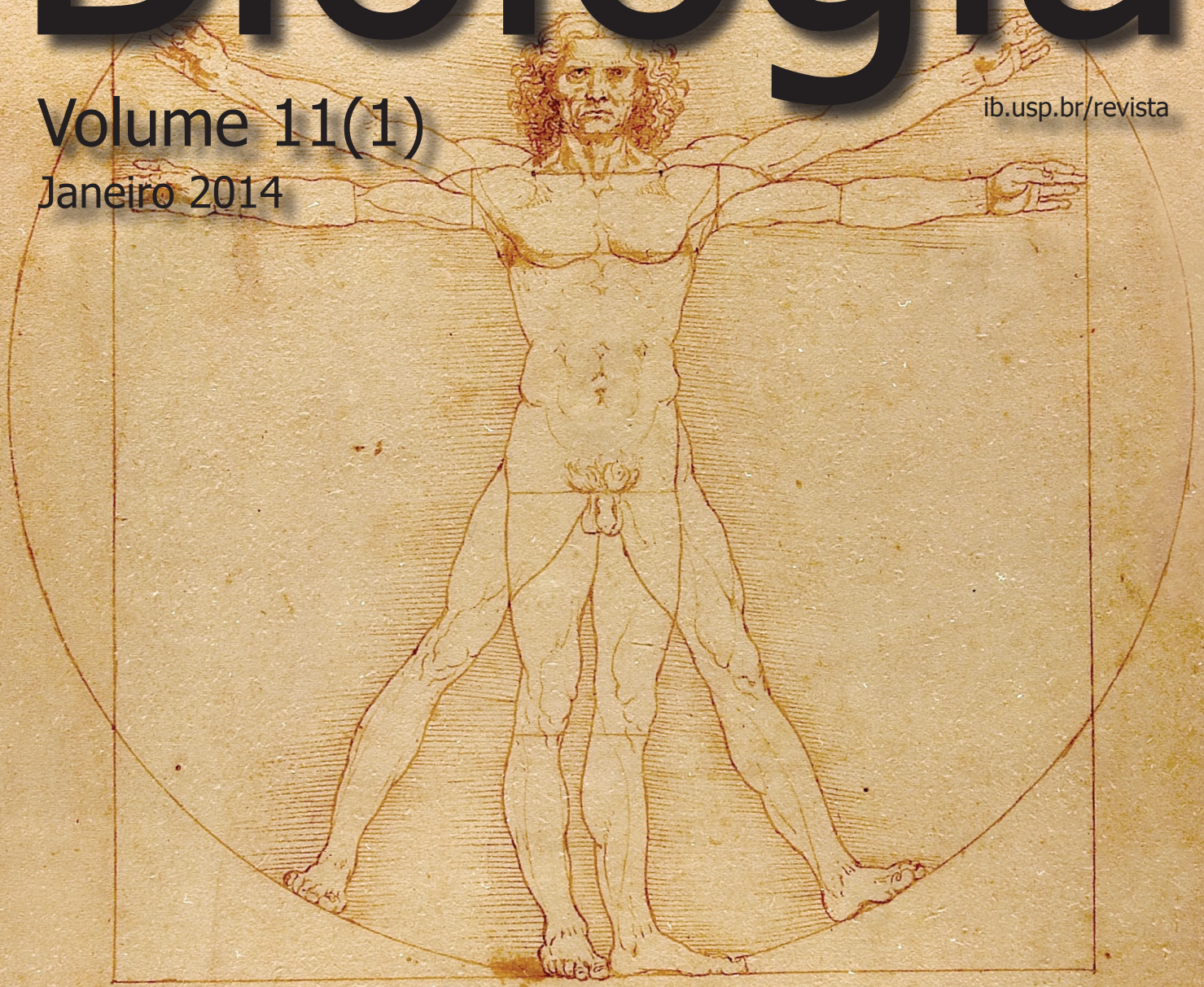


# Revista da Biologia

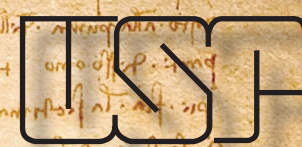
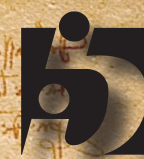
Volume 11(1)

Janeiro 2014

[ib.usp.br/revista](http://ib.usp.br/revista)



Especial Ciências das  
Atividades Físicas



Universidade de São Paulo



## Revista da Biologia

Publica textos de todas as áreas da Biologia, abordando questões gerais (ensaios e revisões) e específicas (artigos experimentais originais, descrição de técnicas e resumos expandidos).

Há espaço também para perspectivas pessoais sobre questões biológicas com relevância social e política (opinião).

A Revista da Biologia é gratuita e exclusivamente on-line. Sua reprodução é permitida para fins não comerciais.

**ISSN1984-5154**

**[www.ib.usp.br/revista](http://www.ib.usp.br/revista)**

## Contato

[revistadabiologia@gmail.com](mailto:revistadabiologia@gmail.com)

### Revista da Biologia

Rua do Matão, trav. 14, 321  
Cidade Universitária, São Paulo  
São Paulo, SP Brasil  
CEP 05508-090

## Volume 11(1)

Publicado em janeiro de 2014

## Expediente

### Editor Executivo

Carlos Rocha

### Coordenadores

Agustín Camacho  
Daniela Soltys  
Pedro Ribeiro  
Rodrigo Pavão

### Editor científico

Otaviano Helene

### Consultores científicos

Otaviano Helene  
Arthur Sérgio Cavalcanti De França  
Lia Queiroz Do Amaral  
Hermany Munguba  
José Guilherme Chaui-Berlinck  
Daniel Almeida Filho  
Robson Scheffer-Teixeira  
José Eduardo P. W. Bicudo  
Natalia Boccardi  
Jorge Alves Audino  
Raquel Castanharo

### Editores gráficos

Juliana Roscito  
Leonardo M. Borges



**Foto da capa:** Homem vitruviano, Leonardo da Vinci

# Editorial

**Otaviano Helene**

*Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil*

Os artigos desta edição da Revista da Biologia têm um tema em comum: as atividades físicas, especialmente as humanas. Como os autores e as autoras dos artigos são de diferentes áreas de conhecimento e também diferentes instituições públicas de ensino superior, este número da revista tem um forte caráter interdisciplinar.

A maior parte desses artigos corresponde a uma série de seminários apresentados durante o ano de 2011, no Instituto de Física da USP. Essa série de seminários foi organizada com o objetivo de oferecer um tema comum – as atividades físicas – que permitisse o contato entre profissionais e estudantes de diferentes áreas do conhecimento, criando um ambiente capaz de promover e incentivar trabalhos interdisciplinares.

Os artigos tratam de temas como a composição das fibras musculares em atletas que se dedicam a diferentes atividades esportivas, os mecanismos físicos mais importantes nas corridas curtas e nos saltos em altura e distância, o papel do atrito e da resistência dos pelos dos primatas na origem do bipedalismo em humanos, a evolução do entendimento da demanda metabólica na locomoção, a função das ações excêntricas e concêntricas no ganho de massa muscular e, finalmente, como a imaginação pode contribuir para o desempenho de atividades esportivas.

Esperamos que a publicação dos artigos neste número da Revista da Biologia contribua para incentivar a interdisciplinaridade, complementando, assim, o desejo dos organizadores e participantes daquela série de seminários.

Esta publicação só foi possível graças ao esforço da coordenação da Revista da Biologia e à colaboração dos autores e das autoras, que sempre responderam às demandas necessárias para a preparação da revista.

# Volume 11(1)

## Índice

<b>Atividade Física e Plasticidade da Musculatura Esquelética</b>	<b>1</b>
Physical Activity and Plasticity of the Skeletal Musculature <i>José Eduardo P. W. Bicudo</i>	
<b>Uma breve análise da física da corrida de 100 metros rasos</b>	<b>8</b>
A brief analysis on the physics of the 100-meter sprint <i>M. T. Yamashita</i>	
<b>Alguma física dos saltos em altura e distância</b>	<b>12</b>
Some physics of the high and long jump <i>Otaviano Helene</i>	
<b>Bipedalismo: solução para carregar crias, correlacionada com a redução de pelos</b>	<b>19</b>
Bipedality: solution for infant carrying, correlated with reduction of body hair <i>Lia Q. Amaral</i>	
<b>Locomoção terrestre e demanda metabólica: uma revisão histórica</b>	<b>28</b>
Terrestrial locomotion and metabolic demand: a historical review <i>José Guilherme Chaui-Berlinck</i>	
<b>Papel das ações musculares excêntricas nos ganhos de força e de massa muscular</b>	<b>38</b>
The role of eccentric muscle actions in the increase of strength and muscle mass <i>Valmor Tricoli</i>	
<b>Cognição e Esporte</b>	<b>43</b>
Sport and Cognition <i>Lilian Negrão de Oliveira Silva, Marina Faveri de Oliveira e André Frazão Helene</i>	



# Atividade Física e Plasticidade da Musculatura Esquelética

## Physical Activity and Plasticity of the Skeletal Musculature

**José Eduardo P. W. Bicudo**

*Departamento de Fisiologia, Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, Brasil*

Contato do autor: jebicudo@usp.br

**Resumo.** A musculatura esquelética do ser humano contemporâneo, responsável por grande parte de suas atividades locomotoras, apresenta um desenho estrutural e um mecanismo básico comum resultante de um longo processo evolutivo. Entretanto, o tipo de atividade física realizada pode alterar esse padrão estrutural e funcional. Atletas que realizam treinamentos específicos de velocidade, força e resistência expressam fenótipos diferentes. Isto é, atletas que realizam provas esportivas de velocidade e força, como a prova dos 100 metros rasos e o arremesso de peso, respectivamente, apresentam predomínio de fibras de contração rápida, cujo metabolismo não depende do oxigênio (via glicolítica), enquanto atletas que realizam provas de longa duração (resistência), como a maratona, apresentam predomínio de fibras de contração lenta e dependentes do oxigênio (via oxidativa). Essas diferentes expressões da musculatura esquelética são conhecidas como plasticidade fenotípica, a qual ocorre tanto dentro de uma mesma espécie assim como, de modo mais amplo, entre espécies diferentes.

**Palavras-chave.** *Fibras musculares; Força; Plasticidade fenotípica; Resistência; Vias metabólicas.*

Recebido 22mar12

Aceito 20fev13

Publicado 15jan14

**Abstract.** The vertebrate skeletal musculature of contemporary humans, responsible for most of their locomotor activity, expresses a common basic structure and mechanism, which resulted from a long evolutionary process. However, the type of physical activity performed may alter these structural and functional patterns. Athletes engaged in different types of training such as velocity, force and endurance express different phenotypes. Athletes engaged in velocity and force sport modalities, like the 100 meters sprint and the shot put, respectively, show predominantly fast twitching muscle fibers, which function in the absence of oxygen (glycolytic pathway), whereas athletes engaging in long term (endurance) modalities, like the marathon, show predominantly slow twitching muscle fibers whose function depends on oxygen (oxidative pathway). These different muscle fiber expressions are known as phenotypic plasticity, which occurs both within the same species as well as among different species.

**Keywords.** *Endurance; Force; Metabolic pathways; Muscle fibers; Phenotypic plasticity.*

### Introdução

Neste artigo, discutiremos alguns aspectos que envolvem a atividade física em seres humanos, tendo como pano de fundo aquilo que se conhece, hoje, sobre a estrutura geral da musculatura esquelética e o seu funcionamento no nível celular, integrando-os com outros níveis de organização biológica. Além disso, discutiremos aspectos evolutivos relacionados com a atividade física em seres humanos, fazendo comparações com outros grupos animais, e algo que certamente tem intrigado não só os investigadores, como também os interessados no desempenho humano nas mais diversas modalidades esportivas, isto é, até que ponto uma determinada modalidade de atividade física é capaz de alterar o padrão de expressão de fibras musculares específicas (Figura 1). Esta questão tem sido objeto de recentes investigações científicas, que demonstram que a musculatura esquelética, sob determinadas condições, apresenta um elevado grau de plasticidade.

### Estrutura e Funcionamento da Musculatura Esquelética

As células que compõem o sistema muscular daqueles organismos que as possuem, as quais são responsáveis pela sua locomoção, resultaram de um longo processo evolutivo, culminando com o que hoje denominamos de musculatura esquelética, como é o caso dos seres humanos, por exemplo.

A musculatura esquelética é formada por células (ou fibras musculares) especializadas, cuja característica principal é a capacidade de se contrair ou relaxar. Tal condição é possível devido à existência, no interior dessas células, de proteínas especiais (actina e miosina), as quais são capazes de se acoplar e que, sob determinadas condições no interior das células musculares, deslizam uma sobre a outra, em sentidos opostos, resultando no encurtamento ou no relaxamento dessas células.

No processo de encurtamento da fibra muscular



Figura 1. Atletas que se dedicam a diferentes modalidades esportivas, resistência ou força, respectivamente, apresentam características físicas diferentes. Os primeiros, voltados para atividades que dependem da manutenção de potência elevada durante um longo período de tempo, são em geral, menos robustos e mais leves, enquanto os segundos, são mais robustos e mais pesados, já que realizam atividades que envolvem geração de força máxima em um curto período de tempo.

ocorre geração de força (tensão muscular), permitindo, portanto, que haja movimento. Para que essa força possa ser gerada, energia tem que fluir pelo sistema muscular. Nesse caso, a célula muscular disponibiliza moléculas de trifosfato de adenosina (ATP), cuja hidrólise (quebra) permite que energia (química) seja liberada, para geração de força (tensão). Na verdade, esse processo, no qual ATP é disponibilizado, ocorre em todas as células dos organismos. A diferença é que no caso da fibra muscular, há uma especialização por parte desta para a geração de força.

A estrutura geral da unidade de contração (ou relaxamento) da fibra muscular, denominada sarcômero, pode ser vista na Figura 2.

Em linhas gerais, a contração muscular ocorre quando um impulso nervoso é deflagrado, a partir de um estímulo externo, por exemplo. O impulso nervoso chega à fibra muscular, alterando a permeabilidade das membranas celulares, inclusive a permeabilidade de um sistema de cisternas existente na fibra muscular, denominado retículo sarcoplasmático, onde cálcio é armazenado. Cálcio é liberado para o citosol (matriz fluida que preenche o interior da fibra muscular), desencadeando uma série de reações químicas. Conforme o tipo de atividade física, seja de força ou de resistência, tais reações culminam, respectivamente, com a utilização de moléculas de ATP, e/ou fosfágenos (ver mais adiante no texto), disponíveis no citosol, ou na produção de ATP pelas mitocôndrias (organelas ce-

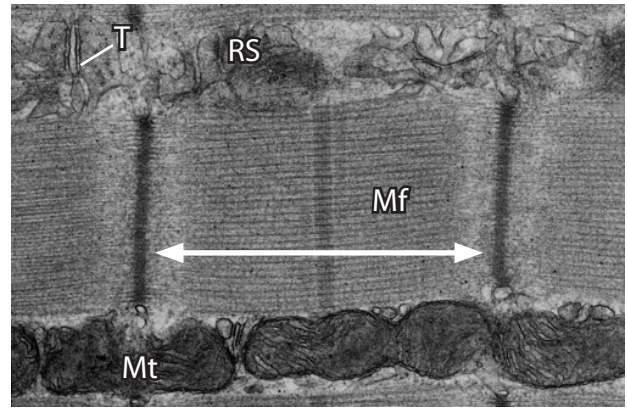


Figura 2. Micrografia eletrônica de transmissão de uma seção longitudinal de uma célula (fibra) muscular esquelética, mostrando um sarcômero (seta), o qual, na musculatura esquelética, encontra-se organizado em série. Ver detalhes no texto. (Micrografia eletrônica: cortesia de E. R. Weibel, Universidade de Berna, Suíça). Mf - Miofibrila; Mt - Mitocôndria; RS - Retículo Sarcoplasmático; T - túbulos T.

lulares especializadas na produção deste composto). Uma vez que o ATP esteja disponível no citosol, ocorre o acoplamento das proteínas actina e miosina (complexo acto-miosina; miofibrilas), resultando na geração de força e no encurtamento da fibra muscular. Quando o suprimento de ATP acaba, a fibra muscular não é mais capaz de gerar força. Cálcio é então seqüestrado pelo retículo sarcoplasmático, e lá permanece até que um novo impulso nervoso chegue à fibra muscular, quando então o ciclo recomeça. Para maiores detalhes sobre este tópico, consultar os livros de autoria de Huxley (1980) e Alberts et al. (1994), respectivamente.

### Aspectos Evolutivos

Os hominídeos, de acordo com vários estudos realizados por paleontólogos, antropólogos, biólogos, ecólogos, fisiologistas e anatomistas, evoluíram a partir de um primata ancestral arborícola, que vivia nas florestas africanas e que se alimentava fundamentalmente de folhas, frutos e sementes, há aproximadamente 6 milhões de anos atrás. De um modo simplificado, pressões de seleção, competição entre os indivíduos e mudanças climáticas, no entanto, fizeram com que um subgrupo desses indivíduos “descesse” das árvores e começasse a explorar as planícies africanas, onde uma grande variedade de herbívoros se oferecia como potencial fonte de alimento. A vida na planície não era fácil, no entanto. A existência de predadores ferozes tornava a competição ainda mais acirrada. Refugiar-se em árvores isoladas ou se esconder não eram boas alternativas (Heinrich, 2001). Além de uma boa acuidade visual e a evolução de glândulas sudoríparas (Jablonski, 2010) nos hominídeos, as quais fornecem um sistema muito eficiente de refrigeração do corpo, importante quando da realização de atividades físicas prolongadas, a resistência física apresentada pelos nossos ancestrais parece ter contribuído para sua sobrevivência nesse cenário inóspito. Assim, para os nossos ancestrais primatas, correr atrás de presas por um longo período de tempo tornou-se



uma estratégia bem sucedida em busca de alimento. Os primeiros hominídeos bípedes não eram particularmente bons corredores, mas o comportamento social solidário compensava tal condição (Heinrich, 2001). Nas planícies africanas, mesmo predadores solitários se tornaram sociáveis para caçar. Os leões, em contraste com os outros felinos, constituem um excelente exemplo disso. A condição bípede nos hominídeos, embora do ponto de vista energético, seja mais custosa do que a condição quadrúpede (Bramble e Lieberman, 2004), permitiu, por exemplo, a liberação dos braços e mãos para outras tarefas importantes para a sua sobrevivência e sucesso. Entre estas, podemos mencionar a associação entre a condição bípede e a liberação dos membros superiores para carregar filhotes, observada em primatas, tópico extremamente importante também tratado no artigo “Bipedalismo: solução para carregar crianças, correlacionada com a redução de pelos”, neste volume.

Embora não tenha sido, até os dias de hoje, objeto de estudos sistemáticos em outras espécies de mamíferos, a corrida de resistência e de longas distâncias parece ser uma característica particular do ser humano (entre os primatas) e incomum entre os mamíferos quadrúpedes e outros carnívoros sociais, como cachorros e hienas (Bramble e Lieberman, 2004). Os nossos ancestrais eram, portanto, capazes de correr atrás de suas presas até cansá-las para daí, então, atacá-las. Não surpreende, portanto,

que o homem seja capaz de correr 42 km, a distância da maratona, sem parar. Guardamos até hoje essa habilidade dos nossos ancestrais (Lieberman e Bramble, 2007). Ao longo do tempo, fibras musculares específicas, que permitem contrações lentas e que conferem grande resistência durante a atividade física foram selecionadas, no homem. A porcentagem elevada de fibras musculares de contração lenta necessárias para corridas de resistência no ser humano parece ter-se originado a partir de uma nova mutação nula do gene ACTN3 (Yang et al., 2003). Especula-se que as diferenças encontradas nos diferentes grupos étnicos, alguns com indivíduos preferencialmente propensos a um melhor desempenho em provas de longa distância como a maratona e outros cujos indivíduos apresentam preferencialmente melhor desempenho em provas de velocidade e de curta duração como os 100 metros rasos, podem estar vinculadas a possíveis variações genéticas. A identificação dos genes (se é que eles existem) que determinam o sucesso em uma ou outra modalidade poderá estabelecer futuramente quais são os atributos fisiológicos e bioquímicos subjacentes.

### Tipos de Atividade Física e Tipos de Fibras Musculares

As fibras musculares não são capazes apenas de conferir resistência física ao indivíduo, mas também força.

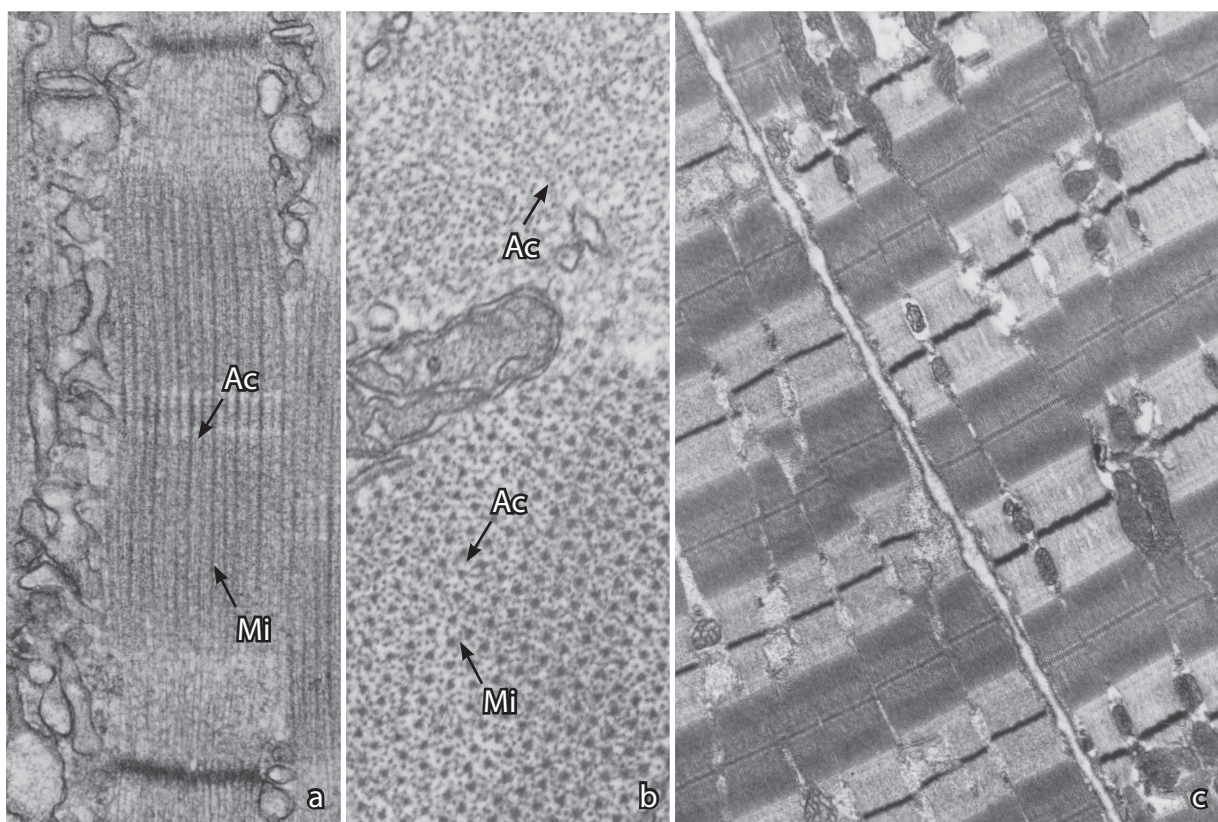


Figura 3. Micrografias eletrônicas de transmissão de uma secção longitudinal (a) e transversal (b) de uma célula (fibra) muscular esquelética, mostrando um sarcômero, no qual se observam os miofilamentos de miosina, filamentos mais eletrodensos (Mi), e de actina, filamentos menos eletrodensos (Ac). As fibras musculares de contração lenta expressam a isoforma de miosina do tipo I e as fibras de contração rápida expressam a isoforma do tipo IIa ou IIb. (c) Micrografia eletrônica de transmissão de uma secção longitudinal de uma célula (fibra) muscular, em aumento menor, mostrando a organização em série dos sarcômeros. Ver detalhes no texto. (Micrografias eletrônicas: cortesia de E. R. Weibel, Universidade de Berna, Suíça).

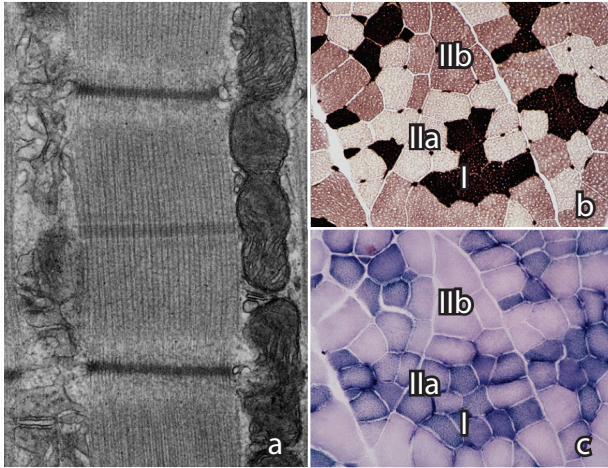


Figura 4. (a) Micrografia eletrônica de transmissão de uma secção longitudinal de uma célula (fibra) muscular, mostrando um sarcômero. Em (b) e (c) temos uma secção transversal de um músculo esquelético (microscopia de luz) para mostrar que quando a preparação é tratada com um corante marcador específico do metabolismo oxidativo (b) ou do metabolismo glicolítico (c) observa-se colorações de intensidades diferentes, associadas às diferentes fontes de energia, oxidativa ou glicolítica, junto aos diferentes tipos de fibras (I, IIa e IIb). Ver detalhes no texto. (Micrografias: cortesia de E. R. Weibel, Universidade de Berna, Suíça).

Várias tarefas que executamos dependem de força física, e várias modalidades esportivas estão voltadas para a realização de força muscular. Dentro desse contexto, exploraremos a seguir a importância de diferentes fibras musculares para a realização de atividades físicas de diferentes naturezas, como aquelas que envolvem resistência e força muscular, respectivamente.

Existem, de modo geral, três tipos diferentes de fibras musculares esqueléticas. Fibras de contração lenta, fibras mistas e fibras de contração rápida. As primeiras (fibras do tipo I) estão frequentemente associadas a atividades de resistência e de longa duração, como a maratona, por exemplo, a qual depende de um suprimento elevado e constante de oxigênio proveniente do meio externo para suprir a demanda de energia. As segundas são consideradas fibras de contração rápida (fibras do tipo IIa), porém as reações químicas responsáveis pelo fornecimento de energia (ATP) para essas fibras são de origens diferentes, tanto aquelas dependentes do oxigênio como as não dependentes desta substância; daí a denominação “mista”. Num indivíduo que realiza atividade física moderada, porém não é um atleta, o que se observa é a predominância de fibras do tipo IIa. As terceiras (fibras do tipo IIb) encontram-se associadas, em geral, a atividades de força e de curta duração, como, por exemplo, o arremesso de peso ou a corrida de 100 metros rasos, atividades estas que dependem da energia já disponível nas fibras musculares (Figuras 3 e 4).

Tanto do ponto de vista morfológico como funcional essas fibras são diferentes entre si, embora guardem a estrutura básica de uma fibra muscular esquelética, descrita anteriormente.

### Por que essas fibras são diferentes entre si e por que se comportam de modos diversos?

Do ponto de vista morfológico, essas fibras musculares são diferentes entre si porque as moléculas de miosina que as compõem são diferentes (denominadas isoformas de miosina de cadeia pesada; Figuras 3 e 4), assim como a quantidade de células que as contêm varia em função do tipo de trabalho realizado pelo músculo esquelético. Do ponto de vista funcional, as vias metabólicas responsáveis pelo fornecimento de energia para a geração de potência (energia por unidade de tempo) nos diferentes tipos de células musculares são também diferentes.

No caso do arremesso de peso, por exemplo, cuja prova dura em torno de 5 segundos, moléculas de ATP e de fosfato de creatina, que já se encontram disponíveis no interior da célula muscular, sofrem hidrólise e fornecem de modo imediato energia para a realização da atividade física. O que se observa na musculatura dos braços e das pernas do arremessador de peso é uma predominância de fibras do tipo IIb. Por outro lado, em corredores da prova de 100 metros rasos, que dura ao redor de 10 segundos, ou nadadores da prova de 50 metros (por volta de 50 segundos), como exemplos, os músculos das pernas dos atletas que se dedicam a essas atividades também apresentam predominância de fibras do tipo IIb. Entretanto, nesses casos, além da hidrólise de ATP e de fosfato de creatina já disponíveis de modo imediato na célula muscular para a realização de trabalho, ocorre também a hidrólise “anae-

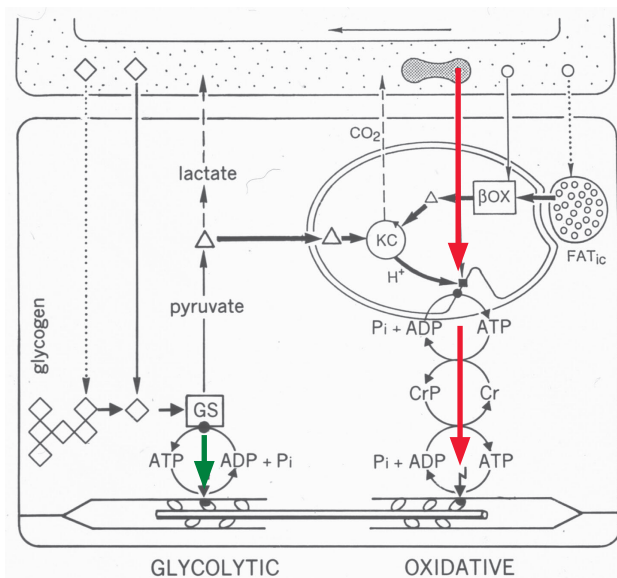


Figura 5. Representação esquemática de uma célula muscular mostrando as diferentes vias metabólicas responsáveis pela formação de moléculas de ATP. A via glicolítica (seta verde), associada à geração de potência nas atividades de força e velocidade, e a via oxidativa (setas vermelhas), dependente do oxigênio transportado pela corrente sanguínea, associada à geração de potência nas atividades de resistência.  $\beta$ OX (beta-oxidação), KC (ciclo de Krebs), GS (glicose sintase, uma fosfotransferase), Cr (creatina), CrP (fosfato de creatina), ADP (bifosfato de adenosina), ATP (trifosfato de adenosina), Pi (fósforo inorgânico). Ver detalhes no texto.



róbia” da glicose, permitindo desse modo o rápido fornecimento de energia para a realização de trabalho, já que essas atividades possuem um tempo de duração maior que aquele da prova de arremesso de peso. É importante ressaltar, no entanto, que em todas essas situações o oxigênio proveniente do ar atmosférico chega até as células musculares desses atletas, mas o tempo de duração dessas formas de atividade é muito curto para que as reações químicas responsáveis pelo fornecimento de energia, dependentes de oxigênio, possam ter efeito. Assim, é comum referir-se a essas atividades físicas como “anaeróbias”, isto é, não dependentes do oxigênio (Figura 5).

O indivíduo para realizar atividades físicas em geral necessita armazenar substrato energético em suas células. O glicogênio, principal polissacarídeo animal, é usualmente armazenado nas células do fígado e nas células musculares. A quebra deste polissacarídeo fornece moléculas de glicose, as quais se tornam disponíveis para o metabolismo celular. No caso das atividades “anaeróbias” de curta duração ou de força, mencionadas acima, a quebra de uma molécula de glicose gera apenas duas moléculas de ATP. Neste processo, lactato é gerado como produto final das reações químicas e a via metabólica responsável é denominada “via glicolítica”. No caso de atividades físicas de resistência e de longa duração, como a maratona (ou provas longas de ciclismo), o constante suprimento de oxigênio é fundamental para que a atividade possa ser realizada com sucesso. Durante tal atividade, o glicogênio também é quebrado, fornecendo moléculas de glicose, as quais, no entanto, entrarão agora em uma via metabólica (ciclo de Krebs) que permitirá a sua “oxidação” completa, gerando, nesse caso, 36 moléculas de ATP. Ou seja, 18 vezes mais que na via anaeróbia. Os produtos finais da oxidação completa de glicose são gás carbônico e água, e a

via metabólica responsável é denominada “via oxidativa” (Figura 5).

Portanto, as vias metabólicas responsáveis pelo fornecimento de energia nos diferentes tipos de fibra muscular são diferentes, disponibilizando quantidades de ATP substancialmente diferentes, embora o substrato energético seja essencialmente o mesmo, isto é, glicose (Figura 5).

As fibras musculares dependentes de oxigênio (tipo I) possuem coloração vermelha intensa, pois contêm um pigmento respiratório, a mioglobina, que se liga às moléculas de oxigênio, provenientes do interior dos capilares sanguíneos que irrigam os músculos esqueléticos. A mioglobina funciona como um facilitador do transporte de oxigênio dentro da fibra muscular. Uma vez dentro da fibra muscular, o oxigênio se difunde até penetrar as mitocôndrias, onde ocorre a fosforilação oxidativa, uma série de reações em cadeia, na qual o oxigênio atua como aceptor final de elétrons. Como mencionado anteriormente, os produtos finais dessa série de reações em cadeia é a formação de gás carbônico e água.

Nas fibras do tipo IIb não se observa a coloração vermelha intensa. Essas fibras são desprovidas de mioglobina e como não dependem de um fluxo contínuo e prolongado de oxigênio, o número de mitocôndrias é bem menor do que aquele encontrado nas fibras do tipo I. Do mesmo modo, a vascularização sanguínea da musculatura esquelética que contém fibras do tipo IIb é bem menor que naquelas que contêm fibras do tipo I.

Para um apanhado ainda mais detalhado deste tópico, sugiro consultar o livro intitulado “Lore of running”, um clássico de autoria de Tim Noakes (2001).

### Diferentes tipos de treinamento podem resultar em diferentes tipos de fibras musculares?

Estudos (Hoppeler et al., 1973; Hoppeler et al., 1985; Howald et al., 1985) demonstram que o treinamento de atletas em diferentes modalidades esportivas pode levar à predominância de um tipo de fibra muscular sobre outra. Maratonistas ou ciclistas, que realizam provas de resistência, apresentam músculos esqueléticos envolvidos nas respectivas modalidades com predominância significativa de fibras do tipo I. Já velocistas (corredores e nadadores de curtas distâncias) ou arremessadores de peso apresentam predominância de fibras do tipo IIb (Figura 6).

Estudos (Hoppeler et al., 1973; Howald et al., 1985) conduzidos com indivíduos que começam a realizar um determinado tipo de treinamento mostram que, logo no início, os indivíduos apresentam fibras mistas (tipo IIa). À medida que o treinamento avança no tempo, naqueles indivíduos que optaram por modalidades de resistência, o número de fibras do tipo I aumenta consideravelmente em relação ao número dos outros tipos de fibras. Neste caso, aumentam, também, o número de mitocôndrias e o número de capilares sanguíneos que irrigam a musculatura esquelética envolvida na modalidade. No caso de indivíduos que optaram por modalidades de força, o que se observa é um aumento considerável das fibras do tipo IIb (Figura 7), sem aumento significativo do número de

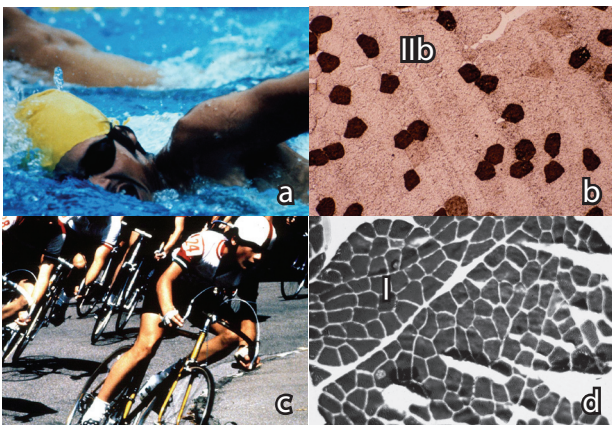


Figura 6. Atletas de alto desempenho, como nadadores e ciclistas, em razão dos treinamentos específicos a que são submetidos ajustam a composição de suas fibras musculares (plasticidade fenotípica). Nos atletas da prova de 50 m de nado livre (a) (velocidade e força) as fibras musculares associadas à modalidade são na maior parte (70%; coloração clara) do tipo IIb (b). Nos ciclistas que realizam provas de longa distância (resistência), como no “Tour de France” (c), ocorre predominância de fibras do tipo I (90%; coloração escura) na musculatura associada à atividade (d). As amostras da musculatura dos atletas são obtidas por meio de biópsias. Ver detalhes no texto. (Micrografias: cortesia de E. R. Weibel, Universidade de Berna, Suíça).

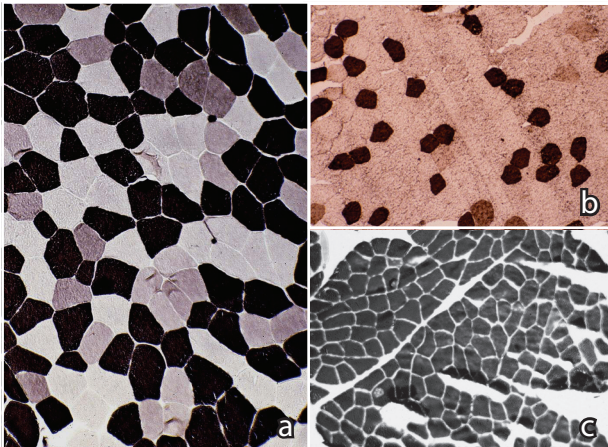


Figura 7. O painel (a) mostra uma secção transversal de um músculo esquelético de um indivíduo, sem treinamento específico, marcada com corante específico, na qual se observa uma distribuição homogênea das fibras do tipo I e tipo II. O painel (b) mostra uma secção transversal (microscopia de luz) de um músculo esquelético de um atleta de provas de velocidade, com predominância de fibras do tipo IIb (rápida-glicolítica). O painel (c) mostra uma secção transversal (microscopia de luz) de um músculo esquelético de um atleta de provas de resistência, com predominância de fibras do tipo I (lenta-oxidativa). Treinamentos específicos induzem ajustes específicos da composição das fibras musculares em atletas (plasticidade fenotípica). Ver detalhes no texto. (Micrografias: cortesia de E. R. Weibel, Universidade de Berna, Suíça).

mitocôndrias e de capilares sanguíneos.

Tais estudos revelam que a musculatura esquelética possui um elevado grau de plasticidade, dependendo do tipo de atividade física realizada pelo indivíduo. Tal condição é conhecida como “plasticidade fenotípica” e esta pode ser definida como a capacidade de modificações entre organismos geneticamente uniformes em resposta a diferentes condições ambientais (Piersma e van Gils, 2010). Isso se confirma em observações realizadas a partir de gêmeos monozigóticos, os quais possuem genótipo idêntico, porém, dependendo da modalidade esportiva escolhida por um e outro, de resistência ou de força, a expressão do genótipo, portanto, o fenótipo, pode ser bastante diferente (Figura 8).

### A tipificação de fibras musculares ocorre também na natureza?

Pode-se afirmar que sim. Mamíferos (Hoppeler et al., 1987; Hoppeler e Weibel, 1998; Weibel, 2000) como as gazelas, por exemplo, que fogem de seus predadores, são exímios corredores de resistência, apresentando predominância de fibras do tipo I, elevado número de mitocôndrias e extensa rede de capilares (Kayar et al., 1994). Já animais de tração, como o boi, por exemplo, apresentam fibras musculares típicas daqueles que realizam força, ou seja, predominância de fibras do tipo IIb (Kayar et al., 1994). O guepardo, considerado o maior velocista dentre os mamíferos, também possui predominância de fibras do tipo IIb (Heinrich, 2001). No grupo das aves, naquelas

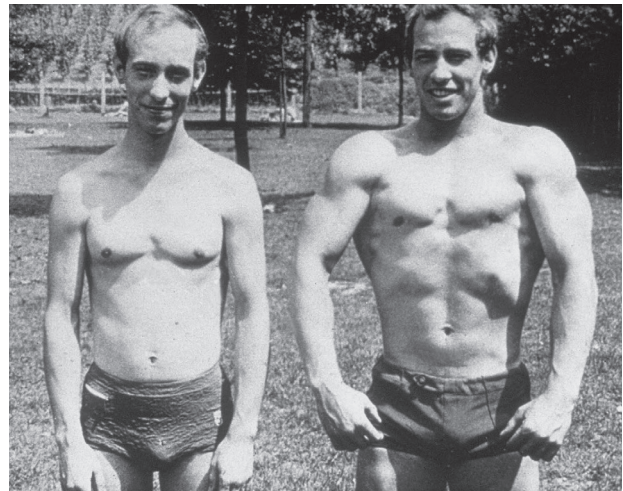


Figura 8. Gêmeos monozigóticos possuem genótipos idênticos, porém podem apresentar fenótipos deferentes (plasticidade) dependendo do treinamento específico a que são submetidos. O indivíduo menos robusto (esq.; Otto) é um corredor de maratona e apresenta predominância de fibras do tipo I (lenta-oxidativa) e o indivíduo mais robusto (dir.; Ewald) é um levantador de peso e apresenta predominância de fibras do tipo II (rápida-glicolítica). Ver detalhes no texto. (Foto: Josef Keul, Freiburg, Alemanha, 1969).

que não voam, como a avestruz, a galinha e outras, num mesmo indivíduo há uma clara e evidente tipificação das fibras musculares, ocorrendo uma predominância de fibras do tipo I, de coloração vermelha, na musculatura das pernas e do tipo IIb, mais claras, pois são desprovidas de mioglobina, nos músculos peitorais, os quais, por sua vez, nessas aves, são responsáveis por rápidos surtos “anaeróbios”, ao contrário daquilo que acontece nas aves que voam, nas quais os músculos peitorais são ricos em fibras do tipo I, responsáveis pela manutenção dos vôos de longa duração, para cobrir longas distâncias, como nos vôos migratórios. O pingüim, embora seja aquático, também possui músculos peitorais com predominância de fibras do tipo I, responsáveis pelo alto desempenho dessa ave no meio aquático, onde percorre longas distâncias utilizando suas “asas” como nadadeiras extremamente eficazes. Variações como essas, observadas na natureza, são conhecidas como “variações adaptativas”. Para maiores detalhes sobre as adaptações que ocorrem em aves, sugiro consultar o livro “Ecological and environmental physiology of birds” (Bicudo et al., 2010).

### Conclusões

Os estudos realizados nas últimas décadas, aliando estrutura e função, têm evidenciado de maneira muito clara a associação entre modalidade de atividade física e tipo de fibra muscular. Esses estudos também têm mostrado que o treinamento físico em modalidades esportivas específicas pode induzir a expressão preferencial de determinado tipo de fibra muscular, corroborando a hipótese da existência de plasticidade fenotípica na musculatura esquelética de mamíferos, inclusive na do homem. A predisposição genética de componentes de grupos étnicos para a realiza-



ção bem sucedida de determinada modalidade esportiva é menos clara e estudos que possam demonstrar de forma inequívoca uma relação de causa e efeito entre um e outro ainda não foram realizados.

## Agradecimentos

Ao Prof. Otaviano Helene pela organização do conjunto de apresentações e discussões que resultaram na confecção deste volume da Revista da Biologia.

## Referências

- Alberts B, Bray D, Lewis J, Raff M, Roberts K, Watson JD. 1994. *Molecular biology of the cell*. New York: Garland.
- Bicudo JEPW, Buttemer WA, Chappell MA, Bech C, Pearson JT. 2010. *Ecological and environmental physiology of birds*. Oxford: Oxford University Press.
- Bramble MD, Lieberman DE. 2004. Endurance running and the evolution of Homo. *Nature* 432:345-352.
- Heinrich B. 2001. *Why we run*. New York: HarperCollins.
- Hoppeler H, Howald H, Conley KE, Lindstedt SL, Claassen H, Vock P, Weibel ER. 1985. Endurance training in humans: aerobic capacity and structure of skeletal muscle. *Journal of Applied Physiology* 59:320-327.
- Hoppeler H, Kayar SR, Claassen H, Uhlmann E, Karas RH. 1987. Adaptive variation in the mammalian respiratory system in relation to energetic demand. III. Skeletal muscles: setting the demand for oxygen. *Respiration Physiology* 69: 27-46.
- Hoppeler H, Lüthi P, Claassen H, Weibel ER, Howald H. 1973. The ultrastructure of the normal human skeletal muscle. A morphometric analysis on untrained men, women, and well-trained orienteers. *Pfluegers Archives* 344:217-232.
- Hoppeler H, Weibel ER. 1998. Limits for oxygen and substrate transport in mammals. *Journal of Experimental Biology* 201:1051-1064.
- Howald H, Hoppeler H, Claassen H, Mathieu O, Straub R. 1985. Influence of endurance training on the ultrastructural composition of the different muscle fiber types in humans. *Pfluegers Archives* 403:369-376.
- Huxley AF. 1980. *Reflections on muscle*. Liverpool: Liverpool University Press.
- Jablonski NG. 2010. The naked truth. *Scientific American* 302(2):28-35.
- Kayar SR, Hoppeler H, Jones JH, Longworth KE, Armstrong RB, Laughlin MH, Lindstedt SL, Bicudo JEPW, Groebe K, Taylor CR, Weibel ER. 1994. Capillary blood transit time in relation to body size and aerobic capacity. *Journal of Experimental Biology* 194:69-81.
- Lieberman DE, Bramble MD. 2007. The evolution of marathon running: capabilities in humans. *Sports Medicine* 37:288-290.
- Noakes T. 2001. *Lore of running*. Oxford: Oxford University Press.
- Piersma T, van Gils JA. 2010. *The flexible phenotype*. Oxford: Oxford University Press.
- Weibel ER. 2000. *Symmorphosis. On form and function in shaping life*. Cambridge: Harvard University Press.
- Yang N, MacArthur DG, Gulbin JP, Hahn AG, Beggs AH, Eastale S, North K. 2003. ACTN3 genotype is associated with human elite athletic performance. *American Journal of Human Genetics*. 73:627-631.

# Uma breve análise da física da corrida de 100 metros rasos

A brief analysis on the physics of the 100-meter sprint

**M. T. Yamashita**

Instituto de Física Teórica, Unesp - Universidade Estadual Paulista, CP 70532-2, CEP 01156-970, São Paulo, SP, Brasil

Contato do autor: yamashita@ift.unesp.br

**Resumo.** Neste artigo, nós analisamos o desempenho do atleta jamaicano Usain Bolt nas provas de 100 m rasos das Olimpíadas de Pequim (2008) e do Campeonato Mundial de Atletismo em Berlim (2009). Através de uma função que ajusta a velocidade ao longo do tempo, nós calculamos diversas grandezas físicas como a força máxima, a potência máxima e a energia mecânica total produzidas pelo atleta em ambas as corridas. Utilizando o nosso modelo simplificado podemos dizer que, embora o tempo em Berlim tenha sido menor, o desempenho atlético de Usain Bolt, medido em termos da potência e da energia mecânica, foi melhor em Pequim.

**Palavras-chave.** *Fibras musculares; Força; Plasticidade fenotípica; Resistência; Vias metabólicas.*

**Abstract.** In this article we analyze the performance of the Jamaican athlete Usain Bolt in the 100 m sprint at the Summer Olympics in Beijing (2008) and World Championships in Athletics in Berlin (2009). We fitted a function for the velocity and calculated several physical quantities, such as the maximum force, the maximum power, and the total mechanical energy produced by the athlete in both races. By using our simplified model we can say that, despite the smaller time in Berlin, the performance of Usain Bolt, measured in terms of the power and mechanical energy, was better in Beijing.

**Keywords.** *Endurance; Force; Metabolic pathways; Muscle fibers; Phenotypic plasticity.*

Recebido 22mar12

Aceito 23dez12

Publicado 15jan14

## Introdução

Lendo o título deste trabalho talvez você tenha sentido falta da palavra “educação” antes de “física”. Não. Não se trata de um esquecimento; trata-se de Física mesmo, não de Educação Física. O que faremos aqui é analisar a força, a potência e a energia envolvidas em uma corrida de alto desempenho de 100 metros rasos utilizando um ponto de vista típico dos físicos. Físicos geralmente identificam os aspectos mais relevantes de um determinado problema e utilizam, posteriormente, várias simplificações e aproximações. Faz-se necessária a justificativa, pois a análise de qualquer movimento, por mais simples que ele seja, pode se tornar tão complicada quanto se queira sem, no entanto, melhorar substancialmente a qualidade da análise.

Quando mencionamos uma corrida de alto desempenho no primeiro parágrafo, nós fomos, na verdade, muito modestos, pois nos referimos à análise específica da corrida do famoso velocista jamaicano (e homem mais rápido do mundo), Usain Bolt. Este incrível atleta é o atual recordista mundial da prova de 100 metros rasos com um tempo de 9,58 s.

A evolução dos recordes mundiais nesta prova pode ser vista na figura 1. Uma boa indicação da superioridade do atual recordista do mundo é notar que antes do atual recorde os dois últimos melhores tempos do mundo - 9,72 e 9,69 s - também pertenciam a Usain Bolt. A superioridade

de deste atleta também fica evidente na queda acentuada dos últimos pontos quando comparados com o restante da figura. Um fato curioso de se lembrar consiste na prova em que Bolt conseguiu o tempo de 9,69 s nos Jogos Olímpicos de 2008 em Pequim: alguns metros antes do final da prova Bolt começou a olhar para trás e comemorar a sua

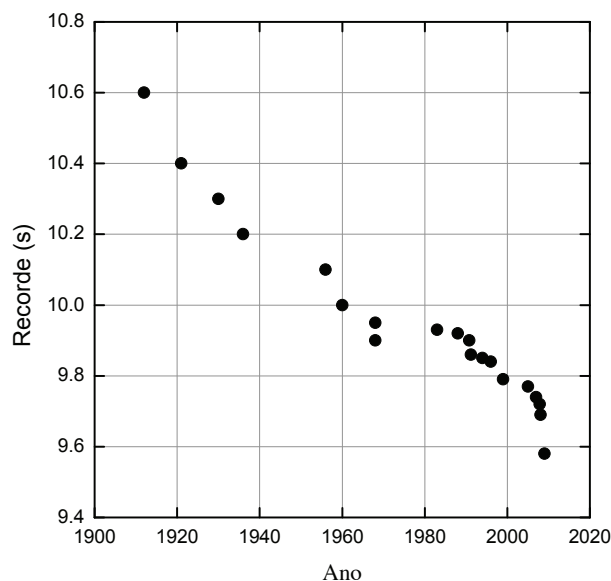


Figura 1. Evolução dos recordes mundiais da prova de 100 metros rasos ao longo dos anos.



vitória, diminuindo consideravelmente a sua velocidade. Um grupo de pesquisadores analisou essa corrida e estimou qual teria sido o tempo final da prova do Bolt caso ele não tivesse reduzido a sua velocidade nos últimos 2 s. No melhor cenário construído por eles, Bolt conseguiria um tempo entre 9,41 s e 9,59s [ (Eriksen et al., 2009).

Um ano após a quebra do recorde mundial em Pequim, Bolt quebrou novamente o recorde no campeonato mundial de atletismo de 2009, em Berlim, com um tempo de 9,58 s. Uma melhora de 0,11 s parece pouco, mas quando se trata de corredores de elite que estão bem próximos ao limite do ser humano, essa melhora é bastante relevante. Podemos, portanto, concluir que a performance e, conseqüentemente, a condição física do Usain Bolt melhorou após 1 ano de treinamento, certo? Não. Não é bem isso o que mostra a análise da corrida.

Um primeiro fator que deve ser levado em conta para a análise dessa prova é a velocidade do vento no momento da corrida. No caso do mundial de Berlim, todos os corredores da final dos 100 m rasos se beneficiaram de um vento a favor de 0,9 m/s. O fator “vento” é tão importante que os tempos eventualmente menores que o recorde mundial, mas obtidos em provas com ventos com velocidades maiores que 2 m/s no mesmo sentido da corrida, não são considerados como recordes.

### Os tempos de Usain Bolt em Beijing e Berlim

Vamos, então, iniciar a nossa análise da corrida do Usain Bolt ajustando uma curva às passadas do Bolt ao longo das finais de Pequim e Berlim. A tabela 1 mostra os tempos correspondentes a cada percurso de 10 m. Na última linha estão os tempos de reação em cada uma das provas. Podemos determinar a partir dessa tabela a taxa de variação do espaço ao longo do tempo, ou simplesmente a velocidade em função do tempo.

Um atleta que executa uma corrida que dura em torno de 10 s não possui tempo para determinar uma es-

tratégia como, por exemplo vou correr os primeiros 20 m moderadamente, nos próximos 30 m usarei somente 60 % da minha capacidade física para reservar minhas energias para o sprint final de 50 m. Obviamente, esse tipo de estratégia só funciona para corridas mais longas. No caso de uma corrida curta, a melhor estratégia é a do “máximo esforço”, ou em outras palavras, corra o mais rápido que você puder durante toda a prova utilizando toda a sua capacidade física. Nessa situação, a produção da energia utilizada pelo corpo provém basicamente de mecanismos anaeróbicos como a quebra de ATP em ADP e a hidrólise da glicose, como discutido no artigo Atividade Física e Plasticidade da Musculatura Esquelética (neste volume). É claro que essas fontes de energia são limitadas e na corrida de 100 m rasos, na condição do “máximo esforço”, elas geralmente duram somente um pouco mais do que 5 s. Após esse tempo é comum vermos uma diminuição da velocidade dos atletas, que sequer possuem energia para arrastar o ar (note que é preciso realizar um trabalho para “atravessar” o ar ou qualquer outro fluido). Assim, na função que adotaremos para a velocidade temos que levar em conta essa queda de rendimento no final da prova.

Antes de mostrarmos a função que iremos usar para representar matematicamente o perfil de velocidade, é importante comentar que cada atleta possui uma característica diferente, isto é, alguns atletas começam com uma aceleração menor e atingem o máximo da sua velocidade mais tardiamente que outros. Alguns atletas, porém, possuem uma queda de rendimento no final da prova menos intensa. Todavia, essa variação de estratégias deve ser provavelmente intrínseca às características de determinado atleta, ou seja, não podemos associar essas diferenças a algo consciente, mas, sim, à estratégia “corra o mais rápido que conseguir o tempo todo”.

Uma equação para a velocidade

A função que iremos adotar para a velocidade possui a seguinte forma [1]

$$v(t) = a(1 - e^{-ct}) - bt, \quad (1)$$

onde  $a$ ,  $b$  e  $c$  são parâmetros ajustáveis,  $t$  é o tempo e  $e$  é a função exponencial. Note que a primeira parcela faz com que a função cresça até um máximo dado pela constante  $a$ , mas não dá conta da queda da velocidade no final da prova. Essa queda é modelada pela última parcela que corresponde a uma redução linear (proporcional a  $t$ ) de  $v(t)$ . O espaço percorrido, dado pela integral da equação (1), é dado por

$$x(t) = at - \frac{bt^2}{2} - \frac{a}{c}(1 - e^{-ct}). \quad (2)$$

Os parâmetros da equação (2) serão ajustados aos valores da tabela 1. A tabela 2 mostra os parâmetros ajustados e a figura 2 mostra o perfil da velocidade dada pela

Tabela 1. Tempos do Usain Bolt para percorrer cada trecho de dez metros nas finais da prova de 100 metros rasos nas Olimpíadas de Pequim (2008) e no Campeonato Mundial de Berlim (2009).

Distâncias (m)	Tempos em segundos	
	Pequim (2008)	Berlim (2009)
10	1,85	1,89
20	2,87	2,88
30	3,78	3,78
40	4,65	4,64
50	5,50	5,47
60	6,32	6,29
70	7,14	7,10
80	7,96	7,92
90	8,79	8,75
100	9,69	9,58
<b>Tempos de reação</b>	0,165	0,146

Tabela 2. Parâmetros ajustados das Equações (1) e (2).

Parâmetros	Pequim (2008)	Berlim (2009)
$a$	12,49 m/s	12,43 m/s
$b$	0,081 m/s <sup>2</sup>	0,032 m/s <sup>2</sup>
$c$	0,814 s <sup>-1</sup>	0,783 s <sup>-1</sup>

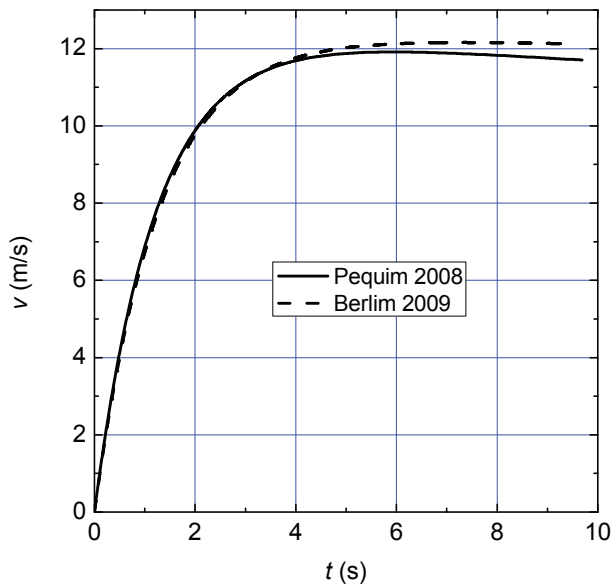


Figura 2. Velocidade em função do tempo (equação (1)) das corridas de 100 metros rasos dos recordes de Usain Bolt em Pequim e em Berlim.

equação (1).

Conforme já foi mencionado, a velocidade no final da prova diminuiu em virtude do esgotamento da energia do atleta. Porém, a diminuição em Berlim, onde havia um vento a favor de 0,9 m/s, é bem menor que no caso de Pequim. Essa diferença proveniente do gasto de energia poderá ser mais bem discutida olhando a curva da potência mecânica do atleta ao longo da corrida. Vale lembrar também que parte da redução acentuada da velocidade em Pequim ocorreu por causa da comemoração iniciada alguns metros antes do final da prova.

### Potência e energia mecânica produzidas por Usain Bolt

Para estimarmos a potência mecânica produzida temos que levar em conta a contribuição de três termos distintos: a potência mecânica associada ao aumento da energia cinética do atleta, mais a potência necessária para vencer a resistência do ar e, ainda, uma potência constante associada a efeitos “menores”, como, por exemplo, o balançar das pernas e o movimento de sobe-desce do corpo ao longo da corrida (essa hipótese - de uma potência adicional constante - é apenas uma aproximação para que possamos entender de maneira mais simplificada a Física de uma corrida de cem metros rasos; o artigo Locomoção Terrestre e Demanda Metabólica (neste volume) apresenta uma visão mais ampla e completa do gasto energético nos processos de locomoção).

Traduzindo o parágrafo anterior em uma equação matemática, temos que

$$P(t) = m \frac{dv}{dt} v + k(v - v_{\text{vento}})^2 v + 200W, \quad (3)$$

onde  $m$  é a massa do atleta,  $v_{\text{vento}}$  é a velocidade do vento (igual a zero em Pequim e 0,9 m/s em Berlim) e  $k$  é um parâmetro que está associado à dissipação da po-

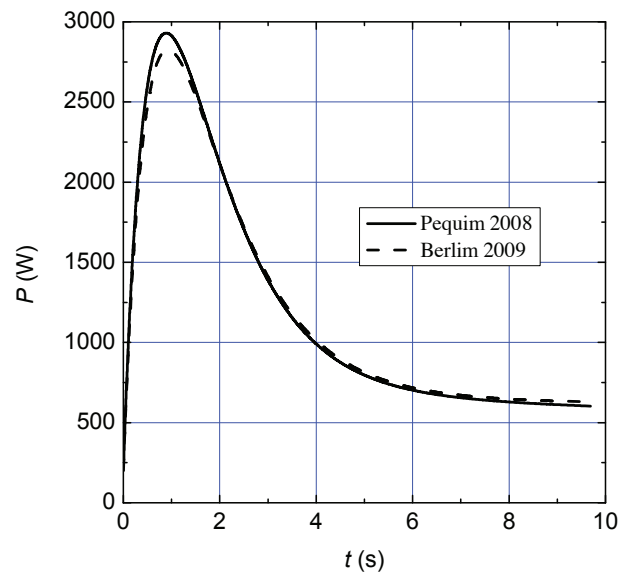


Figura 3. Potência mecânica total em função do tempo (equação (3)) das corridas de 100 metros rasos das finais do Usain Bolt em Pequim e em Berlim.

tência pelo arrasto do ar. Ele é dado por  $k = \frac{C_d \rho A}{2}$ , onde  $C_d = 0,5$  (um valor típico para o coeficiente de arrasto),  $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$  é a densidade do ar e  $A \approx 1 \text{ m}^2$  é a área frontal do atleta. Substituindo esses valores em  $k$  chegamos ao valor de  $0,3 \text{ W/(m/s)}^3$ . Para a massa do Usain Bolt foi utilizado  $m = 86 \text{ kg}$ . A figura 3 mostra a equação (3) com a velocidade dada pela equação (1) e os parâmetros dados na tabela 2.

Calculando a área sob as curvas de potência na figura 3 nós temos a energia total gasta por Bolt nas duas corridas. Esses valores assim como a aceleração inicial, dada pela inclinação da curva da velocidade em  $t=0$ , e a potência máxima em cada prova estão relacionados na tabela 3.

Tabela 3 - Aceleração e potência máximas e energia total produzidas por Usain Bolt em Pequim e em Berlim.

	Pequim (2008)	Berlim (2009)
<b>Aceleração máxima</b>	10,09 m/s <sup>2</sup>	9,70 m/s <sup>2</sup>
<b>Potência máxima</b>	2934 W	2827 W
<b>Energia total</b>	11611 J	11531 J

Utilizando o nosso modelo simplificado e analisando a tabela 3 podemos dizer que, embora o tempo em Berlim tenha sido menor, o desempenho atlético de Usain Bolt, medido em termos da potência e da energia mecânica, foi melhor em Pequim.

### Conclusão

Olhando para o desempenho de Usain Bolt em Pequim, superior ao de Berlin, devemos lembrar, ainda, que houve uma considerável diminuição da sua velocidade



de no final da prova em virtude da comemoração da vitória ter sido iniciada muito precocemente. De acordo com Eriksen et al. (2009) o melhor tempo que poderia ter sido obtido em Pequim (se não tivesse havido a comemoração) seria 9,41 s, 0,17 s a menos que o atual recorde mundial desta modalidade.

Podemos notar que a equação (1) que nos fornece a velocidade do atleta pode eventualmente se tornar negativa para tempos além de 2,5 e 6,5 minutos, respectivamente, para as corridas de Pequim e Berlim. Obviamente isso não faz sentido, já que indicaria um atleta que inverteu o sentido de sua corrida. Assim, aquela equação é válida somente para tempos de corrida curtos, como é o caso das corridas de 100 m. Uma possível melhora da equação (1) seria considerar a última parcela da potência (correspondente a um gasto de energia “parasítica”), e assumida aqui como uma constante (Helene e Yamashita, 2010), com uma dependência com a velocidade do tipo  $\gamma v$  (Kram e Taylor, 1990), onde a constante  $\gamma$  depende somente da massa e do tipo de animal que estamos considerando (no caso de humano esse valor é dado por  $\gamma = 4m$  W/(kg m/s). Uma consequência interessante deste termo é que o custo energético por unidade de distância torna-se uma constante e independente da velocidade do atleta, ou seja, a quantidade de energia gasta associada a esse termo “parasítico” é a mesma se você correr ou andar a mesma distância. Todavia, a questão referente a qual modelo devemos usar para descrever adequadamente a produção de energia mecânica em uma corrida de cem metros rasos—uma constante ou um termo proporcional à velocidade—ainda é uma questão não totalmente esclarecida. Uma discussão mais detalhada a respeito dessa questão aparece no artigo Locomoção Terrestre e Demanda Metabólica, neste volume.

## Referências

- Eriksen HK, Kristiansen JR, Lagrangen Ø, Wehus IK. 2009. How fast could Usain Bolt have run? A dynamical study. *American Journal of Physics* 77:224-228 .
- Helene O, Yamashita MT. 2010. The force, power, and energy of the 100 meter sprint. *American Journal of Physics* 78:307-309 .
- Kram R, Taylor CR. 1990. The energetics of running: a new perspective. *Nature* 346:225-267 .

# Alguma física dos saltos em altura e distância

Some physics of the high and long jump

Otaviano Helene

Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil

Contato do autor: otaviano@if.usp.br

**Resumo.** Neste artigo, mostramos um modelo simples que foi desenvolvido para explicar os saltos em altura e distância. O modelo é baseado na máxima energia que um atleta pode produzir usando apenas uma perna. Conservação do momento angular é usada para explicar porque um atleta deve correr horizontalmente antes de executar um salto vertical. Os resultados obtidos concordam com as observações.

**Palavras-chave.** Salto em altura; Salto em distância; Velocidade; Energia; Momento angular.

**Abstract.** In this paper we show a simple model developed to describe the high and long jump. The model is based on the maximum energy an athlete can produce using single leg. Conservation of angular momentum is used to explain why an athlete should run horizontally before the vertical jump. The obtained results agree with observations.

**Keywords.** High jump; Long jump; Speed; Energy; Angular momentum.

Recebido 22mar12

Aceito 27nov12

Publicado 15jan14

## Introdução

Nós aprendemos e ensinamos que para lançar alguma coisa bem longe, o melhor é lançá-la formando um ângulo de cerca 45° com a horizontal, desde que a resistência do ar não seja muito importante, o lançamento ocorra próximo ao nível do chão e a velocidade que conseguimos imprimir àquela coisa não dependa do ângulo que a joguemos. Calcular aquele ângulo ideal de lançamento é um exercício típico proposto a estudantes do ensino médio. Há alguns anos atrás, este resultado bem conhecido, até mesmo do público em geral, motivou uma questão curiosa entre a comunidade de físicos (Harris 1997): por que os atletas que se dedicam aos saltos em distância decolam em um ângulo de cerca de 20° com a horizontal e não com um ângulo de 45°? Se a decolagem ocorresse a um ângulo de 45°, um atleta poderia, facilmente, saltar distâncias maiores do que dez metros. Para isso, bastaria correr a velocidades superiores a 35 km/h – valor nada absurdo levando-se em conta que velocistas atingem velocidades maiores que 40 km/h e muitos dos atletas que se dedicam ao salto em distância são excelentes velocistas. Carl Lewis, por exemplo, é um desses atletas que combinam o salto em distância com as corridas de cem metros, tendo seus recordes, nas duas modalidades, reconhecidos pela Associação Internacional de Federações de Atletismo (IAAF, 2012).

Entretanto, o recorde masculino atual, conquistado pelo americano Mike Powell em 1991, é de 8,95 m e o recorde feminino, da representante da então União Soviética Galina Chistyakova, é de 7,52 m, obtido em 1988. Esses

valores são significativamente abaixo do que seria esperado se a decolagem ocorresse a 45° (mais adiante discutiremos qual o melhor ângulo para o salto em distância).

Uma análise equivalente pode também ser feita em relação ao salto em altura (sem vara): lançando-se a um ângulo mais adequado, a altura alcançada poderia ser bem maior do que os recordes atuais, de 2,45 m para homens (marca conquistada pelo cubano Javier Sotomayor, em 1993) e 2,09 m para as mulheres (recorde da atleta búlgara Stefka Kostadinova, em 1987) registrados (IAAF 2012). Correndo a uma velocidade horizontal de 35 km/h, se ela pudesse ser convertida em uma velocidade vertical, a altura que o centro de massa subiria poderia exceder os impressionantes 5 metros, como ficará claro mais adiante. Somando-se a altura inicial do centro de massa do atleta, a altura máxima poderia atingir seis metros. Essa altura é conseguida apenas nos saltos com vara, modalidade na qual a vara, que é bastante elástica, permite converter uma velocidade horizontal em uma velocidade vertical sem alterar sua intensidade, uma vez que há conservação da energia mecânica durante todo o movimento do ou da atleta.

Como os saltos em distância estão aquém dos dez metros e os saltos em altura (sem vara) muito aquém dos cinco ou seis metros, podemos concluir que alguma coisa impede que os atletas decolam formando ângulos muito grandes com a horizontal ou, em outras palavras, consigam converter uma grande parte das velocidades adquiridas nas corridas que precedem os saltos em velocidades verticais. Mas o que impede os atletas de converterem suas



velocidades horizontais em velocidades que tenham uma direção mais adequada para realizar os saltos? Foi essa a pergunta que apareceu na revista *American Journal of Physics*, que circula internacionalmente entre a comunidade de físicos.

As respostas qualitativas que surgiram para essa pergunta nos números seguintes da mesma revista estavam corretas: os atletas não conseguem mudar a direção de suas velocidades porque não podem gerar a energia necessária para isso. Mas, por que não? Afinal, se a intensidade da velocidade não muda, apenas a direção é que muda, a energia cinética permanece inalterada. Então, por que é necessário gastar energia para mudar a direção da velocidade?

Essas perguntas sugerem outras. Por que um atleta que pretende saltar verticalmente – salto em altura – corre horizontalmente? Afinal, se o objetivo é saltar verticalmente, o que uma velocidade horizontal pode contribuir para isso? Em uma primeira análise, parece que correr antes do salto em altura serviria apenas para cansar o ou a atleta e piorar o desempenho.

Afinal, quais são os ingredientes realmente importantes para os saltos?

### **Não podemos permitir que um problema complexo se transforme em um problema confuso**

Como em quase todos os problemas em ciências, os saltos em altura e distância têm uma quantidade muito grande de detalhes envolvidos – e muitos detalhes transformam um problema a ser resolvido em alguma coisa muito complicada. Portanto, se não tomarmos cuidados, corremos o risco de torná-lo confuso. Isso deve ser evitado com todas as forças: transformar um problema complexo e complicado em um problema confuso é o primeiro passo para não resolvê-lo.

Esse problema foi examinado em colaboração com o professor Marcelo Takeshi Yamashita, do Instituto de Física Teórica da Unesp, e o primeiro passo foi identificar os aspectos mais importantes dos saltos. Tanto no salto em altura como no salto em distância, um dos momentos cruciais é o empurrão que é dado no exato instante em que

o salto se inicia, isto é, na última passada. Portanto, uma questão é entender esse empurrão: o que o caracteriza?

Examinando alguns detalhes da corrida de 100 m rasos e do levantamento de peso, pudemos entender o que caracteriza esse empurrão: a energia que o atleta consegue produzir com ele e que aumenta a energia cinética de seu movimento. Para estimar essa energia, tomamos como referência essas duas modalidades esportivas.

Mas faltava resolver outra questão: para que um atleta corre horizontalmente quando quer saltar verticalmente? A solução para essa pergunta tem a ver com a conservação de momento angular e serviu, também, para entender a curva fechada que os atletas fazem antes do salto.

Os resultados obtidos foram publicados na mesma revista onde a questão inicial surgiu (Helene e Yamashita 2005). Neste artigo, apresentaremos uma visão geral do modelo e uma tentativa de ligar o tema a questões fisiológicas.

### **O empurrão final**

Suponha um atleta que esteja correndo horizontalmente e pretenda saltar uma longa distância. Se ele tivesse um excelente mecanismo elástico e tivesse um apoio adequado para seus pés, poderia transformar a velocidade horizontal em vertical sem necessidade de nenhum esforço. A Figura 1A ilustra como isso poderia acontecer em uma situação idealizada. Uma bola, por exemplo, deslocando-se horizontalmente, choca-se com uma cunha; se o choque for totalmente elástico a energia cinética da bola antes e depois do choque é a mesma. Se a cunha tiver um ângulo adequado, a bola será “refletida” formando um ângulo de  $45^\circ$  com a horizontal. Essa seria uma situação ideal para o salto em distância. Para o salto em altura, a bola deveria ser refletida em um ângulo de  $90^\circ$ . Mas essas coisas não ocorrem com pessoas. Embora tenhamos alguma elasticidade, ela é muito pequena. Assim, se queremos ganhar uma velocidade vertical, precisamos fazer algum esforço, empurrando o chão para baixo.

E isso é o que parece ocorrer com atletas: imediatamente antes do salto, eles dão um empurrão final contra o chão. E esse empurrão é a origem da velocidade vertical



Figura 1. Uma bola deslocando-se horizontalmente, ao se chocar com uma cunha, poderia ter a direção de sua velocidade alterada, sem alterar seu módulo nem exigir produção de energia. Na figura da esquerda, uma bola deslocando-se horizontalmente teria sua velocidade mudada para uma direção formando  $45^\circ$  com a horizontal, ideal para se deslocar uma distância máxima na horizontal antes de cair no chão. A figura da direita mostra uma situação ideal para um atleta que queira saltar em altura: transformar sua velocidade horizontal em uma totalmente vertical sem alterar seu módulo. Mas atletas não são de borracha nem totalmente elásticos; portanto, não podem alterar a direção de suas velocidades por um processo como o descrito aqui.

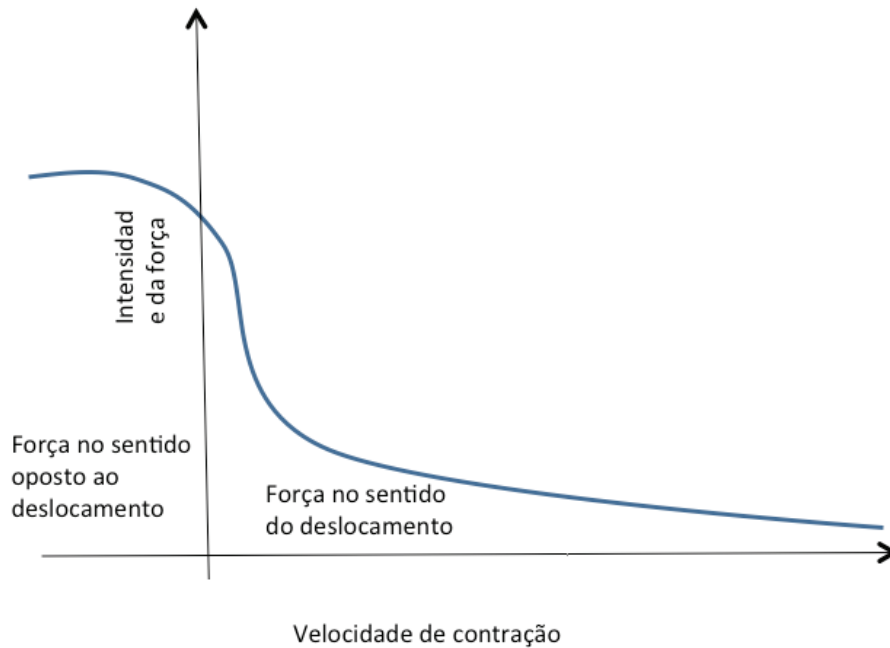


Figura 2. A força que conseguimos aplicar depende da velocidade de contração dos nossos músculos: quanto maior a velocidade de contração (no sentido da força), menor a força que podemos aplicar. Quando a força é aplicada no sentido oposto ao deslocamento (seguramos alguma coisa, evitando seu movimento), a força que conseguimos fazer é maior do que a força que podemos fazer sem movimento algum. Esta figura representa qualitativamente esse efeito.

que adquirem, seja no salto em altura, seja no salto em distância. Como é esse empurrão – do ponto de vista da Física, mas sem descuidar da Fisiologia? Essa é uma questão relevante. Poderíamos pensar, por exemplo, que esse empurrão é caracterizado por uma força constante e estimar a força máxima que um atleta consegue fazer com as pernas; então, bastaria calcular a aceleração vertical proporcionada por essa força, estimar a distância pela qual ela atua e calcular a velocidade vertical ganha pelo atleta. Mas isso é razoável? Somos capazes de fazer uma força muito intensa, empurrando alguma coisa sem deslocamento. Se a força é contra o deslocamento, ou seja, empurramos uma coisa que está vindo em nossa direção ou seguramos uma coisa que está se afastando, a força que conseguimos fazer é ainda maior do que aquela que fazemos sem provocar deslocamento algum. (O artigo *Papel das ações musculares excêntricas nos ganhos de força e de massa muscular*, neste volume, discute nossa capacidade de aplicação de força e execução de trabalho.)

Mas quando há deslocamento no mesmo sentido da força que aplicamos, como quando saltamos, a força que podemos fazer pode ser bem menor do que naqueles dois casos anteriores. Imagine a seguinte situação. Uma pessoa está empurrando um carro quebrado enquanto ele está parado; ela pode fazer uma força muito intensa e, dependendo do local que empurrar o carro, pode até mesmo amassá-lo. Mas quando o carro começa a andar, a força que conseguimos fazer é menor, diminuindo na medida em que a velocidade do carro aumenta. Ou seja, o que limita nossa ação não é apenas a força que conseguimos aplicar a alguma coisa, mas, também, a potência ou a energia produzida por ela. Isso é bem conhecido e

estudado pelos fisiologistas: a força feita por nossas fibras musculares depende da velocidade de contração. Quanto mais rápida a contração de um músculo, menor a força que ele pode gerar.

Então, para caracterizar o empurrão final que um atleta dá imediatamente antes do salto, em lugar de supor uma força estática, precisamos considerar, também, o deslocamento. Ou, melhor ainda, devemos considerar o trabalho feito por esse empurrão. Se soubermos qual é esse trabalho, saberemos a energia cinética adicionada ao corpo do atleta e, algumas contas a mais, a sua velocidade vertical ao decolar para o salto. Para isso, podemos analisar, por exemplo, o levantamento de peso na forma de agachamento (“squat”). Nessa modalidade, um atleta consegue, em movimento, quer dizer, levantando o peso, fazer uma força de aproximadamente 3.000 N com uma única perna. Se ele faz essa força por 25 cm, que é uma boa estimativa da distância que o atleta empurra seu corpo para cima no último passo antes de iniciar o salto, o trabalho dessa força (que é igual ao produto dela pela distância de aplicação), é

$$(3.000 \text{ N} - 800 \text{ N}) \times 0,25 \text{ m} = 550 \text{ J} \quad , (1)$$

onde os 800 N subtraídos corresponde a uma estimativa do peso do atleta suportado por apenas uma perna, aquela que dá o empurrão final. Esse trabalho levará a um aumento da energia cinética do mesmo valor.

Uma outra maneira de estimar essa energia adicionada ao movimento do atleta é examinar a corrida de cem metros rasos. A maior potência mecânica produzida por um atleta nos cem metros rasos ocorre quando ele está



com uma velocidade de cerca de 6 m/s e uma aceleração da ordem de 5 m/s<sup>2</sup> (Helene e Yamashta 2010). Isso corresponde a uma potência, no caso de um atleta de 80 kg, igual a

$$80 \text{ kg} \times 5 \text{ m/s}^2 \times 6 \text{ m/s} = 2.400 \text{ W}$$

Mas essa não é toda a potência mecânica que um atleta produz, pois durante a corrida há um gasto constante de energia estimado em cerca de 200 W (Helene e Yamashita 2010) (sobre esse tema, veja, também, o artigo *Locomoção Terrestre e Demanda Metabólica*, neste volume). Assim, um excelente atleta consegue produzir, em uma única passada, considerando que o atleta dá uma passada a cada 0,2 s,

$$(2.400 \text{ W} + 200 \text{ W}) \times 0,2 \text{ s} = 520 \text{ J} \quad , (2)$$

Esse valor é bem próximo daquele estimado no caso de levantamento de peso, de 550 J. Assim, nós vamos supor que um atleta de alto nível, especialista em saltos, consiga, com um único empurrão dado por uma de suas pernas, produzir uma energia mecânica de 550 J. (Não mudaria muito se supuséssemos algum outro valor próximo a esse, como os 520 J estimados pela corrida de cem metros rasos.) Vamos usar esse valor tanto para o salto em distância como em altura.

### Salto em distância

Um bom atleta no salto em distância é também um bom corredor. Como é mostrado no trabalho *Uma breve análise da física da corrida de 100 metros rasos*, neste volume, um bom corredor atinge, após trinta metros de corrida, uma velocidade da ordem de 10 m/s que, vamos supor, é a velocidade com que um saltador atinge no momento do salto. Supondo uma massa de 80 kg, sua energia cinética será de

$$m \cdot v^2 / 2 = 4.000 \text{ J} \quad , (3)$$

correspondendo a um movimento horizontal. Se ele adiciona 550 J à sua energia cinética, na forma de uma velocidade vertical, sua energia cinética passa a ser de 4.550 J e a nova velocidade,  $v'$ , será dada por

$$m \cdot v'^2 / 2 = 4.550 \text{ J} \quad , (4)$$

A velocidade, para um atleta de 80 kg, será, então, de 10,66 m/s. Como essa velocidade é adicionada em uma direção perpendicular à velocidade original, o diagrama vetorial das componentes da velocidade será aquele indicado na Figura 3, correspondente a uma velocidade vertical de 3,7 m/s. Da análise da figura 3 concluímos, também, que o ângulo de decolagem do atleta é da ordem de 20°.

Com esses resultados, podemos calcular a distância do salto. Um objeto lançado do nível do solo com velocidade horizontal  $v_h$  e velocidade vertical  $v_v$  cairá a uma distância do ponto de lançamento dada por

$$d = \frac{2 \cdot v_v \cdot v_h}{g} \quad , (5)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade. (Esta última equação é obtida considerando-se que a velocidade horizontal não é alterada enquanto o movimento vertical é uniformemente acelerado para baixo correspondendo a um exercício típico do ensino médio.) Substituindo os valores numéricos, temos

$$d = \frac{2 \cdot 3,7 \text{ m/s} \cdot 10 \text{ m/s}}{9,8 \text{ m/s}^2} = 7,6 \text{ m} \quad , (6)$$

Essa distância corresponde à distância L3 da Figura 4, ou seja, a distância horizontal percorrida pelo centro de massa do atleta desde o instante de decolagem até o momento que ele encosta seus pés no chão. Mas como o que conta no salto é a distância entre o último ponto no qual o atleta tocou o solo antes do salto e o ponto em que ele toca o solo ao cair, e não a distância que o seu centro de massa percorre, devemos adicionar àquele valor a distância L1+L2 da Figura 4, que podem, empiricamente, ser estimadas em 0,8 m (Helene e Yamashita, 2005). Portanto, a distância saltada é (7,6+0,8) m=8,4 m.

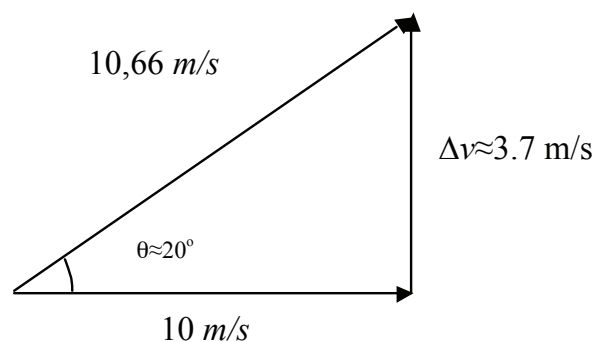


Figura 3. Componentes da velocidade no instante da decolagem no salto em distância.

Conclusão: um excelente atleta salta 8,4 m e decola formando um ângulo de 20° com a horizontal. Esses resultados parecem bastante bons: as distâncias saltadas por atletas de elite estão entre 7,4 m e 8,8 m para homens e 6,5 m e 7,5 m para mulheres. Os ângulos de decolagem observados estão entre 18° e 22° (Wakai e Linthorne 2005). Parece, portanto, que o modelo simplificado é razoável e descreve as características mais importantes do salto em altura. Se quiséssemos um resultado mais preciso, precisaríamos estudar as características de cada atleta em particular: quão intensa é a força que consegue fazer quando há deslocamento na mesma direção da força, como ocorre no empurrão final, a velocidade horizontal que ele ou ela atinge imediatamente antes do salto, as distâncias L1 e L2 da Figura 4 (que podem depender da altura do atleta), o peso do ou da atleta etc. Esses detalhes devem ser levados em consideração em estimativas mais precisas. Entretanto, o que importa é que, parece, estamos na direção correta se o que queremos é estimar as principais características que limitam o desempenho de atletas.

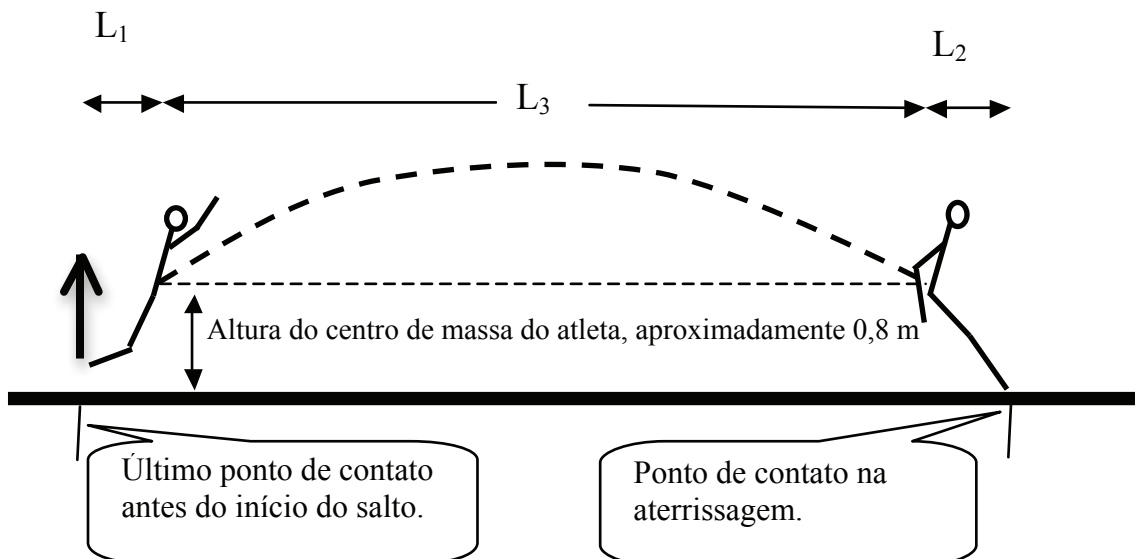


Figura 4. Esquema de um salto em distância. Para iniciar o salto, o atleta dá um forte empurrão na vertical, cuja energia total produzida é da ordem de 550 J (indicado pela flecha grossa à esquerda). Esse empurrão fornece uma velocidade vertical para o atleta.

### Salto em altura

No salto em altura há, além do empurrão final que o atleta dá para ganhar velocidade vertical, outro ingrediente, cuja origem é a lei de conservação do momento angular, usado pelo atleta para transformar parte da velocidade horizontal em uma velocidade vertical. Esse mecanismo não só explica a curva que o atleta faz imediatamente antes do salto (essa técnica, popularizada pelo salto do atleta americano Dick Fosbury em 1968, nos jogos Olímpicos da Cidade do México, é adotada desde então), mas, também, juntamente com a energia adicional de 550 Joules, explica a altura total atingida. Vale a pena procurar na rede de computadores um vídeo de um salto em altura para ver como é essa curva fechada que é feita pelos e pelas atletas antes do salto ou, melhor ainda, procurar um local de treinamento de atletas de verdade, ao vivo e em cores.

Antes de examinarmos o empurrão final que antecede a decolagem, vamos ver como é possível mudar a direção de uma velocidade inicialmente horizontal em uma nova direção, sem usar nenhum mecanismo de elasticidade. Suponha uma barra se deslocando horizontalmente e inclinada, como ilustrado na Figura 5. (Mais adiante, veremos como um atleta pode, em um pequeno intervalo de tempo, manter seu corpo inclinado sem cair.) Em certo momento, um dos extremos da barra encontra um obstáculo, parando imediatamente. Como o momento angular se conserva (veja Apêndice), então a velocidade do centro de massa logo depois que a barra é parada pelo obstáculo é

$$v = \frac{3}{4} v_0 \sin(\theta) \quad , (7)$$

onde  $\theta$  é o ângulo de inclinação da barra indicado na Figura 5. Essa nova velocidade tem uma componente vertical, para cima, igual a

$$v_v = \frac{3}{4} v_0 \sin(\theta) \cos(\theta) \quad , (8)$$

e uma velocidade horizontal dada por

$$v_h = \frac{3}{4} v_0 \sin^2(\theta) \quad , (9)$$

Ou seja, o ato de “travar” um dos extremos da barra transforma a velocidade, inicialmente apenas horizontal, em uma nova velocidade que passa a ter uma componente na vertical. Por exemplo, se esse ângulo for da ordem de  $60^\circ$ , a velocidade vertical será pouco maior do que 30% da velocidade original, antes do travamento.

Enquanto o bloqueio está presente, a barra gira em torno dele. Entretanto, se o bloqueio é retirado imediatamente após a barra bater nele, ela, a barra, passa a se deslocar na direção da nova velocidade.

Agora, vamos ver o atleta. Evidentemente, nenhum atleta conseguiria correr com o corpo inclinado para trás sem cair. Então, o que ele faz é uma curva bem fechada no final da corrida; nessa curva, seu corpo ficará inclinado para o centro da curva, exatamente para que ele não caia. É isso que permite que o atleta, pelo menos em um pequeno intervalo de tempo, assuma a mesma forma de uma barra que corre inclinada, fazendo com que ele adquira uma velocidade vertical.

Para finalizar as contas, precisamos considerar o acréscimo de velocidade conseguido com um empurrão final, que adiciona 550 J à energia cinética do atleta, e calcular a altura máxima que seu centro de massa subirá. Essa altura é dada pela distância que um objeto sobe em um campo gravitacional quando lançado verticalmente para cima. Considerando também a geometria do sistema da Figura 5B, que mostra que o centro de massa do atleta no momento do salto está a uma distância  $l \cdot \sin(\theta)/2$  do solo, a altura final do centro





Figura 5. Uma barra deslocando-se horizontalmente com velocidade  $v_0$  é instantaneamente “travada” quando um dos seus extremos encontra um bloqueio. O momento angular em relação ao ponto de travamento é conservado e a barra passa a girar em torno dele com uma nova velocidade  $v$ .

de massa é

$$h = \frac{1}{2g} \left( v_v^2 + \frac{2}{m} 550J \right) + \frac{l}{2} \text{sen}(\theta) \quad , (10)$$

Estimando  $l/2$  como sendo 1 m e substituindo nesta última equação a expressão para a  $v_v$  da equação (8), temos uma expressão que relaciona a altura do salto com a velocidade com que o atleta se aproxima e o ângulo de inclinação. Vamos considerar que a velocidade típica de atletas ao se aproximarem da barra está entre 7 m e 8 m para homens e 6 m a 7,5 m para mulheres (IAAF 2012) e aproximar  $v_0$  por 7,5 m/s. Neste caso o ângulo  $\theta$  ideal (aquele que maximiza  $h$ ) é  $56^\circ$ .

A Figura 6 mostra a situação no instante do salto. O atleta sobe com uma velocidade vertical de 4,5 m/s, que é uma combinação da velocidade vertical conseguida ao travar o pé (2,6 m/s) mais a velocidade adicionada pelo empurrão de 550 J. A velocidade total tem intensidade de 5,9 m/s e, portanto, o ângulo de decolagem indicado na Figura 6 é da ordem de  $49^\circ$ .

Com essas informações concluímos que a altura do salto é da ordem de 2,0 m, um valor bastante típico para atletas de ponta. O ângulo de decolagem, de  $49^\circ$ , é também bastante próximo dos ângulos típicos que os e as atletas decolam no salto em altura (Dapena e Chung 1988).

### Discussão

Em alguns casos, analisar as grandezas físicas importantes em uma atividade esportiva pode ser relativamente fácil.

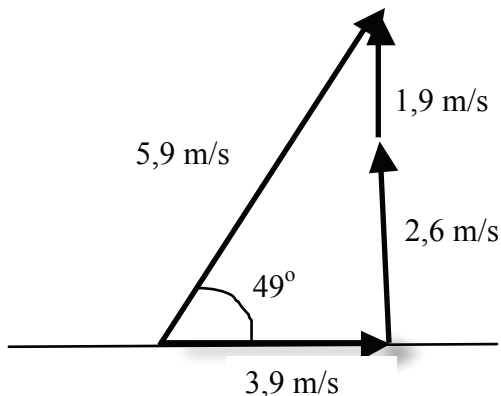


Figura 6. No exato momento que o atleta decola, sua velocidade vertical é de 4,5 m/s. Essa velocidade corresponde à soma da velocidade de 2,6 m/s que ele consegue ao “travar” o pé e transformar parte de sua velocidade horizontal em velocidade vertical com a velocidade ganha no empurrão final.

Talvez o salto com vara seja o mais simples deles, no qual a energia cinética acumulada pelo ou pela atleta na corrida é transformada em energia potencial da vara quando ela é flexionada. Em seguida, essa energia potencial é usada para “lançar” o ou a atleta para cima, transformando-se em energia cinética. Finalmente, o corpo do ou da atleta sobe e a energia cinética é gradativamente transformada em energia potencial gravitacional. Mas em outras atividades esportivas, vários outros aspectos mais sutis podem ser importantes. Descobrir quais são eles é, então, a chave para entender e analisar a atividade.

Um critério comumente usado nas várias áreas científicas para saber se a análise feita pode ser correta ou não é comparar os resultados previstos com a realidade. Com esse critério, parece que a interpretação que fizemos dos saltos em altura e distância está na direção correta, ou seja, os ingredientes mais relevantes foram identificados. Afinal, conseguimos prever distâncias e alturas saltadas, os ângulos de decolagem dos atletas nessas duas modalidades e encontrar uma justificativa para a curva fechada que o atleta faz antes de um salto em altura.

Um aspecto fundamental é quanto ao empurrão final que um atleta deve dar no instante de decolagem, tanto no salto em altura como no salto em distância. A hipótese adotada é que o que caracteriza esse empurrão é a energia produzida, não a força ou o impulso (o impulso é a força multiplicada pelo tempo e provoca uma variação da quantidade de movimento). Em ambos os casos, a energia é adicionada na forma de energia cinética, com uma variação da velocidade na direção e no sentido mais adequados para que o desempenho seja o melhor possível. Essa energia, estimada em 550 J, é a máxima energia mecânica produzida por um atleta com apenas uma de suas pernas em qualquer modalidade esportiva, seja essa atividade os saltos em altura e distância, a corrida de cem metros rasos ou o levantamento de peso.

Aqui vão duas observações finais. Uma delas é prática. De fato, no salto em altura o modelo que usamos, de travar o pé, é apenas uma aproximação do que efetivamente os atletas fazem. Parece que esse processo de transformar velocidade horizontal em vertical não ocorre em apenas um exato instante no qual o pé é travado, como supusemos, simplificada, no modelo, mas em um movimento mais complexo. Mesmo dessa forma mais complexa, a força exercida sobre o pé do atleta (o pé de chamada, no jargão atlético) no último passo é muito intensa. Isso exige sapatilha especial, com travas, para suportar a força exercida (essa sapatilha, por sinal, pode

ser usada apenas no pé que sofrerá essa força). Como essa força exercida é muito intensa, o atleta deve tomar muito cuidado para evitar lesões graves.

## Referências

- IAAF 2012. International Association of Athletics Federations, iaaf.org.br, sítio consultado em outubro/2012
- Harris WD 1997. Question #58. Is a good long jumper a good high jumper? American Journal of Physics 65: 105
- Helene O e Yamashita MT. 2005. A unified model for the long and high jump, American Journal of Physics 73 (10): 906-908
- Helene O e Yamashita MT. 2010. The force, power, and energy of the 100 meter sprint, American Journal of Physics 78 (3): 307-309
- Dapena J e Chung CS. 1988. Vertical and radial motions of the body during the take-off phase of high jump. Medicine and Science in Sports and Exercise 20: 290-302
- Wakai M e Linthorne NP, 2005. Optimum take-off angle in the standing long jump, Human Movement Science: 24, 81-96

## Apêndice

### Conservação do momento angular

Em referência à Figura 5A, o momento angular de uma barra de comprimento  $l$  deslocando-se com velocidade  $v_o$  em relação ao ponto P indicado naquela figura é

$$L_1 = m \cdot v_o \cdot \frac{l}{2} \cdot \text{sen}(\theta) \quad , (A1)$$

onde  $m$  é a massa da barra.

Após o choque (situação ilustrada na Figura 5B), o momento angular é dado por

$$L_2 = I \cdot \omega \quad , (A2)$$

onde  $I$  é o momento de inércia de uma barra em relação a um de seus extremos,

$$I = \frac{m \cdot l^2}{3} \quad , (A3)$$

e a velocidade angular  $\omega$  relaciona-se com a velocidade  $v$  após o choque por

$$\omega = \frac{v}{l/2} \quad , (A4)$$

Como o torque em relação ao ponto P de qualquer força aplicada sobre a barra no seu extremo inferior é nulo (uma vez que essa força é aplicada exatamente no próprio ponto P), o momento angular se conserva. Assim, igualando  $L_1$  a  $L_2$  obtemos a equação (7).

# Bipedalismo: solução para carregar crias, correlacionada com a redução de pelos

Bipedality: solution for infant carrying, correlated with reduction of body hair

**Lia Q. Amaral**

*Departamento de Física Aplicada, Instituto de Física da Universidade de São Paulo*

Contato do autor: amaral@if.usp.br

**Resumo.** Apresento o conteúdo de três artigos científicos meus, em que discuto o bipedalismo como consequência da necessidade de carregar com segurança as crias, correlacionado à diminuição de pelos do corpo na nossa linhagem evolutiva. Focalizo a forma como os primatas carregam suas crias, a pilosidade em primatas, propriedades mecânicas dos pelos de primatas e condições de equilíbrio para o transporte seguro das crias. Discuto o ambiente em que a evolução inicial ocorreu, as correlações entre bipedalismo e reprodução, e a proposta que tenho para dar uma explicação ao mistério de nossa origem, em termos de probabilidade de sobrevivência e da divergência com relação aos demais primatas. A conclusão menciona um retorno a Darwin, integrando o conhecimento acumulado no último século.

**Palavras-chave.** *Bipedalismo; Pelos; Carregar crias; Reprodução.*

**Abstract.** I present the content of three scientific articles I published, discussing bipedalism as a consequence of the necessity of safe carry of infants, correlated to the reduction of body hairs in our evolutionary lineage. I focus forms of infant carrying among primates, their hair density, mechanical properties of ape hairs and equilibrium conditions for safe carry of infants. I discuss the environment of the initial evolution, correlations between bipedality and reproduction, and the proposal I made to explain the mystery of our origin, in terms of survival probabilities and divergence in relation to other primates. The conclusion mentions a return to Darwin, integrating the knowledge obtained in the last century.

**Keywords.** *Bipedality; Hairs; Infant carrying; Reproduction.*

Recebido 22mar12  
Aceito 07nov12  
Publicado 15jan14

## Introdução

Neste artigo de divulgação unifico as idéias que publiquei em três artigos científicos (Amaral, 1989; 1996; 2008), chegando a uma visão integrada sobre nossa evolução física inicial, quando nossa linha evolutiva se separa dos demais primatas. Ressalto que por ser um artigo de divulgação os leitores devem procurar as referências científicas nessas três publicações originais.

Todas as culturas humanas criaram mitos de origem que procuram explicar nosso início, ligados às crenças e valores de cada cultura. O relato bíblico sobre nossa origem, por exemplo, ainda tem uma força imensa, que resiste às descobertas científicas sobre a evolução biológica darwiniana. A ciência, quando coloca a questão em termos de genes, mas sem poder explicar sua ação específica, não consegue satisfazer nossa necessidade de encontrar um “sentido”, que torne o processo compreensível e fundamentalmente nossas crenças. O que nos faz “humanos”, afinal?

Desenvolvo aqui uma proposta sobre nossa origem, que acredito pode se somar ao que a ciência vem descobrindo e ajudar a responder ao anseio de compreensão que existe em todos nós sobre esse assunto. Começo por

localizar as características físicas básicas de nossa espécie.

O livro “O macaco nu” (Morris, 1967) tornou-se um sucesso de vendas muito popular por dar um tratamento zoológico às características humanas. A partir dele podemos dizer que se um ET biólogo chegasse ao nosso planeta, classificaria nossa espécie como “primata bípede pelado”, ou seja, nossa pele e nossa forma de locomoção são as características biológicas que nos diferenciam dos demais primatas. O fato de não sermos peludos como eles pode ser considerado a característica mais importante, pois a camada de pelos serve como isolante térmico, necessária para manter a temperatura interna do corpo em animais de sangue quente, como são os mamíferos. Além disso, os cabelos humanos têm importância estética e simbólica para praticamente todas as culturas e as características sexuais secundárias, envolvendo pelos em regiões específicas do corpo humano, exercem forte influência na atração entre os sexos.

As características diferenciadas de nossa espécie em relação aos pelos e pele, e sua conotação como caracteres sexuais secundários, são realmente impressionantes do ponto de vista de evolução biológica. Isso fez Darwin colocar a evolução humana num contexto separado da Ori-



gem das Espécies pela Seleção Natural, que foi tratada em seu livro de 1859. Darwin só se refere especificamente à Evolução Humana num livro publicado mais de 10 anos mais tarde (Darwin, 1871), em que focaliza “Seleção Sexual”, propondo que nossa evolução biológica inicial se deu nesse contexto. Darwin propôs também que a evolução das vocalizações humanas, sexualmente diferenciadas, ocorreu no contexto de seleção sexual, inclusive porque as vocalizações nos símios ocorrem precisamente no contexto de sinalização e disputas sexuais.

Essa proposta de Darwin não teve aceitação na época, e foi revista na síntese da moderna genética estabelecida nos anos 50. A seleção sexual é agora estudada na evolução de várias espécies biológicas, mas não costuma ser levada em conta com a ênfase dada por Darwin no caso da evolução humana.

A importância da pele e dos pelos no imaginário humano é porem imensa, mesmo que sua importância para a evolução biológica não seja em geral reconhecida. Essas características específicas da pilosidade, que variam conforme a raça humana considerada, devem ser de evolução recente, pois somos todos de uma única espécie biológica, bastante recente em termos evolutivos.

Mas com relação ao processo de redução dos pelos no corpo inteiro e mudanças profundas na estrutura da pele, e de toda a circulação sanguínea, bem como a evolução correlata da camada sub-cutânea de gordura, sobretudo nas fêmeas, a evidência aponta para uma evolução biológica muito antiga, perdendo-se nos mistérios de nossa origem.

Vou inicialmente discutir um pouco o que se conhece hoje sobre a evolução do bipedalismo e da redução dos pelos, para em seguida situar meus trabalhos sobre esse assunto. Reuno os fatos conhecidos na literatura a partir dessas duas vertentes, conforme discutido e referenciado em meus três trabalhos já mencionados.

### **Fatos conhecidos sobre a evolução dos bípedes pelados**

O feto humano tem uma camada de pelos que desaparece um pouco antes do nascimento, dando depois lugar ao “vellus”, pelos miniaturizados que recobrem o corpo da criança. A pele humana se caracteriza não apenas pela redução dos pelos, mas pelo aparecimento das glândulas sudoríparas, responsáveis pela grande capacidade de transpiração e suor humanos. A função do suor é permitir o resfriamento do corpo e usualmente se associa às condições de vida nas savanas. Mas, ao mesmo tempo, a exposição ao sol na savana é extremamente danosa para a pele, e a inexistência da camada isolante de pelos leva a uma grande absorção de calor pelo corpo. A pele nua facilita a dissipação do calor, mas não existe evidência de que a redução dos pelos possa ser correlacionada de forma simples e trivial com o ambiente quente. Os macacos que habitam as savanas são todos bastante peludos, e desenvolveram a capacidade de variar sua condutividade térmica, em vez de reduzirem os pelos.

Um artigo muito interessante (Newman, 1970) faz

uma análise dessas características, se perguntando por que o homem é um animal tão sedento e suarento, e conclui dizendo “o tempo e lugar óbvios onde uma denudação progressiva seria menos desvantajosa é o habitat da antiga floresta”.

O estudo da evolução física inicial de nossa linhagem faz parte da Antropologia Física, bastante interdisciplinar. As descobertas científicas, baseadas em fósseis de milhões de anos, atestam sem dúvidas a evolução biológica. Nossa linha evolutiva começa com primatas do velho mundo, sem rabo, e as espécies próximas à nossa que existem atualmente incluem gibão e orangotango, asiáticos, e também gorila e chimpanzé, africanos (Reynolds, 1967). Nossa espécie é geneticamente mais próxima dessas espécies africanas. Em inglês, essas espécies de primatas sem rabo, nossos parentes, são chamadas “apes”, enquanto os macacos com rabo são chamados “monkeys”. Em português não foi estabelecida ainda uma nomenclatura diferenciada, mas foi sugerido o uso de “símio” para “ape”.

Existe atualmente um consenso científico que coloca nossa forma de locomoção bípede como a mudança fundamental, ocorrida na diferenciação entre os demais primatas e a linha evolutiva que chega até o gênero *Homo*, ao qual pertencemos como espécie. Mas não existe consenso sobre a origem do bipedalismo.

As ideias especulativas popularizadas na segunda metade do século 20, enfatizando o papel da caça como atividade dos machos na evolução inicial de nossa espécie, foram abandonadas em função das pesquisas detalhadas efetuadas nas últimas décadas. Um volume especial da revista *Science* (nº 326, de 2 de outubro de 2009) traz 11 artigos sobre a descoberta do mais antigo e completo fóssil bípede, dando a visão atual sobre nossa evolução biológica. O aumento do cérebro, relacionado com atividades humanas diferenciadas, é uma característica que surge muito depois da diferenciação em relação aos demais primatas, no gênero *Homo*, cerca de 1,5 a 2 milhões de anos atrás. Mas o bipedalismo existe há muito mais tempo, quando o cérebro ainda era menor, similar ao dos chimpanzés, nossos primos filogenéticos. Fósseis com 3 a 4 milhões de anos já apresentam características bípedes, como o da famosa Lucy, classificada como *Australopithecus afarensis*, e da Ardi, ainda mais antiga, recentemente descrita. Os resultados mais recentes confirmam que a evolução biológica inicial, com o aparecimento do bipedalismo, ocorreu em ambientes mistos, na borda de florestas, com alimentação à base de vegetais.

Mas, ao contrário do andar bípede, que pode ser reconhecido nos fósseis, as alterações na pele e pelos não deixam registros fósseis. Assim, não é possível ainda definir exatamente quando essas alterações ocorreram, e a antropologia física focaliza muito mais a forma de locomoção. O que ocorreu na diferenciação das linhas evolutivas, nos separando dos demais primatas, ainda é um mistério!

### **Proposta que desenvolvo unindo bipedalismo e redução dos pelos**

Neste artigo vou dar minha proposta, que pode ser



Figura 1. (a) Macaco com rabo, carregando filhote na posição ventral. Figura de livre acesso tirada da internet [credito Corel Corporation, Ottawa, Canada]. (b) Gorila carregando filhote no dorso. Figura de livre acesso tirada da internet [<http://www.varbak.com/photo/baby-gorilla>].

resumida em poucas palavras: “Os primatas carregam suas crias agarradas nos pelos da mãe. Nós não temos pelos para os filhos se agarrarem, e, portanto, a única saída é carregarmos nossos filhos nos braços, o que exige que sejamos bípedes”.

Quando cheguei a esta explicação, que é em geral aceita sem maiores problemas por leigos, verifiquei que não existia como teoria científica, e comecei a pesquisar. Foram mais de 30 anos de pesquisa independente, que resultaram em três artigos científicos que publiquei em revistas especializadas (ver bibliografia no final). Fui ultrapassando a postura cética dos especialistas, principalmente dos homens especialistas, que acreditam que a evolução se fundamenta no comportamento dos machos humanos. Mas pretendo mostrar que não há como compreender a evolução biológica sem focalizar as fêmeas bípedes e sua relação com a maternidade.

Neste artigo não vou seguir a ordem cronológica dos trabalhos publicados, mas vou dar os argumentos numa sequência de mais fácil compreensão. Focalizo inicialmente o que se conhece sobre a forma como os primatas carregam suas crias e sobre a pilosidade em primatas, e em seguida faço um resumo do estudo que fiz e publiquei sobre as propriedades mecânicas dos pelos e condições de equilíbrio para o transporte seguro das crias. Finalmente, discuto o que se conhece sobre o ambiente em que a evolução inicial ocorreu, as correlações entre bipedalismo e reprodução, e a minha proposta explicando o mistério de nossa origem.

### Primatas carregam suas crias agarradas nos pelos

Todos os primatas superiores (exceto os humanos) carregam suas crias agarradas nos pelos do corpo de um parente adulto (em geral a mãe). Em algumas espécies de macacos das Américas o macho também carrega as crias, mas isso não ocorre com os primatas do Velho Mundo, dos quais descendemos. Nos símios de nossa linha evo-

lutiva é a mãe que carrega as crias, durante vários anos. Mesmo entre os gibões, monogâmicos, é a mãe que carrega as crias, sem auxílio do macho, e o mesmo ocorre nas espécies com outros padrões de relação entre os sexos (orangotangos, gorilas e chimpanzés).

Entre os primatas não humanos ocorre uma mudança na forma de carregar as crias à medida que elas crescem, e os dois padrões básicos são vistos na Figura 1. Os recém-nascidos são em geral carregados em contato com o ventre da mãe, ficando suspensos apenas pela sua capacidade de se agarrar nos pelos, e estes de suportarem o peso do recém-nascido. A figura 1(a) mostra uma espécie primata com rabo, bastante peluda, em que o filhote fica em posição ventral, de ponta cabeça. A fixação na mãe é dada pela capacidade preênsil (de agarrar e segurar) das mãos, pés e também do rabo do bebê, que se enrola no rabo da mãe. Após alguns meses, a cria muda de posição, passando a cavalgar o dorso ou o quadril da mãe, ainda agarrada aos pelos, e esta forma de locomoção permanece por longos períodos de tempo, até a cria se tornar independente. Mas existem algumas diferenças na forma de carregar as crias entre as várias espécies primatas.

A Figura 1 (b) mostra um gorila em locomoção quadrúpede típica (knuckle walking) em que os nós dos dedos das mãos são usados como apoio. Os braços são mais compridos do que as pernas, levando a um ângulo de inclinação, com dorso não horizontal. A cria vai montada no dorso, agarrando os pelos com as mãos, mas os pés não têm mais capacidade preênsil, devido à locomoção terrestre.

O método de carregar filhotes nas espécies asiáticas arbóreas de nossa linhagem (gibão e orangotango) é diferente da forma dos grandes símios africanos (gorila e chimpanzé). Os arbóreas carregam seus filhotes predominantemente de um dos lados da pélvis materna. Os gibões, menores (7 kg quando adultos) são muito peludos, o que dá segurança para carregar seus filhotes, leves, na sua vida arbórea acrobática. Os orangotangos, arbóreas mais

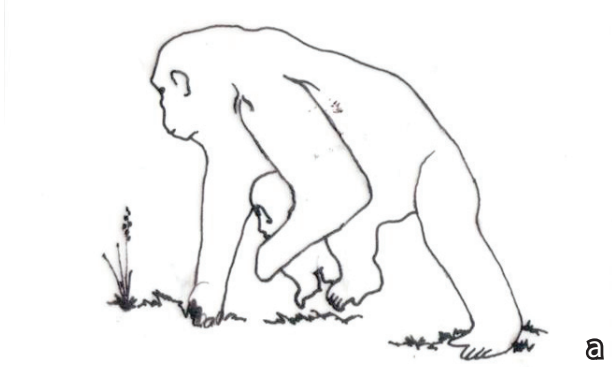


Figura 2. Mãe orangotango suspensa em árvore, mas segurando filhote com uma das mãos. Figura de livre acesso no site Arkive.

pesados (fêmeas e machos adultos com, respectivamente, 50 kg e 90 kg) têm uma cobertura peluda impressionante, com pelos muito longos, ainda que rarefeitos. Os filhotes de orangotango vivem com suas mães até completarem sete anos de idade. A Figura 2 mostra uma mãe orangotango suspensa numa árvore, mas segurando o filhote com uma das mãos.

Existe um problema específico para os grandes símios africanos terrestres, menos peludos, transportarem seus filhotes recém-nascidos, mais pesados e que não conseguem se sustentar sozinhos em posição ventral. Nos primeiros 1 ou 2 meses de vida, o bebê é suportado manualmente por sua mãe, que adota uma forma trípode de locomoção, apoiada nos dois membros traseiros e num dianteiro, usando o outro membro dianteiro para segurar a cria com uma das mãos. Essa forma de locomoção, bastante difícil, é usada sistematicamente por gorilas, mas também ocorre em chimpanzés, como pode ser visto na figura 3, em que uma mãe chimpanzé utiliza locomoção trípode carregando seu filhote com uma das mãos, em ambiente terrestre na figura 3(a) e em ambiente arbóreo na figura 3(b).

Mas após alguns meses, as crias, tanto de gorilas como de chimpanzés, passam para cima do corpo da mãe, que retoma a locomoção quadrúpede. As mães chimpanzés carregam suas crias de forma permanente durante os primeiros 2 anos de vida, e sempre que necessário para



locomoções maiores durante cerca de 4 anos. Foi visto em pesquisas de campo com chimpanzés que existem duas causas primárias de morte de crias de chimpanzés: inadequação da ligação mãe-criança e feridas devidas a quedas do corpo da mãe. As mães chimpanzés, como padrão, se locomovem lenta e cuidadosamente quando estão transportando suas crias.

A mudança da locomoção quadrúpede para trípode ou mesmo bípede ocorre sistematicamente entre os grandes símios quando a segurança da cria requer suporte manual. Está claro que a segurança no processo de carregar as crias leva a mudanças de forma de locomoção, dependendo do peso das crias, da capacidade dos pelos e da pele em aguentar a pressão e da capacidade preênsil das crias.

### Pilosidade dos primatas

A grande variabilidade nos pelos dos primatas desperta uma grande curiosidade. Um extenso trabalho foi feito nos anos 30 do século 20 (Schultz, 1931; 1968), medindo a densidade de pelos em várias espécies primatas. Os resultados em geral não dependem do sexo, mas variam com a região do corpo, com uma densidade maior na cabeça e menor na região ventral do que na região dorsal do tronco. A densidade de pelos no dorso de primatas varia de mais de 1000 pelos/cm<sup>2</sup> nas espécies menores (macacos com rabo e gibões) até cerca de 100 pelos/cm<sup>2</sup> nos grandes símios de nossa linha evolutiva (orangotangos, gorilas e chimpanzés).

Nos anos 80, uma análise desses resultados de densidade de pelos mostrou que existe um comportamento de escala, ou seja, a densidade relativa de pelos (definida como densidade de pelos dividida pela área total do corpo do primata) diminui em escala logarítmica com o aumento do peso do primata (Schwartz and Rosenblum, 1981). Essa lei de escala foi correlacionada com restrições térmicas impostas pelo decréscimo da razão entre a área da superfície do corpo e o volume do corpo. É por isso que os mamíferos muito grandes, como o elefante, têm poucos



Figura 3. (a) Mãe chimpanzé carregando seu filhote com uma das mãos, utilizando locomoção trípode terrestre. Desenho feito por João Carlos Terassi (IFUSP), a partir de foto de Jane van Lawick-Goodall, (Goodall van Lawick J. 1967). (b) Mãe chimpanzee carregando seu filhote com uma das mãos, utilizando locomoção trípode em galho de árvore. Desenho feito por João Carlos Terassi (IFUSP), a partir de foto de Jane van Lawick-Goodall, (Goodall van Lawick J. 1967).



pelos, mas têm um couro e não uma pele sensível.

As várias espécies de primatas apresentam, porém, desvios em relação a essa lei geral. Em particular, os chimpanzés têm uma densidade de pelos menor que a esperada, sendo praticamente igual à dos gorilas, que são, no entanto, maiores. Nossa espécie não pode ser colocada nessa lei geral, pois houve uma miniaturização dos pelos do corpo, além do aparecimento de pelos relacionados com o sexo dos adultos. Também nossa pele escapa totalmente da classificação biológica normal, tendo clara correlação com as zonas erógenas do corpo da mulher. Essa evolução diferenciada da pele e dos pelos humanos ainda não tem explicação, nem biológica nem antropológica.

### A mecânica do processo de carregar as crias nos primatas

A função dos pelos como suporte do processo de carregar as crias nos primatas não-humanos é crucial para a sobrevivência das espécies e existe também uma correlação com a variação da pilosidade nos primatas, mas nenhum estudo científico havia sido feito até então. No meu terceiro trabalho (Amaral, 2008) fiz uma análise mecânica detalhada do problema. Obtive amostras de peles com pelos de três espécies de primatas de nossa linha evolutiva: gibão, orangotango e gorila, com o objetivo de estudar os limites para carregar com segurança suas crias. Além de obter os parâmetros mecânicos dos pelos, fiz uma análise teórica do equilíbrio mecânico na locomoção quadrúpede dos gorilas. A Figura 4 mostra um desenho esquematizando a forma de os gorilas carregarem suas crias, com ângulo dorsal de inclinação  $\theta$ . O problema mecânico foi

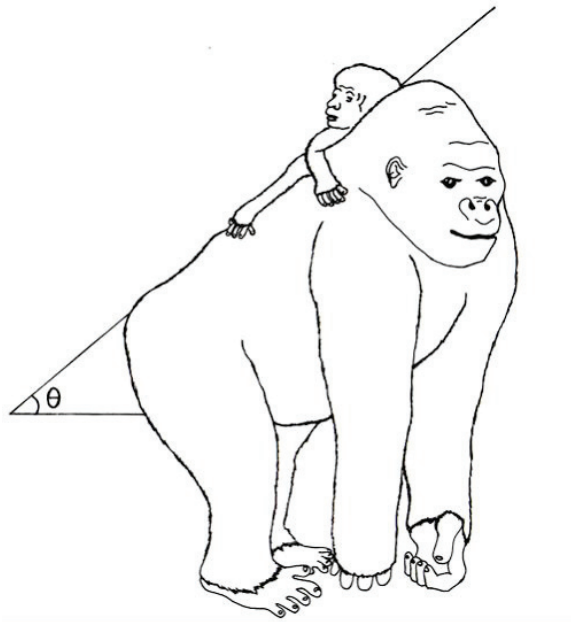


Figura 4. desenho esquematizando o problema de carregar filhote no dorso, com ângulo de inclinação  $\theta$  (teta). Feito por João Carlos Terassi (IFUSP) a partir de idéia da autora. O problema mecânico foi equacionado em termos de equilíbrio num plano inclinado, com parâmetros dados pelo peso suportado por pelos e pelo coeficiente de atrito para evitar escorregamento da criança.

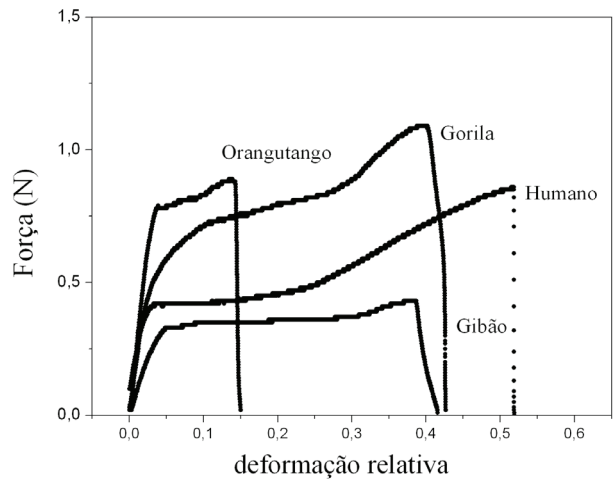


Figura 5. Curvas de elasticidade de pelos, mostrando a deformação (dada como fração do comprimento original) devida à aplicação de uma força (dada em Newtons) para três espécies de primatas e para cabelo humano. A subida inicial é linear, e define o limite elástico, seguido por uma parte plástica. O final da curva assinala a ruptura do fio.

equacionado em termos de equilíbrio num plano inclinado, com parâmetros dados pelo peso suportado que os pelos agüentam e pelo coeficiente de atrito para evitar escorregamento da cria.

O pelo animal é uma fibra composta de três partes, uma cutícula fina externa, um córtex com proteínas fibrosas (queratina) e uma medula central porosa. Os pelos de primatas que estudei, quando vistos no microscópio óptico, são similares aos da lã e de cabelos humanos. A figura 5 mostra curvas típicas de elasticidade para pelos das três espécies primatas e para cabelo humano. As curvas mostram a deformação (dada como fração do comprimento original) devida à aplicação de uma força (dada em Newtons), até que o fio arrebente. Existe uma região elástica inicial, que segue uma lei linear (de Hooke), até cerca de 1% de deformação, seguida de uma região plástica, que corresponde à alteração da conformação da molécula de queratina, e que é fortemente influenciada pela quantidade de água. A força necessária para arrancar os pelos da pele também foi medida, e é pouco superior ao limite elástico.

As diferenças entre as espécies são claras e a análise dessas curvas permitiu determinar o limite elástico, dando o peso suportado por um fio, o que depende de sua espessura. Foram medidos 10 pelos de cada espécie e os resulta-

Tabela 1. Resultados de medidas feitas em peles com pêlos de três espécies de primatas. O limite elástico obtido para o cabelo humano é  $29 \pm 2$  gf, intermediário entre o do gibão e o do gorila.

	Gorila	Gibão	Orang.
<b>Espessura da pele</b>	~ 1.5 mm	~ 0.6 mm	~ 2.3 mm
<b>Compr. do pelo</b>	~ 6 cm	~ 4 cm	~ 10 cm
<b>Diâmetro</b>	$66 \pm 2 \mu\text{m}$	$52 \pm 2 \mu\text{m}$	$120 \pm 4 \mu\text{m}$
<b>Limite elástico</b>	$39 \pm 3$ gf	$18 \pm 2$ gf	$50 \pm 2$ gf

dos estatísticos estão na Tabela 1, onde também constam o diâmetro e o comprimento dos pelos e a espessura da pele. Os valores medidos para os gorilas são intermediários entre os obtidos para o gibão e o orangotango. O valor para cabelo humano é intermediário entre os valores de gibão e gorila.

Os resultados mostram que os parâmetros mecânicos dos pelos dependem da espécie e têm significado evolutivo, correlacionado com a função dos pelos como suporte no processo de carregar as crias. Os pelos do orangotango são capazes de suportar um peso muito maior que os pelos do gorila, levando em conta não apenas a força elástica maior, mas também a diferença no comprimento dos pelos, oferecendo uma área maior para o filhote agarrar.

A conclusão é que um punhado com cerca de 100 pelos é necessário para aguentar o peso de uma cria primata de poucos quilos. As mãos da cria podem agarrar os pelos existentes em alguns  $\text{cm}^2$  de pele, de forma que a segurança no padrão usual dos primatas carregarem suas crias depende criticamente da densidade de pelos.

Além de medidas nos pelos individuais, testei a capacidade do conjunto de pelos em  $1 \text{ cm}^2$  de pele de gorila (da ordem de 140 pelos) em suportar peso, levando em conta inclusive sua fixação na pele, resultando em um limite máximo de  $1 \text{ kg/cm}^2$ .

A observação da locomoção nos símios africanos sugere que um peso de 5 kg pode ser considerado como o limite para suporte apenas por pelos e filhotes com peso maior exigem transporte dorsal, em que a cria se apóia no corpo da mãe. Por outro lado, tanto gorilas como chimpanzés carregam suas crias até elas atingirem cerca de 20 kg.

Além dessas medidas, o coeficiente de atrito para contato entre as peles com pelos foi obtido, com resultados compatíveis com o esperado em fibras naturais.

Com os valores obtidos, foi possível equacionar o problema de plano inclinado esquematizado na figura 4, obtendo-se a condição de equilíbrio  $\theta$  menor que  $30^\circ$ , acima do qual a combinação do peso suportado por fios com a força de atrito não consegue mais impedir o escorregamento da cria, levando à sua queda. Analisando fotos de símios, verifica-se que o ângulo de inclinação natural pode ser estimado como  $26^\circ$ , dentro do limite de equilíbrio mecânico.

O perigo de escorregar da mãe impõe restrições à forma de locomoção da espécie e o bipedalismo é incompatível com o processo usual de símios carregarem suas crias, agarradas aos pelos das mães. Além disso, os resultados que obtive mostram que o coeficiente de atrito diminui com a redução da umidade, chegando a diminuir 50% entre o estado úmido e o seco, pois o atrito entre os pelos é diferente do atrito entre superfícies sólidas. A redução de umidade pode destruir o balanço delicado de forças que seguram a cria por fricção, levando à necessidade de prolongar uma forma manual de segurar as crias.

Proponho que a linha dos símios asiáticos evoluiu na direção da pele e dos pelos tornarem-se mais fortes, para suportar o peso das crias na vida arbórea dos orango-

tangos, enquanto a linha dos símios africanos evoluiu na direção de redução dos pelos, junto com a vida terrestre.

Esses resultados não chegam a esclarecer completamente a evolução do bipedalismo, mas dão apoio à proposta de que essa forma de locomoção emerge ligada ao problema mecânico de carregar as crianças diante de um processo paralelo de redução dos pelos.

### **Ambiente da evolução inicial**

A discussão científica mais debatida em antropologia física diz respeito à definição da época e do ambiente em que ocorreu o início da evolução de nossa linhagem. Durante muito tempo foram focalizados os primeiros representantes do gênero *Homo*, que viveram nas savanas. Embora as informações tenham avançado muito, não existem bases para inferências sólidas sobre comportamento e estrutura social. Assim, os estudos se tornaram mais interessantes à medida que foram sendo descobertos fósseis muito mais antigos, de espécies já bípedes, mas anteriores às alterações no cérebro, vivendo em ambientes mais próximos da floresta ancestral. Na década de 80 foram levantadas hipóteses de que tanto o bipedalismo como a redução dos pelos tiveram início quando nossos ancestrais saíram da floresta e penetraram nas savanas, e que isso seria associado com adaptações ao ambiente quente. Foi inclusive proposto que a pele nua traria vantagens no que se refere a diminuir a necessidade de água, e que teria ocorrido só depois do bipedalismo. Questionei essa proposta e discuti a ambivalência entre vantagens e desvantagens da redução dos pelos e a questão do ambiente externo em que essa evolução biológica ocorreu no meu segundo trabalho (Amaral, 1996). A análise detalhada da questão mostra que a grande capacidade de suar dos humanos compensa a grande absorção de calor num ambiente com alta exposição solar. Com relação à necessidade de água, mostrei que a nudez só traz vantagens se a temperatura ambiente se mantiver menor que a temperatura do corpo. Isso não ocorre numa savana, que atinge temperaturas mais altas durante o dia.

A análise detalhada que fiz comparando quadrúpedes com bípedes, e também peludos com pelados, mostra que o caminho para a nudez existiu para quadrúpedes muito ativos vivendo num ambiente não muito quente, como é o caso de uma borda de floresta, onde ainda existe proteção contra a radiação solar direta. Ou seja, a redução dos pelos viria junto com a evolução do bipedalismo, e não depois dele. Um ponto importante a considerar na compreensão das alterações da pele e pelos é que os mecanismos de aclimatização ao exercício físico e ao calor são diferentes (Ebling, 1985), o resfriamento em ambientes quentes não é o mesmo problema que dissipar calor metabólico produzido por exercício temporário. O desenvolvimento das glândulas sudoríparas ocorre já nos grandes símios, portanto sua evolução se insere na evolução geral dos primatas e parece preceder o bipedalismo. Ebling ressalta que o desenvolvimento do suor junto com a redução na densidade de pelos fornece um mecanismo para dissipação do calor resultante de rompantes de ati-

vidade muscular. Uma particularidade da pele humana é um fornecimento de sangue acima do exigido pelo nosso metabolismo (Montagna, 1982; 1985). Comparando a pele humana com a dos símios, Montagna conclui que a redução de pelos nos humanos deve ter acompanhado a evolução do bipedalismo “pari passu” (passo a passo).

### Correlação entre Bipedalismo e Reprodução

Como discuti em meu primeiro trabalho (Amaral, 1989), a análise dos custos energéticos da locomoção bípede e quadrúpede nos primatas mostra que não existem restrições energéticas contra o bipedalismo. Mas a raridade do bipedalismo em mamíferos, o quadrupedalismo dos demais primatas e a evolução de uma forma bastante ineficiente de locomoção terrestre nos grandes símios africanos apontam para a existência de restrições ao bipedalismo. Essas restrições tornam-se claras quando se analisa a questão da reprodução e do parto, fortemente correlacionada com a postura e a locomoção (Robinson, 1972).

A forma de locomoção bípede exigiu mudanças na pélvis que se correlacionam com o processo obstétrico de reprodução, tornando o parto humano difícil. Embora o aumento do cérebro tenha intensificado essas dificuldades, é a forma bípede de locomoção a origem do problema, por exigir uma pélvis mais estreita. Existem desvantagens claras no que diz respeito à gravidez, ao parto e à sobrevivência do recém-nascido, e acredito que isso explique por que as demais espécies primatas não adquiriram a forma bípede como locomoção permanente, embora todos os primatas possam andar de forma bípede por curtos períodos de tempo.

A mortalidade materna (mortes relacionadas com a gravidez e o parto) e também mortes de crianças devido ao trauma do parto são problemas que acompanharam a evolução e a história da espécie humana até recentemente, persistindo ainda em muitas regiões.

Essas restrições ao bipedalismo relacionadas a problemas obstétricos não costumam ser levadas em conta nos modelos mais conhecidos de evolução humana, centrados em geral no comportamento dos machos. Mas existe uma análise detalhada do parto humano num contexto evolutivo (Rosenberg and Trevathan, 1995; 2003).

A proposta que desenvolvi analisa a correlação entre o sucesso reprodutivo e o bipedalismo, focalizando as fêmeas e a relação mãe-cria.

A evolução biológica darwiniana fundamenta-se na sobrevivência da espécie, proporcional à probabilidade de sobrevivência da geração seguinte, que depende do produto de vários fatores. Focalizei duas probabilidades (Amaral, 1989):

- sobrevivência da fêmea e seu feto da concepção até o período pós-natal (fator obstétrico)
- sobrevivência do recém-nascido durante a infância (fator pediátrico)

O bipedalismo não é favorecido no fator obstétrico. Assim, a mudança para o bipedalismo só pode ter ocorrido devido a um processo paralelo que afetou o fator pediátrico, mas que foi favorecido na locomoção bípede.

Minha proposta é que o processo de redução dos pelos foi o fator paralelo que levou ao bipedalismo, dando segurança ao transporte das crias nos braços de suas mães. Dessa forma é possível correlacionar o processo de redução dos pelos com o surgimento do bipedalismo, unificando os dois maiores mistérios da evolução física dos bípedes pelados, a partir da necessidade de carregar as crias.

Numa análise preliminar, baseada em estimativas de sobrevivência das mães e das crias, cheguei à conclusão de que o bipedalismo torna-se vantajoso quando a redução dos pelos leva a uma redução de cerca de 15% na sobrevivência das crias de chimpanzés, sem o bipedalismo (Amaral, 1989). Uma mudança para o bipedalismo ocorreria como uma consequência necessária do processo de redução dos pelos, numa competição entre as desvantagens do bipedalismo para as mães e as vantagens na segurança em carregar as crias.

Essa análise de probabilidades está focalizada na fêmea, porque nela estão as restrições ao bipedalismo. Como a forma de locomoção é uma característica da espécie, e não do sexo, é a pressão seletiva na fêmea que define a possibilidade de mudança para o bipedalismo. Mas existem detalhes que dependam do sexo, como a largura dos quadris, relacionada com a eficiência do andar bípede e com desvantagens obstétricas.

### Divergência de nossa linha evolutiva

Estamos agora em condições de começar a discutir, ainda que de forma hipotética, as circunstâncias em que pode ter ocorrido a divergência entre nossa linha evolutiva e a dos demais primatas, e também o tipo de estrutura social que existiria durante esse processo.

Além das características físicas já consideradas, existe uma modificação no registro fóssil da dentição que merece ser focalizada. Os caninos são menores, em ambos os sexos, já nos primeiros fósseis bípedes. Isso indica alterações nas relações sociais e sexuais, ainda não esclarecidas. Os primatas não humanos têm caninos grandes, e nas espécies com forte competição entre os machos existe dimorfismo sexual, ou seja, os machos têm caninos maiores que as fêmeas, além de terem peso maior que elas. Os gibões, monogâmicos e com defesa de território, não apresentam dimorfismo sexual, machos e fêmeas são do mesmo tamanho e ambos apresentam caninos grandes. Mas todos os grandes símios têm dimorfismo sexual acentuado, no tamanho do corpo e dos caninos, atribuído à seleção sexual.

A questão dos caninos grandes tem também forte apelo no imaginário humano, e os vampiros, atual febre do imaginário adolescente, por exemplo, se caracterizam por grandes caninos.

A diminuição dos caninos foi atribuída por alguns a uma possível monogamia original, mas isso contradiz tanto o dimorfismo no tamanho de machos e fêmeas *Australopithecus* como as características dos símios filogeneticamente mais próximos a nós.

Uma alternativa mais interessante foi proposta (Hutchinson, 1963), correlacionando a redução dos caninos



com mecanismos de apaziguamento nas competições intra-espécie, quando gerações sucessivas começam a coexistir no mesmo grupo. Foi enfatizada a inevitabilidade desse processo, principalmente se um processo de redução dos pelos já existir, aumentando o perigo das feridas causadas pelos caninos.

Dentro dessa perspectiva, propus no meu primeiro trabalho que o processo de redução dos pelos estaria ligado ao processo de redução dos caninos. Essa hipótese explicaria o resultado de lutas físicas reais substituírem os mecanismos de intimidação por posturas agressivas, bastante comuns nos demais animais, que em geral já definem o vencedor da contenda, evitando lutas reais (Amaral, 1989). Este processo levaria finalmente a formas específicas de comunicação sócio-sexual pelo toque e formas não triviais de coexistência social de adultos, características da linhagem humana.

É tentador fazer a hipótese de que a necessidade de resfriamento do corpo deriva da exacerbação de conflitos sócio-sexuais na transição de grupos com um único macho (em que machos adultos não se toleram, como ocorre nos gibões, orangotangos e gorilas) para grupos com vários machos, nos quais a promiscuidade é a solução trivial (como existe nos chimpanzés). É interessante notar que esse padrão de agressão primitiva, principalmente entre os sexos, existe nos filmes de ficção sobre nossas origens. E sabemos todos que na história da humanidade as guerras de poder e sexo são uma constante. As agressões intra-espécie são uma característica básica humana e são bem maiores do que entre outros animais.

Minha proposta leva a considerar as interações sócio-sexuais dentro da espécie como o fator determinante para a evolução, e o meio ambiente atua dando as condições de contorno em que essas interações dentro da espécie ocorrem. É uma visão do sistema sócio-sexual como um sistema de unidades interagentes, com condições de contorno definidas, como é considerado em sistemas estudados na Física.

Ou seja, desde nosso mais longínquo início nossa evolução se move na direção de conquistar o ambiente externo pela capacidade de moldar as interações dentro da espécie, adquirindo maleabilidade nessas interações.

Nossa linha evolutiva se desenvolveu tendo como condições de contorno as alternativas dos símios (monogamia, um único macho dominante, promiscuidade com vários machos), e diversas formas de relações entre os sexos são testadas nas civilizações humanas!

## Conclusão

Foram mais de 30 anos de pesquisa independente, em paralelo com minhas atividades de pesquisa em física, para chegar a uma proposta muito simples, que consegue fazer sentido inclusive para o público leigo. Mas que também tem lógica e rigor científico. O bipedalismo emerge como uma consequência necessária do processo de redução dos pelos, e mostrei que as propriedades físicas dos pelos variam com a espécie primata considerada, e se inserem num padrão evolutivo ligado à segurança em carregar as

crias de cada espécie. E a interação entre os sexos precisa se adaptar às exigências da ligação mãe-cria.

O que parece faltar para uma compreensão real de nossa evolução biológica é um investimento definido para descobrir a base genética das alterações na pele e pelos, e como ocorre sua regulação via hormônios. Sabemos que a forma de locomoção bípede tem substrato biológico e genético, mas também é um comportamento aprendido pelos humanos depois do nascimento. Já as características da pele dependem apenas dos genes e da regulação hormonal. As diferenças básicas entre os humanos e os demais primatas parecem estar localizadas realmente na pele humana, com todos os seus mistérios e conotação erótica.

Quanto ao problema de carregar crianças ao longo de nossa linha evolutiva, o mais provável é que inicialmente tenha sido uma tarefa exclusivamente das fêmeas, por milhões de anos, seguindo o padrão usual dos símios. Acredito, porém, que na emergência do gênero *Homo* ocorreram alterações específicas nas relações entre os sexos, que levaram a novas formas de relacionamento, junto com o aumento do cérebro. Em particular, o aumento de população deve ter sido definido pela possibilidade de diminuição do intervalo de nascimentos de uma mesma fêmea, o que só pode ter sido obtido pelo auxílio dos machos no transporte das crianças mais velhas. Um padrão de crianças pequenas carregadas nos braços de suas mães e de crianças mais velhas sendo carregadas nos ombros dos homens eretos é bastante provável, tendo em vista o que ocorre nas sociedades humanas primitivas.

Minha proposta corresponde, na verdade, a um retorno a Darwin e ao naturalismo do século XIX, mas integrando todo o conhecimento acumulado no último século. Na época atual os especialistas focalizam apenas os detalhes, sem chegar a uma visão de conjunto. Esta nova visão que apresento aqui, com um olhar feminino, ainda não alterou os modelos centrados na visão masculina, que permanecem dominantes. Mas é uma visão que se insere nas mudanças radicais que estão ocorrendo na humanidade, e que nos deixam perplexos, porque não temos ainda uma base para entender os novos rumos. O futuro está chegando, trazido pelas mudanças nas complexas relações sócio-sexuais de nossa espécie, que determinam nossa evolução!

## Agradecimentos

Agradeço aos amigos que leram este artigo, e me ajudaram a encontrar um tom de divulgação menos árido.

## Referências

- Amaral, L. Q. 1989. Early hominid physical evolution. *Human Evolution* (Firenze, Italy) 4:33-44.
- Amaral, L. Q. 1996. Loss of body hair, bipedality and thermoregulation. Comments on recent papers in the journal of human evolution. *J.Hum. Evol.* 30:357-366.
- Amaral, L. Q. 2008. Mechanical analysis of infant carrying in hominoids, *Naturwissenschaften*, 95 (4): 281-292. Pode ser baixado livremente da internet no site: <http://www.springerlink.com/content/q77m6056jm25230h/?p=ef0f6e>

70afa0472d97a9709c29b495d7&pi=1

- Darwin, C. 1871. *The descent of Man and Selection in relation to sex*. London: John Murray. 1st ed. (2 volumes). Tradução em português: *A Origem do Homem e a Seleção Sexual*, Hemus, São Paulo, 1974.
- Ebling, I. 1985. The mythological evolution of nudity. *J. Human Evolution*, 14: 33-41.
- Hutchinson, G.E. 1963. Natural selection, social organization, hairlessness, and the Australopithecine canine. *Evolution*, 17: 588-589.
- Goodall van Lawick J . 1967. Mother-offspring relationship in free ranging chimpanzees. In: Morris O (ed) *Primate ethology*. Aldine, Chicago, pp 287-346
- Montagna W. 1982. The evolution of human skin. In: Chiarelli AB, Corrucini RS (eds) *Advanced views in primate biology*. Springer, Berlin, pp 35-41
- Montagna W. 1985. The evolution of human skin (?). *J Hum Evol* 14:3-22
- Morris, D. 1967. *The Naked Ape: A Zoologist's Study of the Human Animal*. New York McGraw-Hill. Tradução em português: *O Macaco Nu*, ed. Rio de Janeiro: Record, 1967.
- Newman, R. 1970. Why man is such a sweaty and thirsty animal : a speculative review. *Human biology* 42: 12-27.
- Reynolds, V. 1967. *The apes*. Harper Colophon Books, New York.
- Robinson, J.T. 1972. *Early hominid Posture and Locomotion*. Chicago, The University of Chicago Press.
- Rosenberg, K.R. e Trevathan, W.R. 1995. Bipedalism and Human Birth: The Obstetrical Dilemma Revisited. *Evolutionary Anthropology* 4:161-168.
- Rosenberg, K.R. e Trevathan, W.R. 2003. The Evolution of Human Birth. *Scientific American* 13:80-85. Tradução em português : *A evolução do nascimento humano*, *Scientific American Brasil*. Pode ser baixado do site (visto em 16/8/2012): <http://www.icb.ufmg.br/lbem/aulas/grad/evol/humevol/evol-nasc-humano.html>
- Schultz, A.H. 1931. The density of hair in primates. *Hum Biol.* 3:303-321
- Schultz, A.H. 1968. The recent hominoid primates. In: Washburn SL, Jay PC (eds). *Perspectives on human evolution-1*. Holt, Rimehart and Winston, New York, pp 122-195.
- Schwartz, G.G. e Rosenblum, L.A. 1981. Allometry of primate hair density and the evolution of human hairlessness. *Am. J. Phys. Anthropol.* 55:9-12

# Locomoção terrestre e demanda metabólica: uma revisão histórica

Terrestrial locomotion and metabolic demand: a historical review

**José Guilherme Chaui-Berlinck**

*Departamento de Fisiologia, Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, Rua do Matão tr. 14, 321, 05508-090, São Paulo, SP, Brasil*

Contato do autor: jgcb@usp.br

**Resumo.** O estudo da locomoção em meio terrestre, ou seja, sobre um substrato sólido, trouxe dois grandes enigmas quanto à energética do deslocamento. Um destes diz respeito à existência de velocidades preferenciais de deslocamento para cada tipo de passada (andar, trotar, correr), e se tais velocidades estão relacionadas a uma economia de energia. O segundo diz respeito ao que causa a demanda energética para o deslocamento, pois, supostamente, a energia cinética vertical do centro de massa é convertida a potencial, e vice-versa, além de não haver uma movimentação do substrato como ocorre no nado e no vôo. O presente artigo apresenta, sob o viés do autor, um apanhado cronológico de 40 anos de pesquisa na área, com os resultados e interpretações dadas no que tange aos dois enigmas acima citados.

**Palavras-chave.** *Energética; deslocamento; velocidade preferencial; aparelho locomotor; sistema músculoesquelético.*

**Abstract.** The studies of terrestrial locomotion, that is, to move using a solid substrate basis, brought out two grand energetics puzzles. One is in regard of the existence of preferential speeds in each stride (walk, trot, run), and whether these speeds are related to some economy in energy. The other is related to the very nature of the energy demand during locomotion, since it is assumed that kinetic and potential energies of the center of mass interchange into each other. Besides, in opposition to flight and to swim, there is no movement of the substrate itself. The present manuscript presents, under the bias of the author, a chronological review of 40 years of research in the area, covering topics regarding the two enigmas cited above.

**Keywords.** *Energetic; displacement; preferential speed; locomotor apparatus; locomotor system.*

Recebido 22mar12

Aceito 11abr13

Publicado 15jan14

## Introdução

É notado que vertebrados se deslocam com velocidades preferenciais dentro de um determinado padrão de passada, como, por exemplo, trote ou galope, e que, aparentemente, estas velocidades são as que minimizam o gasto energético do deslocamento. Mais ainda, existe uma relação linear entre a velocidade de deslocamento e o gasto metabólico.

Curiosamente, por outro lado, a que se relaciona o gasto para deslocamento no substrato terrestre não é completamente claro. Enquanto que a locomoção em substratos fluidos, i.e., ar ou água, implica em causar o deslocamento de uma massa do meio, e, portanto, identifica-se para onde a energia foi transferida, no caso do substrato sólido tal identificação não é patente. Além disso, a energia para elevar o centro de massa a cada passada é devolvida ao sistema nos intervalos nos quais o centro de massa desce e, desta forma, também aí não parece residir o cerne do gasto metabólico para o deslocamento.

O presente artigo pretende apresentar, de maneira

cronológica, uma série histórica de mais de 40 anos de estudos relacionados a estes problemas, dentro de uma perspectiva comparativa, na busca de uma explicação para as relações de custo metabólico, velocidade e tamanho corpóreo para o deslocamento em substrato sólido.

## 1968

Um dos primeiros estudos que parece ter trazido à tona a questão da velocidade preferencial de locomoção foi o de Menier e Pugh, em 1968. Neste estudo, os autores mediram o consumo de oxigênio em cinco atletas enquanto estes se locomoviam a diferentes velocidades, sendo que os deslocamentos eram andando ou correndo (Figura 1).

Na maioria dos animais, e, particularmente, em aves e mamíferos, a energia dos alimentos é transferida aos processos orgânicos utilizando oxigênio. Desta maneira, em grande parte das situações, a medida do consumo de oxigênio por um organismo é uma estimativa de seu gasto energético, sendo denominada por calorimetria indireta.

No experimento realizado por Menier e Pugh, nota-



-se que a transição do andar para o correr acontece na velocidade na qual o gasto energético dos dois tipos de passada é similar, sendo que, em velocidades mais baixas que esta, correr seria mais custoso que andar e, em velocidades mais altas, andar se torna mais custoso que correr (Figura 1). Isto sugere que, de alguma maneira, os sistemas de controle orgânicos possam perceber a velocidade na qual deva ser efetuada a transição entre os tipos de passada.

Desta forma, o estudo em seres humanos abriu duas questões. Uma relacionada a porque as diferentes passadas teriam gastos diferentes. Outra relacionada a como o organismo detecta a velocidade para transição.

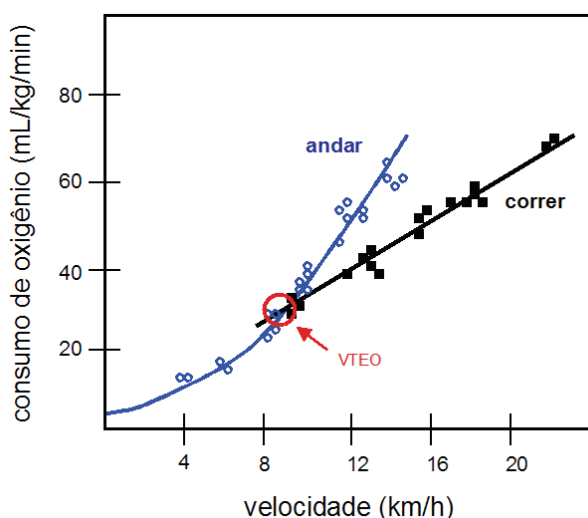


Figura 1. Consumo de oxigênio em função da velocidade de locomoção. Os dados foram obtidos em cinco atletas masculinos. Em azul, dados para o andar. Em preto, dados para o correr. As linhas são, apenas, ilustrativas, pois não foi feito nenhum ajuste estatístico no original. Note a velocidade na qual andar e correr têm gasto energético similar (ao redor de 10 km/h, círculo vermelho). Esta velocidade será denominada, em anos mais adiante, por Velocidade de Transição Energeticamente Ótima (VTEO). A figura foi elaborada com base na figura apresentada em Menier e Pugh, 1968.

## 1981

Hoyt e Taylor, em 1981 publicam um estudo, semelhante ao de Menier e Pugh citado acima, porém utilizando cavalos treinados a se locomover com diferentes tipos de passada (andar, trotar, galopar) sobre esteiras rolantes. O gasto energético foi contabilizado, através do consumo de oxigênio, para diferentes velocidades nas diferentes passadas. Em escala ampla, o gasto energético manteve uma relação linear com a velocidade de deslocamento, apesar de que, dentro de cada tipo de passada, afora correr, o consumo de oxigênio tem uma faixa de variação não linear (Figura 2A). Por outro lado, quando os resultados são expressos em gasto por unidade de distância percorrida, emerge, claramente, a relação não linear entre a demanda energética nos diferentes tipos de passada (Figura 2B), à semelhança do obtido para humanos (descrito na seção anterior).

A partir destes resultados, os autores concluem que cavalos, assim como humanos, mudam de passada e selecionam velocidades dentro de cada tipo de passada de modo a minimizar o gasto energético. Neste contexto, citam que observações de manadas em deslocamento sugerem que tal tipo de fenômeno possa ser de caráter geral em animais terrestres.

Num outro enfoque, considerando o gasto energético em larga escala, Hoyt e Taylor concluem que parece ser útil continuar a usar uma relação linear única para a relação entre o consumo de oxigênio e a velocidade de deslocamento em estudos comparativos da energética da locomoção. Assim, as questões surgidas com o estudo de Menier e Pugh continuam abertas, e agora se estendem a um grupo maior de animais.

## 1982

O grupo de C. R. Taylor publica, no ano de 1982, um conjunto de 4 artigos sob o tema “Energética e Mecânica da Locomoção Terrestre”. O primeiro destes artigos, acerca do consumo de energia como uma função da velocidade e do tamanho corpóreo em aves e mamíferos, é dedicado à questão de que a energia consumida pelos músculos na corrida é utilizada na transformação de energia química em mecânica (Taylor et al., 1982).

A.V.Hill, ganhador do prêmio Nobel de 1922 junto a Otto Fritz Meyerhof pelos trabalhos relacionados à energética da contração muscular, apresentou, na década de 1950, um conjunto de análises quanto à locomoção. O estudo do grupo de Taylor toma tais análises como ponto de partida. Nestas, Hill define que há três propriedades básicas de músculos esqueléticos independentes de tamanho corpóreo: (1) força máxima por área de seção; (2) trabalho máximo por unidade de massa; (3) eficiência máxima na conversão de energia. Hill conclui, segundo citado no estudo de Taylor e colaboradores, que animais pequenos devem consumir mais energia por unidade de massa para manter uma mesma velocidade que um grande, pois cada grama consome o mesmo e realiza o mesmo trabalho, mas o pequeno tem que dar muito mais passos. Taylor e seus associados, Heglund e Maloiy, têm, então, como objetivos, estender a análise a uma ampla variação de massas corpóreas e velocidades de deslocamento e obter um modelo de escala da relação “energia x massa x velocidade”.

A partir de dados obtidos para mamíferos e aves de deslocamento terrestre (ou seja, não se trata de voo), com massas corpóreas da ordem de  $10^1$  a  $10^6$  gramas, os autores estabelecem a seguinte relação entre demanda metabólica ( $\dot{E}_{metab}$ , em unidades de watts), massa corpórea ( $M_b$ , em kg) e velocidade ( $u$ , em  $m \times s^{-1}$ ):

$$\frac{\dot{E}_{metab}}{M_b} = 10,7 \cdot M_b^{-0,316} \cdot u + 6,03 \cdot M_b^{-0,303} \quad (1)$$

O segundo termo do lado direito da equação (1) representa a taxa metabólica basal. O primeiro termo é o que contém a relação do gasto energético com a velocidade. Como preconizado no estudo de Hoyt e Taylor, 1981, citado anteriormente, tal relação se apresenta como linear.

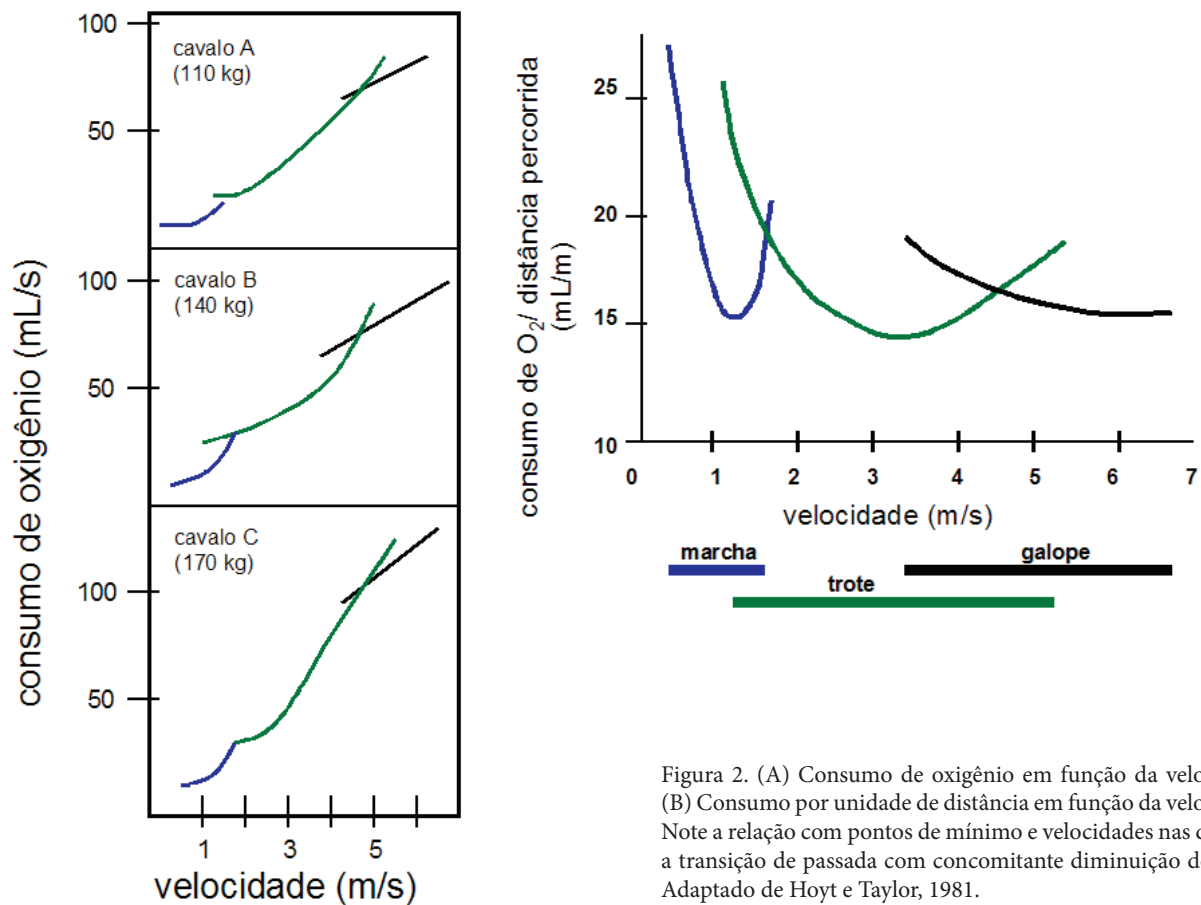


Figura 2. (A) Consumo de oxigênio em função da velocidade. (B) Consumo por unidade de distância em função da velocidade. Note a relação com pontos de mínimo e velocidades nas quais há a transição de passada com concomitante diminuição do gasto. Adaptado de Hoyt e Taylor, 1981.

A demanda metabólica está expressa, na equação (1), por unidade de massa corpórea (i.e.,  $\dot{E}_{\text{metab}}/M_b$ ). Note que, portanto, o custo para locomoção, *por unidade de massa*, se torna menor para animais maiores, dado o expoente negativo da massa corpórea (-0.316). Tal resultado confirma a previsão de A. V. Hill acerca de que animais menores têm um custo proporcionalmente maior para se locomover.

Utilizando os dados da demanda energética na transição entre o trote e o galope para os animais de diferentes tamanhos, o grupo obteve mais um importante resultado, ilustrado através da Tabela I. Nesta tabela, nota-se que a demanda energética na transição entre passadas é aproximadamente a mesma, independentemente da massa corpórea (última coluna): algo ao redor de 5 joules por passo por kg. Portanto, A. V. Hill fez uma previsão corre-

ta: a eficiência da contração muscular é independente do tamanho corpóreo (veja, contudo, mais abaixo).

Através deste valor constante de 5J/kg/passos, obtido na transição entre o trote e o galope, os autores definem o que chamam de “velocidade fisiologicamente equivalente”. Esta velocidade seria, então, a velocidade na qual haveria uma similaridade no processo de locomoção, independentemente de tamanho, e permitiria comparações adequadas.

Um segundo artigo, de 1982, intitulado “Mudanças de energia cinética dos membros e corpo como função da velocidade e tamanho em aves e mamíferos”, Fedak e colaboradores examinam a hipótese formulada por Hill (1950), Gray (1968) e Hildebrand (1974) – ver estudos citados por Fedak et al. (1982) –: a maior parte da energia consumida para manter uma velocidade constante é

Tabela I. Energia consumida por passo por unidade de massa para quadrúpedes de diferentes tamanhos na velocidade de transição trote-galope (adaptada de Taylor et al., 1982).

Massa corpórea (kg)	Velocidade na transição trote-galope (m/s)	Frequência de passos na transição trote-galope (passos/s)	Energia metabólica consumida por kg por passo (J/kg/passos)
0.01	0.51	8.54	5.59
1.00	1.53	4.48	5.00
100	4.61	2.35	5.53

utilizada para mover os membros em relação ao tronco. O que se busca é a relação linear do consumo de energia com a velocidade e a diminuição do custo específico de transporte com o aumento da massa corpórea, resultados oriundos do estudo anterior (ver equação (1)).

Dada a hipótese de que a energia consumida seria para manter a movimentação dos membros em relação ao tronco, a potência consumida seria proporcional à velocidade elevada a um certo coeficiente  $k$ , e o valor de  $k$  estaria entre 2 e 3. Para testar a hipótese, bem como obter dados a respeito da energia cinética dos membros durante a locomoção, foram utilizadas setes espécies, com massa corpórea entre 44g e 98kg. Os animais foram treinados a correr em diferentes velocidades e foram filmados e a energia cinética estimada a partir de pesagens de secções.

A relação obtida para a taxa de variação da energia cinética total em relação à velocidade foi a seguinte:

$$\frac{\dot{E}_{KE,tot}}{M_b} = 0,478 \cdot u^{1,53} \quad (2)$$

(as unidades são as mesmas da equação (1)). Desta maneira, nota-se que a relação não é linear e, portanto, não é a energia cinética dos membros (em relação ao tronco) que explica a linearidade da demanda metabólica com a velocidade. Mais ainda, o coeficiente de 1,53 se encontra fora da faixa prevista por Hill, Gray e Hildebrand, o que reforça a idéia de que não é a energia cinética, isoladamente, o principal componente da demanda metabólica para locomoção.

Num terceiro estudo publicado (Heglund et al., 1982a), o grupo aborda o trabalho requerido para elevar e reacelerar o centro de massa durante um passo -  $E_{CM,tot}$ . A seguinte relação foi obtida:

$$\frac{\dot{E}_{CM,tot}}{M_b} = 0.685 \cdot u + 0.072 \quad (3)$$

A relação, apesar de linear, não explica a relação da demanda total com a massa corpórea (equação (1)).

A partir dos resultados, os autores chegam a um conjunto de conclusões.

O andar de pequenos bípedes utiliza mecanismo similar ao pendular de grandes animais, e há até 70% de reaproveitamento da energia mecânica. O correr de pequenos quadrúpedes tem mesma relação força-velocidade que o de grandes. Há, contudo, uma importante diferença, que é a recuperação de energia. Como os quadrúpedes pequenos aterrissam com os membros dianteiros e se lançam com os traseiros, pouca energia pode ser reaproveitada.

Quanto ao componente da energia relacionada ao centro de massa, concluem que a  $E_{CM,tot}$  cresce linearmente com a velocidade, porém seu incremento não explica as relações de escala do custo metabólico total. Por unidade de massa, a relação da  $E_{CM,tot}$  com a velocidade é independente da massa corpórea (equação (3)). Desta maneira, o aumento da amplitude de oscilação de energia do centro de massa com o aumento do tamanho é compensado por uma diminuição na frequência das passadas.

No último dos artigos publicados nesta série no Journal of Experimental Biology (Heglund et al., 1982b),

o grupo se dedica às mudanças de energia mecânica total. Partindo do pressuposto de que a energia mecânica total ( $E_{mec}$ ) é a soma de três componentes, i.e., a energia cinética dos membros, a energia do centro de massa e a energia elástica dos elementos músculo-esqueléticos, os autores tecem as seguintes considerações:

Músculos antagonistas são responsáveis por menos de 15% do trabalho total

Perdas pela viscosidade do ar são desprezíveis

Perdas por fricção contra o solo são nulas

A eficiência muscular é a razão  $E_{mec}/E_{metab}$

Se os músculos operam numa eficiência ótima, então  $E_{mec} \propto E_{metab}(M_b, u)$

Os autores afirmam que o componente elástico músculo-esquelético não é simples de ser mensurado diretamente. Então, irão partir do pressuposto de que este componente é nulo e que, portanto, toda a energia mecânica provem da obtenção química direta, sem acúmulo elástico para reaproveitamento. Os resultados obtidos para a eficiência mecânica da locomoção estão ilustrados na Figura 3. Nota-se, portanto, que a eficiência é maior para animais maiores e que tal eficiência varia com a velocidade. Portanto, de fato, A.V.Hill chegou à conclusão certa (a respeito do trabalho muscular máximo por passada por massa) por vias erradas: a eficiência não se mantém constante. Animais menores parecem acumular menor quantidade de energia elástica no sistema músculo-esquelético - as causas precisam ser melhor exploradas.

Assim, os autores concluem:

- A força muscular para aumentar a velocidade precisa ser gerada e decair mais rapidamente : isto é obtido pelo recrutamento de fibras rápidas com ciclagem mais rápida das pontes cruzadas

- Animais menores têm uma maior quantidade de fibras rápidas: isto poderia ajudar a explicar o expoente -0.3 (veja equação 1) de escala com a massa corpórea no

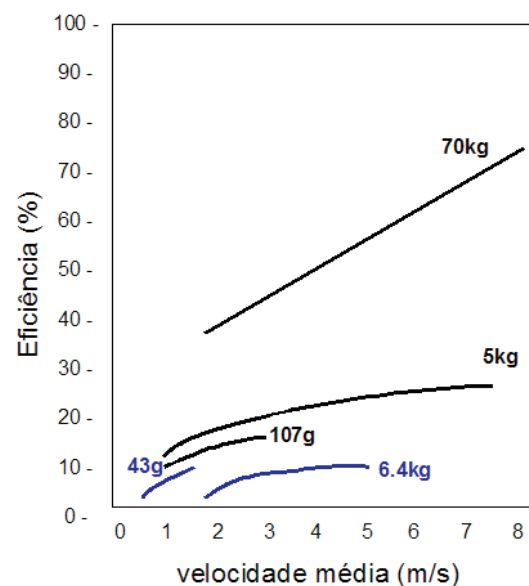


Figura 3. Eficiência mecânica em função da velocidade para animais de diferentes massas corpóreas (indicadas na figura). Em azul, aves, em preto, mamíferos. Adaptado de Heglund et al., 1982b, citado anteriormente.



custa de locomoção

- Em contrações isométricas, mais de 30% da energia é gasta no bombeamento de  $Ca^{++}$ : se tal custo for o mesmo para cada contração por grama de músculo então há um aumento de demanda com velocidade e massa paralelo à frequência de passadas

Como ápice desta série de estudos, os autores concluem que a taxa de geração de energia mecânica não parece explicar a relação de velocidade e massa corpórea com a demanda metabólica da locomoção (Heglund et al., 1982b). Ou seja, os autores concluem que ainda não conseguiram estabelecer uma relação causal para a relação expressa pela equação (1). Os autores sugerem que os custos de ativação muscular e geração de força possam ser os fatores explicativos, mas o tema fica aberto para estudos posteriores.

### 1985 -1989

Em 1985, Myers e Steudel voltam a abordar a questão da energia cinética dos membros em relação ao tronco. Consideram importante variar as características inerciais dos membros, mantendo os demais fatores relacionados à energética da locomoção, constantes. Desta forma, medem o consumo de oxigênio em seres humanos com alterações da massa de membros, centro de massa e momento de inércia, visando discriminar o efeito de cargas no custo de elevar e acelerar o centro de massa do efeito no custo de acelerar e desacelerar os membros.

Os autores notam que há um progressivo aumento da demanda metabólica conforme a carga é colocada mais distalmente nos membros (entre a cintura pélvica e o tornozelo), e o mesmo vale em relação à massa adicionada (Figura 4). Portanto, diferentemente das conclusões do grupo de Taylor em 1982, concluem que o custo para acelerar e desacelerar os membros tem uma alta relevância no custo total da locomoção em função da velocidade.

Em 1988, Perry e colaboradores, entre os quais se encontram Heglund e Taylor, procuram abordar a seguin-

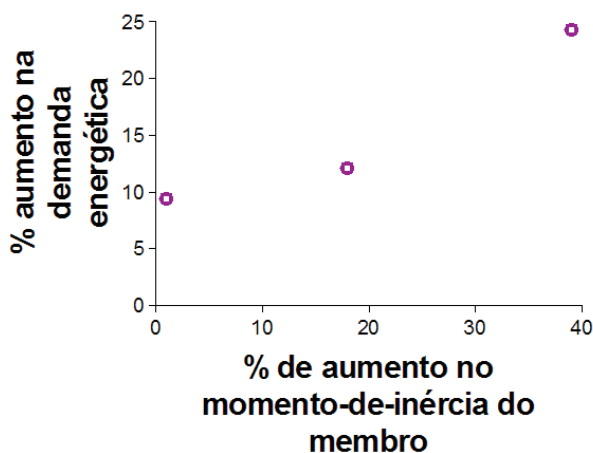


Figura 4. Aumento percentual da demanda energética em função do aumento percentual de massa nos membros. Note como a demanda tem um importante componente oriundo da energia cinética dos membros. Adaptado de Myers e Steudel, 1985.

te problemática: por que existem as velocidades preferenciais nos diferentes animais? Para tentar elucidar a questão, fazem medidas em plataforma de força e filmagem da movimentação do membros com o objetivo de estimar as forças presentes nos músculos.

Os resultados obtidos indicam que, nas velocidades preferenciais, o estresse muscular equivale a 1/3 do estresse isométrico máximo que o músculo sustenta (Figura 5). Assim, os autores sugerem que este fator (1/3) seja a referência para o controlador, resultando, então, na velocidade preferencial de cada animal, apesar de que possam manter picos semelhantes ao isométrico em máxima velocidade. Sugerem, ainda, que isto seja um fator de segurança para permitir o uso prolongado do sistema locomotor.

Ainda em 1988, Heglund e Taylor publicam um outro artigo, desta vez com os objetivos de estudar como a faixa de velocidades muda com a massa corpórea em dois quadrúpedes em trote e galope, como a frequência de passos muda com a velocidade e como a frequência muda com a massa corpórea em valores equivalentes de velocidade numa dada passada.

Nas velocidades preferenciais equivalentes, apesar de que a taxa de trabalho mecânico por unidade de massa ser a mesma, os animais menores consomem muito mais energia pois a frequência de passos é muito maior. Estes são resultados oriundos de estudos anteriores, já mencionados. Além disso, o custo para gerar força (por unidade de tempo, por unidade de massa) é proporcional à velocidade de encurtamento e independente do trabalho

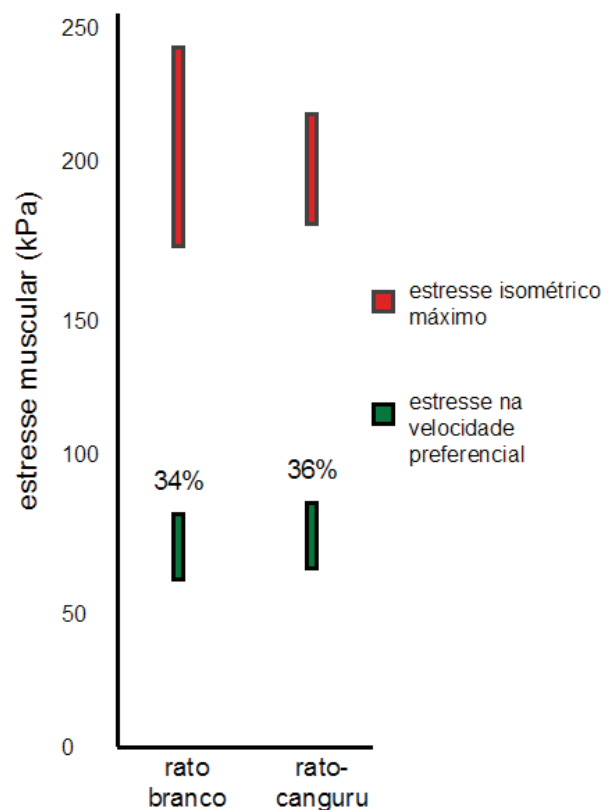


Figura 5. Estresse muscular (em kPa) no rato branco e no rato-canguru medidos na velocidade preferencial de deslocamento (verde) e na condição de esforço isométrico máximo (vermelho).

realizado pelo músculo. Desta maneira, Heglund e Taylor (1988) colocam, como hipótese, que os custos para ativar os músculos e para gerar uma unidade de força em uma unidade de tempo numa unidade de massa são diretamente proporcionais à frequência de passos nas velocidades equivalentes.

Os resultados indicam que as velocidades preferenciais são proporcionais à massa corpórea elevada ao expoente de 0,21, enquanto a frequência de passos é proporcional à massa elevada a -0,14. Afora a velocidade mínima de trote, as demais velocidades têm um gasto por passo e por unidade de massa que é independente da massa corpórea. Logo, o gasto total se torna linearmente dependente da frequência de passos do animal.

Combinando as escalas da velocidade preferencial com a de frequência de passo, obtém-se:

$$\text{distância (m) por passo} \propto M_b^{+0.33}$$

Ou seja, a distância percorrida por passo é, na velocidade preferencial, linearmente proporcional ao tamanho linear do animal (e.g., altura).

Concluem, então, que, de fato, parece ser o custo associado a ativar/desativar o músculo (potenciais de ação, bombas de  $\text{Ca}^{++}$  e  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ ) e para gerar força (formação/desligamento das pontes cruzadas actina-miosina) o responsável pelo aumento do gasto com a frequência de passos.

#### 1990 - 1994

Karen Steudel, em 1990, volta a abordar a questão do custo para movimentação dos membros, em dois estudos. No primeiro (Steudel, 1990a), através da colocação de massas tanto no dorso quanto nos membros, a autora obtém que a adição da massa nos membros causa uma elevação na demanda proporcionalmente maior que a adição ao dorso. Desta maneira, volta a insistir que o custo para movimentação dos membros em relação ao tronco é um componente importante na demanda total da locomoção.

No segundo estudo (Steudel, 1990b), a autora divide o trabalho mecânico em dois componentes, o interno e o externo ( $W_{\text{mec}} = W_{\text{ext}} + W_{\text{int}}$ ). O trabalho externo é o trabalho para elevar e acelerar o centro de massa. O trabalho interno é o trabalho para mover os membros em relação ao centro de massa. Como obtido pelo grupo de Taylor, em 1982,  $W_{\text{ext}}$  e  $E_{\text{metab}}$  são lineares com a velocidade (equações (1) e (3)). Este mesmo grupo ressaltou, ainda, que o  $W_{\text{int}}$  é não linear com a velocidade (equação (2)), mas, no estudo do grupo (Fedak et al., 1982) o trabalho interno não se mostrou relevante no custo total da locomoção. A autora coloca, então, como hipótese, que o trabalho interno (i.e., mover os membros em relação ao centro de massa) é substancial, porém desacoplado do trabalho total em uma faixa de velocidades.

Nos seus experimentos de 1990, Steudel utiliza cães com diferentes massas adicionadas tanto ao dorso quanto aos membros, e os animais correm em diversas velocidades. Os experimentos foram elaborados de maneira a diferenciar entre um baixo custo de trabalho interno ( $C_{\text{int}}$ ), mensurado através da medida direta do consumo de oxigênio

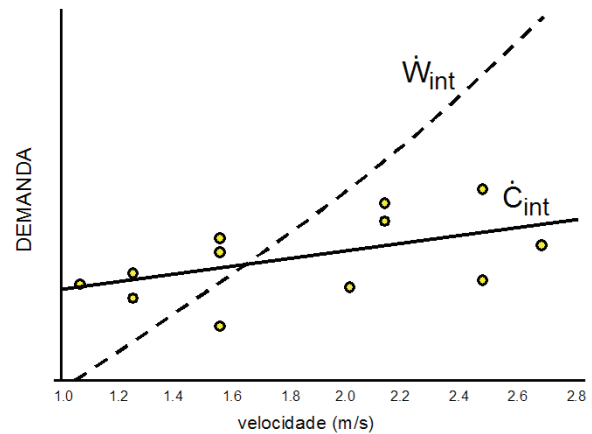


Figura 6. Demanda energética em função da velocidade. O custo do trabalho interno ( $C_{\text{int}}$ ), medido através do consumo de oxigênio, é representado pelos círculos amarelos (dados empíricos). A linha cheia representa um ajuste, cuja inclinação não é significativamente diferente de zero. A linha tracejada é a estimativa, feita através da equação (2), do trabalho interno. Note que os dados não são adequadamente descritos através da função  $W_{\text{int}}$ . Adaptado de Steudel, 1990b.

do animal, e um desacoplamento entre o custo e este trabalho ( $W_{\text{int}}$ ), estimado através de equações de mecânica. A Figura 6 ilustra os resultados obtidos. Como o custo da massa adicionada é o mesmo para todas as velocidades, então a morfologia do membro não afeta o custo de transporte, apenas o gasto total a uma dada velocidade. Segundo a autora, somente um desacoplamento é compatível com os resultados apresentados. Assim, a diminuição relativa do  $C_{\text{int}}$  com o aumento da velocidade implica na possibilidade do uso de fontes “não-metabólicas” de trabalho, como, por exemplo, o armazenamento e liberação de energia elástica. Ou seja, o componente elástico do trabalho mecânico, componente este nunca medido diretamente (ver Heglund et al., 1982b, citado acima), parece ser de importância não desprezível.

Em 1993, Farley, Glasheen e McMahon apresentam um estudo intitulado “Molas corredoras: velocidade e tamanho animal”. Os objetivos dos autores foram o de examinar como as propriedades do sistema massa-mola mudam com a velocidade do trote e dos saltos (hopping) e o de examinar como as propriedades do sistema massa-mola variam em função do tamanho corpóreo. Note, assim, que, agora, já se toma, por certo, que existe um componente elástico relevante na locomoção.

Os autores estabelecem o que chamam de constantes de mola ( $k_i$ ): uma,  $k_{\text{vert}}$ , para o componente vertical de deslocamento do centro de massa entre o ápice do arco descrito durante a passada e o nadir; outra,  $k_{\text{perna}}$ , para o encurtamento da perna entre o nadir do arco e a posição em repouso (ver Figura 7). Estas constantes e o ângulo descrito pelo membro são medidos durante a locomoção em diferentes velocidades por mamíferos de diferentes espécies.

A partir dos resultados, os autores chegam à conclusão de que, no que tange à velocidade, o sistema opera através do aumento do ângulo coberto pela perna durante

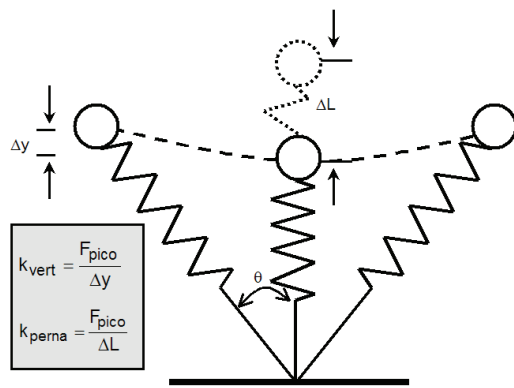


Figura 7. Esquema de pêndulo-mola utilizado como modelo de membros durante a locomoção (Adaptado de Farley et al., 1993).  $\Delta L$  representa a compressão da perna e  $\Delta y$  a variação de altura do centro de massa durante a passada.  $\theta$  é o ângulo coberto pela perna com a vertical.

o contato com o solo, mas com constante de mola  $k_{\text{perna}}$  fixa. Em outras palavras, a razão força de pico e  $\Delta L$  não varia. Por outro lado, o aumento do ângulo  $\theta$  leva a uma diminuição na curvatura, de concavidade voltada para cima, do arco descrito pelo pêndulo, diminuindo, assim,  $\Delta y$ . Isto, associado ao aumento de  $F_{\text{pico}}$  (descrito acima), resulta num incremento da chamada constante vertical, levando a uma diminuição do tempo de contato com o solo.

Nas relações de escala com o tamanho corpóreo (massa), na velocidade preferencial de deslocamento de cada animal, os ajustes estatísticos resultam nas proporcionalidades reportadas na Tabela II. Nota-se, portanto, que a força de pico mantém uma relação praticamente linear com a massa corpórea e as constantes de mola escalam com expoente  $\approx 2/3$ . Na velocidade preferencial de deslocamento, o ângulo coberto pelos membros é independente da massa corpórea (i.e., expoente próximo a zero).

O tempo para contato dos pés com o solo escala numa razão proporcional a  $M_b^{0,19}$ , e a potência gerada pela mola escala proporcionalmente a  $M_b^{0,11}$ . Quando os autores calculam o meio-período de ressonância dos sistemas,

Tabela II. Relações de escala com a massa corpórea na velocidade preferencial de deslocamento. Dados de Farley et al., 1993.

Componente	Razão de escala com a massa corpórea
Força de pico	$M_b^{0,97}$
$\Delta L$	$M_b^{0,30}$
$\theta$	$M_b^{-0,03}$
$k_{\text{perna}}$	$M_b^{0,67}$
$k_{\text{vert}}$	$M_b^{0,61}$
tempo de contato	$M_b^{0,19}$
$\dot{W}_{\text{mola}}$	$M_b^{0,11}$

este escala com expoente de 0,19, e a potência relacionada à oscilação do centro de massa escala com expoente de 0,12. Assim, os autores concluem que o modelo de mola resulta em previsões bastante adequadas do comportamento do sistema. Além disso, os resultados sugerem que, apesar das diferenças morfológicas, mamíferos se deslocam com similaridade dinâmica.

## 1995 - 1999

A esta altura, os estudos já passaram a permitir generalizações quanto aos padrões de deslocamento em terra (substrato sólido). Desta forma, Willems, Cavagna e Heglund (1995) concluem que o estudo do trabalho externo permitiu que se identificassem dois mecanismos gerais da locomoção terrestre:

**andar:** pêndulo-símile → recuperação máxima de energia na velocidade de cruzeiro

**“correr”:** quicar-símile → recuperação de energia através de comportamento elástico do sistema

Roberts e colaboradores, entre os quais se encontra R.C. Taylor, voltam a ter atenção na questão da transferência de energia mecânica (Roberts et al., 1997). Com a evolução tecnológica, medidas relacionadas ao componente elástico da energia mecânica, que antes eram impossíveis de se obter (ver a seção “1982”), agora podem ser realizadas. Neste estudo, os autores utilizaram perus, aves de locomoção terrestre, e mediram as forças e o comprimento no músculo gastrocnêmio dos animais em diferentes velocidades de corrida (Figura 8). As medidas indicam que os tendões e os componentes elásticos dos músculos produzem trabalho mecânico, e, ao mesmo tempo, as fibras musculares ativas produzem força. Assim, os autores concluem que, durante o deslocamento, o encurtamento é pequeno e o trabalho realizado também, mas isso é o suficiente para sustentar o peso corpóreo e, economicamente, os músculos agem mais como suportes ativos do que como máquinas de contração.

Apesar destes resultados realçando a importância dos elementos elásticos na economia de energia na locomoção, Gregersen, Silverton e Carrier, em 1998, obtêm dados em cães indicando que, no trote, 26% e, no galope, 56% da energia da locomoção é oriunda da contração muscular ativa (Gregersen et al., 1998). Mais ainda, os dados revelam que a recuperação de energia depende da “centralidade” da articulação, ou seja, quanto mais central (e.g., articulações das bacias pélvica e escapular) menor é a fração recuperada. Em outras palavras, a musculatura responsável pela movimentação de porções mais distais dos membros se beneficia mais da recuperação de energia por elementos elásticos.

## 2000 - 2004

Donelan, Kram e Kuo, em 2001, partem do conjunto de observações que as variáveis na passada preferencial parecem ser escolhidas de modo a minimizar o custo metabólico. Contudo, a base biomecânica para tal minimização não é, ainda, bem compreendida. Os auto-



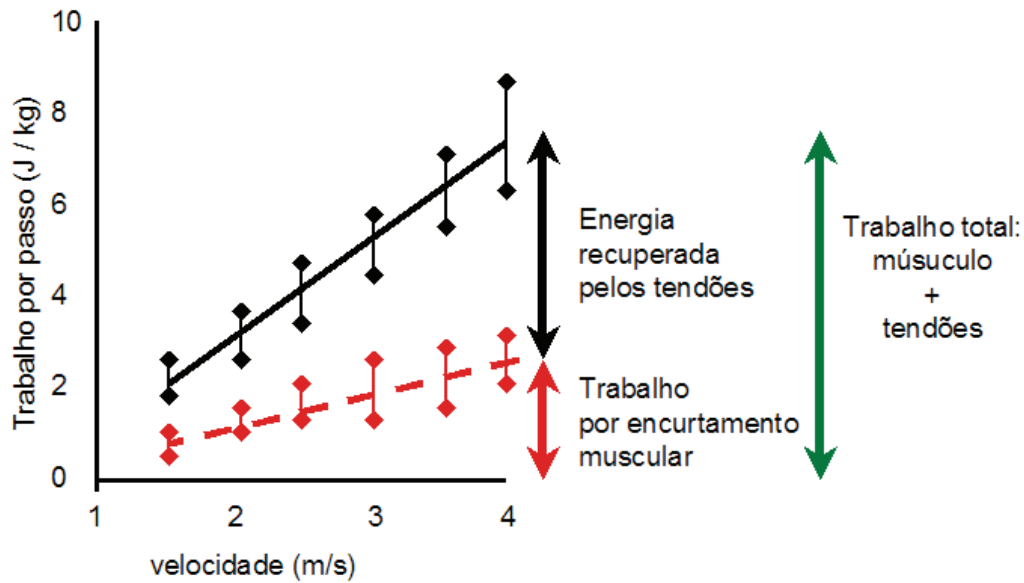


Figura 8. Trabalho realizado por passo por unidade de massa em função da velocidade em perus. Em vermelho, a energia vinda pela contração muscular, em preto, a energia recuperada através de componentes elásticos, em verde, o total. Nas velocidades mais elevadas, a energia recuperada chega a 60% do total. Adaptado de Roberts et al., 1997.

res estudam, então, em seres humanos, como a variação da largura entre os pés afeta a demanda. Note que esta largura não se refere ao tamanho da passada, mas, sim, à distância que há entre os pés considerando as pernas alinhadas verticalmente aos ombros do indivíduo. Segundo os dados obtidos, tanto em larguras maiores quanto em menores que a preferencialmente escolhidas pelos sujeitos experimentais, há aumento no custo da locomoção. A modelagem física indica que, para larguras maiores, há um custo adicional em se levantar o centro de massa, o que explicaria o aumento da demanda. Por outro lado, para larguras menores, os autores não têm explicação para a elevação do gasto.

Apesar de tentadora a interpretação de que os animais operam com custos metabólicos mínimos, nem sempre se consegue demonstrar que isto ocorre, de fato. Na maioria das vezes, o que o organismo foi selecionado a otimizar não é facilmente percebido, ainda mais quando múltiplos fatores concorrem para um certo comportamento ou certo resultado de processos fisiológicos. Desta maneira, os estudos desde a década de 1960 acabaram por criar a imagem de que a transição entre passadas (e.g., entre o andar e o correr em humanos, ou entre o trotar e o galopar em quadrúpedes) se dá numa velocidade de ótimo energético (ver Figura 1 - VTEO). Tseh, Bennett, Caputo e Morgan, em 2002, desafiam esta imagem. Estudando a transição de passadas em adolescentes, os autores mostram que a velocidade preferencial de transição é mais baixa que a velocidade energeticamente ótima (Tabela III). Ou seja, adolescentes não ajustam a transição de passadas em decorrência do gasto energético otimizado. Os autores concluem que outros fatores, além da VTEO, determinam a mudança de passada, conclusão, esta, semelhante a outros estudos em humanos e animais. Eles sugerem a percepção do esforço e características cinéticas da movi-

mentação das pernas como possíveis fatores concorrentes para sinalização da velocidade de mudança.

Em 2004, outro conceito é colocado em xeque. O grupo de Taylor havia sugerido, para explicar as relações de gasto com a locomoção em meio terrestre, a “Hipótese de Força”: os custos da fase de balanço são negligenciáveis e o gasto é determinado pela realização de força contra o solo. Marsh e colaboradores investigam o quanto do gasto energético está ligado ao balanço dos membros (Marsh et al., 2004). Utilizam galinhas d’angola e medem, durante a corrida em esteira, o fluxo sanguíneo muscular (usando microesferas), o consumo de oxigênio e o eletromiograma dos músculos responsáveis pela locomoção.

O primeiro resultado importante é que o fluxo sanguíneo muscular mantém uma relação linear com o gasto energético total (consumo de oxigênio). Este é um resultado importante pois valida a interpretação a ser dada para os demais resultados, como explicado abaixo. Através do eletromiograma, os autores mostram que, nas diferentes

Tabela III. VPT: velocidade preferencial de transição. Velocidade em metros por segundo, consumo de oxigênio em mL por kg por km. Dados de Tseh et al., 2002.

Variável	11 anos	13 anos	15 anos
VPT	2.01	2.08	2.12
VTEO	2.08	2.2	2.25
Razão VTEO / VPT	1.03	1.06	1.06
V <sub>O2</sub> (VPT)	238	240	217
V <sub>O2</sub> (VTEO)	257	258	232
Razão (VPT / VTEO)	1.08	1.08	1.07

velocidades, há uma mudança no padrão dos grupamentos musculares ativados. Contudo, as relações globais entre grupamentos ativos na fase de apoio no solo e grupamentos ativos na fase de balanço permanecem as mesmas. Ou seja, independentemente da velocidade, 25% do fluxo sanguíneo é dirigido aos grupamentos da fase de balanço. Dada a linearidade entre fluxo e demanda, tem-se que 25% da demanda é dada pela fase de balanço, independentemente da velocidade.

Desta maneira, os autores concluem que é essencial o entendimento das relações entre demanda, mecânica, velocidade e massa. Contudo, a Hipótese de Força como determinante do consumo necessita ser modificada para explicar as relações observadas

## 2005 -

Hoyt e colaboradores, em 2006, abordam uma outra questão, a das relações entre mecânica e parâmetros de passada em relação à energética da locomoção terrestre. Esta questão vinha permanecendo obscura nas décadas precedentes no sentido de que alguns grupos faziam referência a conceitos de energética e outros faziam referência a parâmetros de passadas e se tomava por intercambiáveis as análises. A Figura 9 ilustra as abordagens.

O estudo aborda se a mecânica pêndulo-mola utilizada para minimizar a demanda afeta a relação entre velocidade e taxa metabólica ou variáveis da passada. As variáveis medidas foram a frequência de passos, o “duty factor” (fração de tempo com os pés no chão) e o tempo de contato.

Em cavalos, os autores notam que existe uma grande concomitância entre tipos de passada (andar, trotar, galopar) nas velocidades nas quais ocorre a transição entre passadas. Mais ainda, nas velocidades de transição, o “duty factor” das pernas dianteiras é diferente do “duty factor” das pernas traseiras. Ou seja, não há como se caracterizar através dos parâmetros de passada o evento mecânico correspondente (diminuição relativa do gasto).

Em avestruzes, a mudança de passada ocorre a 2 m/s, quando a relação de fase entre a energia cinética horizontal e a soma da energia cinética vertical com a energia potencial gravitacional se aproxima de zero. Isto é, há a transição de passada quando o pico de energia cinética

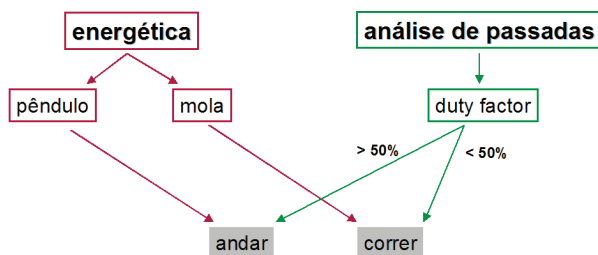


Figura 9. Relações entre a análise energética e a chamada “análise de passadas” para caracterizar o que é “andar” e o que é “correr”. A importância do estudo de Hoyt, Wickler, Dutto, Catterfeld e Johnsen (2006) foi a de mostrar que a análise de passadas não guarda relação com a energética e nem com os eventos que ocorrem na locomoção (ver texto).

horizontal dos membros tende a ser concomitante ao pico de energia mecânica vertical do centro de massa. Contudo, a variação na frequência de passos e no tempo de contato são contínuas, ou seja, estes fatores não apresentam quaisquer descontinuidades em suas variações com a velocidade que permita inferir a mudança mecânica. Mais importante ainda, o “duty factor” é maior que 50% mesmo para velocidades maiores que a velocidade de transição. Novamente, portanto, esta variável de passada não serve para caracterizar o evento mecânico (diferentemente do que é sugerido na Figura 9). Resultados similares foram obtidos para pôneis e para humanos.

Desta forma, os autores concluem que existe uma relação contínua (tipo logarítmica) entre velocidade e frequência de passos, e entre velocidade e tempo de contato. Mais importante, concluem que o termo “duty factor” para caracterizar as passadas deve ser abandonado pois gera confusão sem ter um correspondente mecânico definido.

Watson e colaboradores (2011), entre os quais estão Marsh e Hoyt, apontam que a opinião atual em relação à energética da locomoção apresenta um enigma quanto às velocidades e passadas preferidas. Muitos advogam que os animais escolham o par (velocidade, passada) de modo a minimizar o custo do transporte. Contudo, a taxa metabólica tem um incremento linear com a velocidade nas diferentes passadas - e, neste sentido, a inclinação da reta da relação da taxa metabólica com a velocidade é tomada como o custo do transporte. Isto leva a uma ausência de otimização: o custo é o mesmo para qualquer par (velocidade, passada), já que é a própria inclinação da reta. Temos, portanto, o problema que motivou as pesquisas aqui descritas, ainda aberto.

## Conclusão

Assim, da questão inicial proposta por Taylor, Heglund, Fedak, Cavagna e Maloij em 1982 (quatro estudos citados na secção 1982), o que se elucidou em termos dos determinantes da relação gasto x massa x velocidade?

**Massa:** animais maiores conseguem ter uma maior eficiência devido a maior recuperação de energia elástica no sistema

**Velocidade:** dois mecanismos básicos atuam - o pêndulo (velocidades baixas) e a mola (velocidades altas)

- A velocidade preferencial está relacionada a um pico de força de 1/3 do máximo
- Mover os membros é um fator de gasto relevante no sistema
- Tempo de contato como o solo e frequência dos passos são fatores relacionados à energética
- “Duty factor” não parece ser uma variável com relevância na energética da locomoção
- Há relações lineares e relações não lineares entre o custo e a velocidade

Esta revisão da literatura não deve ser tomada como extensiva ou completa. A revisão foi feita partindo do conceito de otimização da energética da locomoção, indicada pelos dados representados na Figura 1 (Menier e Pugh,

1968) e das proposições oriundas do conjunto de estudos publicados em 1982 por Taylor, Heglund, Fedak, Cavagna e Maloiy. Tal revisão representa, portanto, um viés do autor no sentido indicado acima, e pretende, apenas, oferecer um ponto de partida para maior aprofundamento na área.

## Referencias

- Donelan JM, Kram R, Kuo AD (2001). Mechanical and metabolic determinants of the preferred step width in human walking. *Proceedings Royal Society of London B* 268:1985-1992.
- Farley CT, Glasheen J, McMahon TA (1993). Running springs: speed and animal size. *Journal of Experimental Biology* 185:71-86.
- Fedak MA, Heglund NC, Taylor CR (1982). Energetics and mechanics of terrestrial locomotion. II. Kinetic energy changes of the limbs and body as a function of speed and body size in birds and mammals. *Journal of Experimental Biology* 97:23-40.
- Gregersen CS, Silverton NA, Carrier DR (1998). External work and potential for elastic storage at the limb joints of running dogs. *Journal of Experimental Biology* 201:3197-3210.
- Heglund NC, Cavagna GA, Taylor CR (1982a). Energetics and mechanics of terrestrial locomotion. III. Energy changes of the centre of mass as a function of speed and body size in birds and mammals. *Journal of Experimental Biology* 97:41-56.
- Heglund NC, Fedak MA, Taylor CR, Cavagna GA (1982b). Energetics and mechanics of terrestrial locomotion. IV. Total mechanical energy changes as a function of speed and body size in birds and mammals. *Journal of Experimental Biology* 97:57-66.
- Heglund NC, Taylor CR (1988). Speed, stride frequency and energy cost per stride: how do they change with body size and gait? *Journal of Experimental Biology* 138:301-318.
- Hoyt DE, Wickler SJ, Dutton DJ, Catterfeld GE, Johnsen D (2006). What are the relations between mechanics, gait parameters, and energetics in terrestrial locomotion? *Journal of Experimental Zoology A* 305:912-922.
- Hoyt, D. F. e Taylor, C. R (1981). Gait and the energetics of locomotion in horses. *Nature* 292:239-240
- Marsh RL, Ellerby DJ, Carr JA, Henry HT, Buchanan CI (2004). Partitioning the energetics of walking and running: swinging the limbs is expensive. *Science* 303(5654):80-83.
- Menier DR, Pugh LG (1968). The relation of oxygen intake and velocity of walking and running, in competition walkers. *Journal of Physiology* 197:717-721
- Myers MJ, Steudel K (1985). Effect of limb mass and its distribution on the energetic cost of running. *Journal of Experimental Biology* 116:363-373.
- Perry AK, Blickhan R, Biewener AA, Heglund NC, Taylor CR (1988). Preferred speeds in terrestrial vertebrates: are they equivalent? *Journal of Experimental Biology* 137:207-219.
- Roberts TJ, Marsh RL, Weyand PG, Taylor CR (1997). Muscular force in running turkeys: the economy of minimizing work. *Science* 275(5303):1113-1115.
- Steudel K. The work and energetic cost of locomotion. I (1990a). The effects of limb mass distribution in quadrupeds. *Journal of Experimental Biology* 154:273-285.
- Steudel K. The work and energetic cost of locomotion. II (1990b). Partitioning the cost of internal and external work within a species. *Journal of Experimental Biology* 154:287-303.
- Taylor CR, Heglund NC, Maloiy GM (1982). Energetics and mechanics of terrestrial locomotion. I. Metabolic energy consumption as a function of speed and body size in birds and mammals. *Journal of Experimental Biology* 97:1-21.
- Tseh W, Bennett J, Caputo JL, Morgan DW (2002). Comparison between preferred and energetically optimal transition speeds in adolescents. *European Journal of Applied Physiology* 88:117-121.
- Watson RR, Rubenson J, Coder L, Hoyt DF, Probert MW, Marsh RL (2011). Gait-specific energetics contributes to economical walking and running in emus and ostriches. *Proceedings Royal Society of London B* 278:2040-2046.
- Willems PA, Cavagna GA, Heglund NC (1995). External, internal and total work in human locomotion. *Journal of Experimental Biology* 198:379-393.



# Papel das ações musculares excêntricas nos ganhos de força e de massa muscular

The role of eccentric muscle actions in the increase of strength and muscle mass

**Valmor Tricoli**

*Escola de Educação Física e Esporte, Universidade de São Paulo*

Contato do autor: vtricoli@usp.br

**Resumo.** Os principais ajustes ao treinamento de força são o aumento da massa e da força dos músculos esqueléticos. O grau de tensão da ação muscular é determinante destes ajustes e ele é influenciado pelo tipo da ação. Na ação excêntrica o músculo gera tensão com aumento de seu comprimento resultando em danos à musculatura. Visto que o treinamento excêntrico causa grande hipertrofia e ganho de força, o dano também pode ser considerado um estímulo de treinamento. Neste artigo serão apresentadas as características mecânicas e neurais das ações excêntricas e como elas podem contribuir para o que músculo esquelético se ajuste de maneira mais eficiente aos estímulos oferecidos pelo treinamento de força.

**Palavras-chave.** *Dano muscular; Hipertrofia; Treinamento de força.*

**Abstract.** An increased muscle mass and strength are the main adjustments to strength training. It seems that the tension level of the muscle action plays a major role. It has been demonstrated that tension is affected by muscle action type. During an eccentric action the muscle produces tension with increase of its length resulting in damage to the muscle structure. Considering that eccentric training causes greater changes in strength gains and muscle mass, exercise induced damage has been seen as training stimulus. This paper will present mechanical and neural characteristics of the eccentric actions and how they may contribute to the skeletal muscle adaptations to the strength training stimuli.

**Keywords.** *Hypertrophy; Muscle damage, Strength training.*

Recebido 22mar12

Aceito 23out12

Publicado 15jan14

## Introdução

O músculo esquelético é o tecido mais abundante do corpo humano. Existem aproximadamente 660 músculos totalizando 40-45% da massa corporal. Estes músculos possuem funções vitais na locomoção, na produção de calor, na reprodução e no metabolismo em geral. Além disso, eles apresentam uma alta capacidade de ajuste aos estímulos oferecidos pelo meio ambiente. Dentre os diferentes estímulos, será abordado o treinamento físico, e em especial, o treinamento de força.

Quando um músculo ou grupo muscular é submetido ao treinamento de força (também chamado musculação), os principais ajustes são o aumento da capacidade de produção de força e da massa muscular (hipertrofia). Existe uma relação direta e linear entre o tamanho da massa muscular e o desempenho de força, ou seja, quanto maior a área de secção transversa de um músculo maior a sua capacidade de gerar força. Assim, a hipertrofia dos músculos esqueléticos possui, além de um aspecto estético, um caráter funcional importante.

Hipertrofia pode ser definida como um aumento no tamanho das fibras musculares ou de um músculo devido

a um maior acúmulo de proteínas contráteis no interior da célula muscular. Um aumento na síntese proteica, uma diminuição na taxa de degradação proteica ou uma combinação destes dois fatores é responsável pela hipertrofia muscular (Toigo e Boutellier, 2006). Posto desta forma, o “mecanismo” de hipertrofia parece de fácil compreensão; porém, este é um processo complexo com inúmeros fatores hormonais, mecânicos e metabólicos envolvidos.

Dentre os fatores mencionados, o mecânico parece ser o preponderante, estando diretamente relacionado com o grau de tensão exercido pela musculatura. Tradicionalmente, a intensidade do exercício, o número de séries e de repetições executadas, o intervalo de descanso entre séries e a frequência de treinamento são as variáveis consideradas no estudo das adaptações ao treinamento de força. No entanto, recentemente tem sido demonstrado que o tipo da ação muscular e a velocidade de execução do movimento são variáveis importantes e que também devem ser consideradas (Farthing e Chillibeck, 2003; Paddon-Jones e col., 2005, Shepstone e col., 2005).

Neste texto, iremos abordar o papel das ações excêntricas (AE) nos ganhos de força e de massa muscular após a estimulação oferecida pelo treinamento de força.

Esta ação muscular parece apresentar vantagens de ajuste sobre os outros tipos de ação (Barroso e col., 2005). Estas vantagens estão intimamente relacionadas com as características mecânicas e neurais das AE. Porém, antes disso, precisamos esclarecer alguns aspectos conceituais relacionados aos tipos de ação muscular e as características intrínsecas das AE.

### Ações musculares

A terminologia “ação muscular” foi proposta no final dos anos 80 por um grupo de pesquisadores que acreditava que a palavra “contração” não representava apropriadamente os eventos que ocorriam na musculatura esquelética nas diferentes situações durante uma tarefa motora (Cavanagh, 1988). Afinal, a palavra *contrair* denota encurtar, encolher, tornar mais estreito ou mais curto; portanto, *contração* significa uma diminuição de comprimento ou de tamanho. Desta forma, os termos “contração excêntrica” e “contração isométrica” não estariam corretos uma vez que eles envolvem o aumento e a manutenção do comprimento muscular, respectivamente. Por outro lado, a palavra “ação” significa fazer alguma coisa, mover, exercer, o que parece representar melhor todas as variações da atividade muscular.

Quando um músculo gera tensão, mas não há alteração externa visível no comprimento muscular ou no

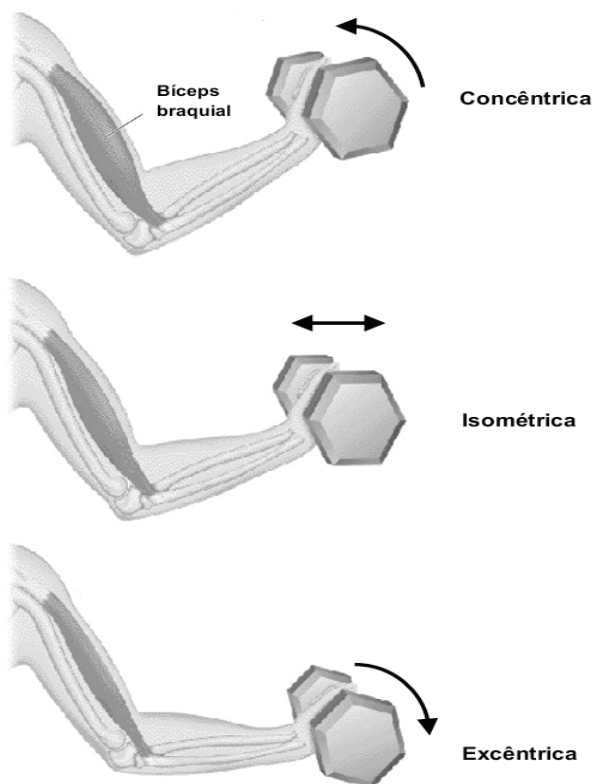


Figura 1. Tipos de ações musculares. Na ação concêntrica o músculo se encurta levantando o objeto. Na ação isométrica o músculo não altera seu comprimento e o objeto fica estático. Na ação excêntrica o músculo se alonga e o objeto é abaixado. Nos três casos o músculo envolvido é o biceps braquial o qual é responsável pelo movimento de flexão do cotovelo.

ângulo da articulação envolvida no movimento, temos a chamada ação “isométrica” (AI) (Figura 1). A força interna produzida pelo músculo se iguala a resistência externa e não há movimentação das partes corporais. Isso corresponde ao ato de ficar carregando um objeto, com os músculos tensionados, sem levantá-lo ou abaixá-lo. Se a geração de tensão resultar num visível encurtamento no comprimento muscular ou numa diminuição do ângulo articular temos uma ação “concêntrica” (AC) (Figura 1). A força gerada pela musculatura esquelética é aplicada na mesma direção do deslocamento e produz um trabalho positivo. Essa situação corresponde, por exemplo, ao ato de levantar o corpo enquanto fazemos o exercício suspensão na barra. Já na chamada ação “excêntrica” (AE) o músculo gera tensão com visível alongamento de seu comprimento ou aumento do ângulo articular (Figura 1). Neste caso, a direção da força aplicada pelo músculo é oposta à direção do deslocamento e corresponde, por exemplo, ao movimento de abaixar o corpo quando fazemos o exercício suspensão na barra. Deve ser lembrado que a ação isométrica também é chamada de ação estática enquanto as outras duas são chamadas de ações dinâmicas.

Por último, devemos esclarecer o conceito de área de secção transversa muscular. Esta é a área de uma secção (ou corte) de um determinado músculo ou grupo muscular perpendicular à orientação de suas fibras. É uma medida utilizada para verificar a alteração no tamanho ou espessura da massa muscular.

### Características mecânicas e neurais da ação excêntrica

A ação muscular excêntrica possui características mecânicas e neurais peculiares (Enoka, 1996). Neste tópico, trataremos apenas das características que possuem implicações nos ganhos de força e de massa muscular.

Durante uma AE, o músculo é capaz de gerar maior quantidade de força quando comparada às ações concêntrica e isométrica. Isso significa que se alguém consegue levantar um peso máximo do chão e colocá-lo sobre uma mesa (AC), essa mesma pessoa conseguirá abaixar da mesa até o chão (AE) um peso um pouco maior. Isto ocorre porque além de uma contribuição ativa dos elementos contráteis, a AE apresenta uma contribuição passiva dos elementos constituintes da estrutura muscular na geração de tensão (Barroso e col., 2005). Em qualquer ação muscular, a produção de força é oriunda de um processo ativo resultante da interação dos filamentos de miosina com os de actina. Esta interação forma as chamadas pontes cruzadas, as quais são individualmente capazes de gerar uma determinada quantidade de força. Quanto maior a quantidade formada de pontes cruzadas, maior a quantidade de força gerada. Quando um músculo é alongado, existe a resistência oferecida pelos elementos elásticos os quais constituem a estrutura do músculo esquelético. Esta resistência gera uma tensão passiva, a qual aumenta na medida em que o músculo é alongado. Então, a tensão passiva soma-se com a tensão ativa gerada durante uma AE, resultando numa maior produção total de força (Figura 2).

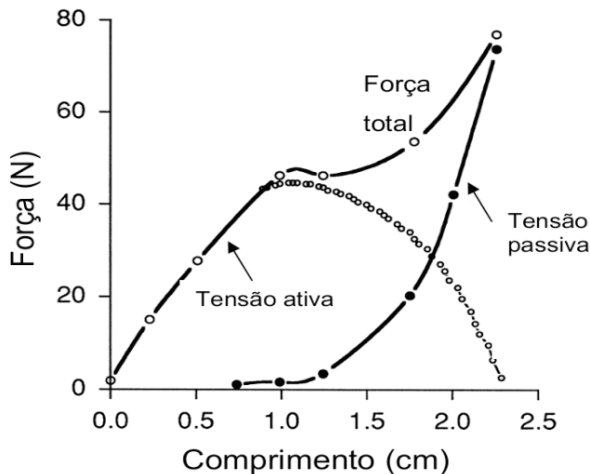


Figura 2. Contribuição das tensões ativa e passiva para a geração total de força de acordo com a curva força-comprimento (adaptado de ENOKA, 2002). A tensão ativa gerada pela formação das pontes cruzadas na musculatura esquelética aumenta até um comprimento ótimo e a partir disso declina. Já a tensão passiva, dependente dos elementos elásticos da musculatura, aumenta progressivamente com o aumento do comprimento. A somatória das duas tensões resulta numa maior produção total de força durante as ações excêntricas.

É importante destacar que a velocidade da ação muscular também afeta a produção de força. Durante uma AC, o aumento da velocidade de movimento diminui a força produzida pelo músculo, pois reduz o tempo disponível para a formação das pontes cruzadas (elementos contráteis). Já com a diminuição da velocidade, a força gerada aumenta e níveis máximos de força são alcançados quando a velocidade da ação muscular é igual à zero (AI). Já durante as AE, a força muscular gerada supera os níveis obtidos na AI, aumenta progressivamente e depois se mantém relativamente constante apesar do aumento na velocidade de execução (Figura 3).

Outra característica interessante das AE diz respeito à atividade neuromuscular. Nas AC e AI, a amplitude do sinal eletromiográfico (EMG), o qual representa a atividade elétrica das unidades motoras de um músculo, apresenta uma relação direta e quase linear com a força produzida. Em contrapartida, nas AE, a EMG é menor para os mesmos níveis de força absolutos e relativos, quando comparada aos outros tipos de ação muscular, indicando que existe uma menor ativação das unidades motoras do músculo (Figura 4). Este aspecto acaba por afetar o custo energético da tarefa, o qual é também menor nas atividades motoras envolvendo predominantemente as AE. Como exemplo, podemos mencionar porque subir escadas, uma atividade com predominância das AC, gera um cansaço maior do que descer escadas, tarefa com maior participação das AE.

Além disso, existem indícios de que o padrão de recrutamento muscular (isto é, a ativação das diferentes unidades motoras) durante as AE não respeita o chamado “princípio do tamanho” (Enoka, 1996). O princípio do tamanho afirma que, durante uma atividade física, as

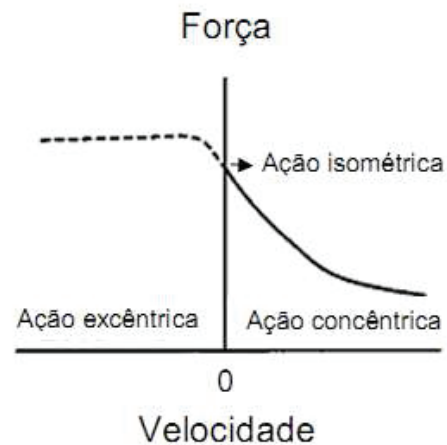


Figura 3. Curva força-velocidade para os diferentes tipos de ação muscular. Na ação concêntrica, há uma diminuição progressiva na produção de força com o aumento da velocidade da ação. Na ação isométrica, a velocidade é igual à zero. Na ação excêntrica ocorre um aumento na produção de força com os aumentos iniciais da velocidade da ação.

unidades motoras menores, com limiar de ativação mais baixo e menor capacidade de produção de força são recrutadas primeiramente. Com a necessidade de aumentar a produção de força para executar a tarefa, unidades maiores de limiar mais alto e mais fortes são recrutadas posteriormente. Porém, nas AE, esse padrão parece se reverter, com o recrutamento das unidades de alto limiar ocorrendo no início da tarefa (Nardone e col., 1989). Estas unidades motoras são compostas por fibras musculares do tipo II, as quais respondem muito bem aos estímulos do treinamento de força quando comparadas as fibras do tipo I. As fibras do tipo I, também conhecidas como fibras de contração lenta, são basicamente responsáveis pela manutenção da postura corporal diária. Estas fibras geram menor tensão, mas por longos períodos de tempo. Já as fi-

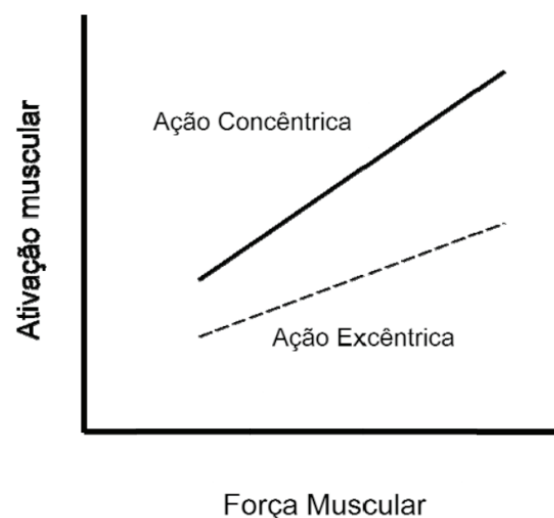


Figura 4. Nível de força e grau de ativação das unidades motoras nas ações musculares concêntrica e excêntrica.



bras do tipo II são conhecidas como as fibras de contração rápida as quais produzem alto grau de tensão mas entram rapidamente em fadiga. É interessante notar que a hipertrofia decorrente do treinamento com predominância das AE se manifesta especialmente neste tipo de fibra. Assim, essa maior resposta hipertrofica pode estar associada ao recrutamento seletivo das unidades motoras compostas por fibras musculares do tipo II durante as AE.

Outro aspecto interessante é que a maior tensão muscular gerada nas AE está associada a ativação de um menor número de unidades motoras (Figura 4) o que impõe um maior estresse mecânico sobre cada uma das fibras musculares ativas. Isto resulta na maior ocorrência de danos à estrutura do músculo esquelético. O dano muscular induzido pela execução de AE se caracteriza por micro-rupturas no tecido conectivo que dá sustentação as fibras musculares e garante a organização estrutural hierárquica de um músculo.

Outros fatores como a velocidade da AE e o comprimento inicial e final do músculo envolvido também podem contribuir para a ocorrência e magnitude do dano (Morgan e Partridge, 2003). As AE executadas com alta velocidade ou com grande amplitude articular (maior alongamento da musculatura esquelética) causam maiores danos à estrutura das fibras musculares (Chapman e col., 2006). A seguir discutiremos a relação entre a execução de AE em diferentes velocidades, a possibilidade de dano muscular e a ativação do processo de hipertrofia muscular.

### **Ações excêntricas, ganhos de força e de massa muscular**

Pesquisas referentes à importância das AE nas adaptações oriundas do treinamento de força tiveram início nos anos 90. A maioria dos resultados demonstrou superioridade das AE em estimular os ganhos de força e de hipertrofia muscular em comparação às AC e AI. Inicialmente, uma possível explicação para esta superioridade seria a maior tensão desenvolvida pelas fibras musculares durante as AE quando comparada com as AC e AI.

O próximo passo foi a investigação dos efeitos da velocidade de execução das AE. Interessantemente, descobriu-se que as AE de alta velocidade resultaram em maiores ganhos de força e de hipertrofia quando comparadas com as AE executadas em baixa velocidade e com as AC (Farthing e Chillibeck, 2003; Paddon-Jones e col., 2005). Neste ponto vale esclarecer que a medida da velocidade de execução das AE é feita em graus por segundo. Assim, exercícios executados abaixo de 60°/segundo são considerados de baixa velocidade, enquanto acima de 180°/segundo são considerados exercícios de alta velocidade.

Tem sido sugerido que a maior velocidade de execução durante as AE aumenta a força produzida devido ao aumento da tensão passiva sobre as estruturas elásticas do músculo esquelético. Este aumento “extra” da tensão, associado à alta tensão própria das AE, resultaria num maior grau de dano muscular induzido pelo exercício. Devido ao fato do treinamento com AE causar maior hipertrofia dos músculos exercitados, o dano muscular induzido pelo

exercício excêntrico passou a ser incluído como um dos estímulos relevantes para o ganho de força, e em particular, de massa muscular (Shepstone e col., 2005).

O dano muscular está associado com a ativação, proliferação e diferenciação de células satélites e com a liberação de fatores de crescimento pelo músculo esquelético. As células satélites estão localizadas, em estado dormente, na superfície externa da membrana da célula muscular (daí o nome células satélites). Em caso de dano aos componentes da estrutura da célula muscular, as células satélites saem do estado dormente (ativação), se dividem (proliferação) e se diferenciam numa tentativa de “consertar” o dano causado. É importante ressaltar que as satélites não dão origem a uma nova célula muscular, mas podem contribuir para aumentar a síntese proteica no interior da célula muscular. Isso seria feito pela infiltração de células satélites no interior da célula muscular, o que aumentaria a quantidade de material genético disponível para a síntese de proteínas com consequente aumento no tamanho da célula muscular.

Com relação aos fatores de crescimento, a alta tensão causada pelas AE na estrutura da célula muscular afeta positivamente a liberação de IGF-1 (*insulin like growth factor-1* ou fator de crescimento semelhante à insulina) e a ativação da sinalização das vias de hipertrofia. Além disso, outro fator de crescimento, o MGF, (*mechano growth factor* ou fator de crescimento mecânico) o qual é sintetizado pelo próprio músculo esquelético, é sensível à tensão produzida no tecido muscular. Desta forma, foi demonstrado que as AE são mais potentes estimuladoras para o aumento da expressão e liberação de MGF do que as AC. Este fator de crescimento exerce um papel importante, uma vez que é um dos iniciadores da cascata de sinalização das vias de sinalização da hipertrofia.

Recentemente tem-se dado grande importância ao estudo das vias de sinalização de síntese proteica, e dentre elas, a sinalização intracelular da hipertrofia muscular recebeu destaque. Uma via bastante comum de sinalização celular acionada pelo exercício físico, em particular pelo treinamento de força, é a fosfatidil-inositol 3-quinase (PI3K). A via da PI3K/Akt/mTOR/p70<sup>S6K</sup> tem sido amplamente atribuída como uma das principais controladoras do crescimento celular. Estimulada pelo aumento nas concentrações de IGF-1 e MGF ela aciona, em forma de cascata, outras proteínas (proteína quinase B [Akt], proteína alvo de rapamicina em mamíferos [mTOR] e proteína ribossomal 70 quinase S6 [p70<sup>S6K</sup>]) responsáveis pelo desencadeamento da síntese proteica e do crescimento celular (Roschel e col., 2011).

Também tem sido mostrado que o tipo de ação muscular afeta a atividade das vias de sinalização. As AE causam um aumento significativo na fosforilação (neste caso ativação) da p70<sup>S6K</sup> em comparação a outros tipos de ação muscular, e a fosforilação tem relação positiva e direta com o aumento da massa muscular resultante do treinamento de força. De maneira geral, as AE parecem ser mais capazes de estimular a via PI3K/Akt/mTOR/p70<sup>S6K</sup> em detrimento das AC, permitindo inferir a importância da tensão muscular no processo de ativação desta via de

hipertrofia muscular.

## Conclusão

O trabalho muscular feito contra uma sobrecarga externa progressiva resulta no aumento da força e da massa muscular. Contudo, ainda não está totalmente elucidado qual é o mecanismo por trás destes fenômenos. De forma genérica, podemos afirmar que o estímulo mecânico oferecido pelo processo de treinamento físico, e em particular, o grau de tensão na musculatura esquelética é o principal fator envolvido. Neste caso, o treinamento com AE parece proporcionar uma estimulação superior para o desenvolvimento da força e da hipertrofia quando comparada às ações concêntrica e isométrica.

Continua sendo motivo de investigação como o estímulo tensional gerado pela carga externa é interpretado pelo músculo esquelético resultando na ativação dos mecanismos intracelulares responsáveis pela síntese proteica. A liberação de fatores de crescimento e a ativação das vias de sinalização de crescimento celular estão diretamente relacionadas ao grau de tensão muscular e ao aumento da massa muscular e da capacidade de produção de força. Outro fator associado e também resultante da aplicação de cargas excêntricas é o dano causado à estrutura muscular. Portanto, a associação entre AE, grau de tensão, dano muscular e ativação das vias de sinalização da hipertrofia oferece uma explicação plausível para o aumento da massa muscular decorrente do treinamento de força.

Todavia, a ocorrência de dano muscular induzido pela realização das AE diminui com a repetição sucessiva de sessões de treinamento, ou seja, existe um tipo de efeito protetor promovido pela execução das AE. Com o passar do tempo, o efeito protetor diminuiria progressivamente o dano à estrutura muscular e isto prejudicaria o desenvolvimento da hipertrofia em longo prazo. Como o processo hipertrófico não é interrompido após poucas sessões de treinamento, parece haver outros mecanismos responsáveis pela maior hipertrofia muscular observada com a utilização de AE em alta velocidade que não o dano muscular.

Em conclusão, podemos afirmar que as características mecânicas e neurais das AE são determinantes para o que músculo esquelético se ajuste de maneira mais intensa aos estímulos oferecidos pelo treinamento de força excêntrico.

## Referências bibliográficas

- Barroso R, Tricoli V e Ugrinowitsch C. 2005. Adaptações neurais e morfológicas ao treinamento de força com ações excêntricas. *Revista Brasileira de Ciência e Movimento* 13:111-122.
- Cavanagh PR. 1988. On muscle action vs. muscle contraction. *Journal of Biomechanics* 21:69.
- Chapman D, Newton M, Sacco P e Nosaka K. 2006. Greater muscle damage induced by fast versus slow velocity eccentric exercise. *International Journal of Sports Medicine* 27:591-598.

- Enoka RM. 1996. Eccentric contractions require unique activation strategies by the nervous system. *Journal of Applied Physiology* 81:2339-2346.
- Enoka RM. 2002. *Neuromechanics of human movement*. Champaign: Human Kinetics.
- Farthing JP e Chillibeck PD. 2003. The effects of concentric and eccentric training at different velocities on muscle hypertrophy. *European Journal of Applied Physiology* 89:578-586.
- Morgan JE e Partridge T. 2003. A. Muscle satellite cells. *International Journal of Biochemistry and Cell Biology* 35:1151-156.
- Nardone A, Romano C e Schieppati M. 1989. Selective recruitment of high-threshold human motor units during voluntary isotonic lengthening of active muscles. *Journal of Physiology* 409:451-471.
- Paddon-Jones D, Keech A, Lonergan A e Abernethy P. 2005. Differential expression of muscle damage in humans following acute fast and slow velocity eccentric Exercise. *Journal of Science and Medicine in Sport* 8:255-263.
- Roschel H, Ugrinowitsch C, Barroso R, Batista MAB, Souza EO, Aoki MS, Siqueira-Filho MA, Zanuto R, Carvalho CRO, Neves JR M, Mello MT e Tricoli V. 2011. Effect of eccentric exercise velocity on Akt/mTOR/ p70<sup>s6k</sup> signaling in human skeletal muscle. *Applied Physiology, Nutrition and Metabolism* 36:283-290.
- Shepstone TN, Tang JE, Dallaire S, Schuenke MD, Staron RS e Phillips SM. 2005. Short-term high- vs. low-velocity isokinetic lengthening training results in greater hypertrophy of the elbow flexors in young men. *Journal of Applied Physiology* 98:1768-1776.
- Toigo M e Boutellier U. 2006. New fundamental resistance exercise determinants of molecular and cellular muscle adaptations. *European Journal of Applied Physiology* 97: 643-663.

# Cognição e Esporte

## Sport and Cognition

**Lilian Negrão de Oliveira Silva, Marina Faveri de Oliveira e André Frazão Helene**

*Laboratório Ciências da Cognição, Departamento de Fisiologia, Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo (IB-USP), São Paulo, São Paulo, Brasil*

Contato do autor:

**Resumo.** Seja no aprendizado das regras de um jogo ou das habilidades necessárias para seu desempenho, os aspectos cognitivos envolvendo memória e atenção são fundamentais. A despeito disso, pouco ainda é dito sobre quais são as bases biológicas e como estas podem ser tratadas no desempenho esportivo. O presente texto procura caracterizar os aspectos cognitivos e sua correlação com o bom desempenho esportivo. Para tal, tratamos de (1) caracterizar modelos neuropsicológicos de atenção e memória, (2) como a interação das funções destes módulos se aplica ao treinamento por imaginação motora e (3) como se poderia analisar aspectos cognitivos do desempenho esportivo de atletas, com diferentes graus de habilidade, destreza e experiência, para se elaborar treinos específicos e identificar atletas com base em características cognitivas.

**Palavras-chave.** *Atenção; desempenho esportivo; identificação de talentos; imaginação motora; memória.*

**Abstract.** On learning the rules or training the skills necessary for sports performance, the cognitive aspects involving memory and attention are crucial. Despite this, little is said about which are the biological bases of cognition and how these can be handled on sports performance. The present revision intends to characterize some cognitive aspects and their relation with sports performance. In this sense, three aspects are important (1) characterize neuropsychological models of attention and memory, (2) how the interaction of these functions applies to training modules for motor imagination and (3) how one could analyze cognitive aspects of sports performance of athletes, with varying degrees of skill, dexterity and experience, to elaborate specific trainings and identify athletes based on cognitive characteristics

**Keywords.** *Attention; memory; motor imagination; sports performance; talent identification.*

Recebido 13jul12

Aceito 21fev12

Publicado 15jan14

## Introdução

Desde o início do século passado, com o princípio dos estudos da psicologia do esporte (Gould, 1995), se tenta tratar sobre as bases neurais do desempenho esportivo. Esse momento da história é também aquele em que ocorre a descrição de alguns dos princípios elementares do entendimento moderno sobre o próprio funcionamento neural (Gardner, 1985; Gould, 1995). Foi no início do século XX que Santiago Ramón Y Cajal fez as primeiras observações acuradas da composição celular do tecido neural. Também foi nas primeiras décadas do século XX que Hermann Ebbinghaus realizou seus primeiros experimentos sobre memória (Gardner, 1985). Dessa forma, não é exagero afirmar que a intersecção entre esporte e função neural coincide com a origem da neurociência.

Desde então, a relação entre neurociência e esporte seguiu diversas vertentes, que variam da identificação da melhora do desempenho esportivo relacionado ao treinamento por imaginação, do estudo de estratégias motivacionais e habilidades de dinâmica em grupo para a melhora do desempenho de atletas, até, apenas mais recentemente, a tentativa de identificação das funções

executivas que podem ser utilizadas como marcadores do bom desempenho esportivo (Vestberg e col., 2012).

O presente trabalho se propõe a tratar sobre algumas funções neurais e como estas poderiam se relacionar ao desempenho esportivo. Isso especialmente no que se refere ao treinamento por imaginação e a tentativa de identificação das funções executivas que podem ser utilizadas como marcadores de bom desempenho.

## 1. Cognição

Do ponto de vista biológico é aceito, assim como o é para outros sistemas fisiológicos, que as características funcionais encontradas no sistema nervoso central são o resultado de um longo processo de seleção natural (Klein e col. 2002). Isso leva a crer que, também assim como em outros sistemas, estas características funcionais podem ser sistemática e objetivamente estudadas com base em seu papel adaptativo. De fato, o estudo do sistema nervoso levou à produção de um conjunto vasto de conhecimento sobre de que maneira é possível tratar dessas funções conjuntamente descritas como cognitivas. Entre eles estão os estudos da neurociência que tratam das funções de memória e atenção.



1.1 Memória e Atenção

É comum que, por memória, se entenda a capacidade de alterar o comportamento a partir de uma experiência prévia e, por atenção, a capacidade de privilegiar o processamento de um conjunto específico de informações, seja uma região do ambiente ou um momento no tempo (Helene e Xavier, 2006). É importante observar que ambas estas definições ressaltam um aspecto importante destas funções, a capacidade de conferir plasticidade ao comportamento, aumentando a eficiência de uma resposta em função da antecipação de contingências ambientais conhecidas. Isso é especialmente importante se considerarmos que o sistema nervoso é marcado pela capacidade limitada de processamento de informações (Baddeley, 1992). Assim, privilegiar o processamento de um tipo de estímulo ou lugar do espaço pode ser crítico para a sobrevivência de um organismo, maximizando a eficiência de resposta dada a limitação de processamento do sistema. Tendo esses aspectos em mente, parece bastante razoável que o desempenho, incluindo aquele dado em circunstâncias de prática esportiva, em que continuamente a ação comportamental está sendo desafiada, seja suscetível a aspectos cognitivos.

1.2 Sistemas de Memória

Apesar de coloquialmente tratarmos memória como uma entidade única, é bastante comum que se faça uso da concepção de sistemas, ou tipos, de memória para descrever suas diferentes funções, tentando relacioná-las a diferentes regiões do sistema nervoso. Assim, é bastante aceito que se possa tratar de três tipos de memória: um sistema de memória operacional e outros dois de memória de longa duração, separados em dois subsistemas — um dito de memória explícita, e outro de memória implícita — Figura 1A.

A concepção de memória operacional derivou da idéia de memória de curta duração, como proposto por Atkinson e Shiffrin (1968). No entanto, a proposta modal destes autores foi posteriormente reformulada para lidar com tipos de retenção de informação separadamente, por curtos períodos de tempo. Assim, desenvolveu-se o conceito de memória operacional como um sistema de capacidade limitada e com múltiplos componentes (ver Bad-

deley e Hitch, 1974).

Segundo a proposta de Baddeley (1992), memória operacional compreende um sistema de controle de atenção, a central executiva, auxiliado por dois sistemas de suporte responsáveis pelo arquivamento temporário e manipulação de informações, um de natureza visuo-espacial e outro de natureza fonológica - Figura 1B. A central executiva, com capacidade limitada, seria o responsável pela seleção de estratégias e planos (Baddeley, 1992). Dessa forma é possível tratar das funções executivas com grande sobreposição com as habilidades atencionais, envolvidas nas estratégias de seleção de processamento preferencial (Helene e Xavier, 2006) de estímulos e ações. Tradicionalmente se concebe que tais capacidades estejam envolvidas com as funções corticais frontais.

Memória Explícita

Memória explícita é muitas vezes referida como “saber que”, e como o próprio nome sugere, refere-se a tudo aquilo que podemos relatar verbalmente, sobre nossas lembranças. De acordo com diferentes autores (Cohen, 1984; Squire e Knowlton, 1995), a memória explícita depende de estruturas localizadas no lobo temporal medial e no diencéfalo. De fato, desde a descrição dos estudos clássicos envolvendo pacientes amnésicos na década de 50 até aqueles mais recentes com primatas não-humanos (Scoville e Milner, 1957; Squire e Zola-Morgan, 1991) esta posição parece se manter. Mais ainda, deficiências progressivamente maiores são observadas em decorrência de lesões progressivamente mais extensas dessas áreas, envolvendo maior quantidade destas estruturas (Squire e Zola-Morgan, 1991). Esses resultados são consistentes com os observados em seres humanos, como sugerem alguns dos casos clássicos: o paciente R.B., com lesões restritas ao campo CA1 do hipocampo, exibiu uma amnésia menor que a do paciente H.M., que possuía lesões mais extensas da formação hipocampal.

O fato de memórias explícitas estarem associadas ao aprendizado de fatos e eventos remete a aspectos do esporte associados às suas regras e dinâmica e menos às habilidades em questão. Tradicionalmente, é entendido que a habilidade de jogar esteja associada de maneira mais direta às funções ditas de memória implícita.

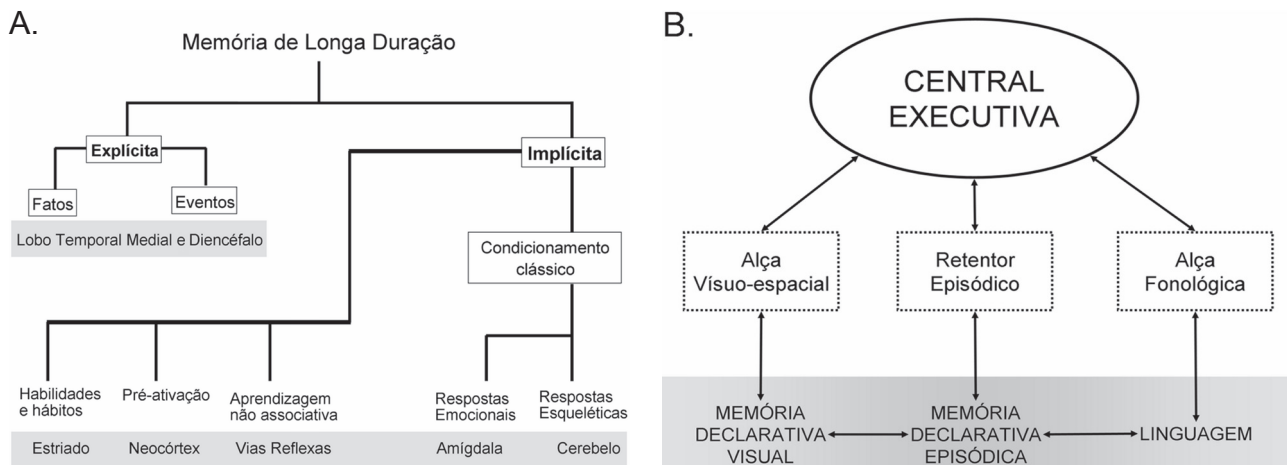


Figura 1: Esquematização dos modelos de sistemas (A) de memória de longa duração e (B) de memória operacional.

### Memória Implícita

Memória implícita é usualmente descrita como “saber como”, sendo “(...) revelada quando a experiência prévia facilita o desempenho numa tarefa que não requer a evocação consciente ou intencional daquela experiência” (Schacter, 1987, p. 501). Assim, memórias implícitas estariam ligadas ao processamento de informações que independem de um acesso “consciente” ao seu conteúdo e que poderiam ser adquiridas apenas por treino repetitivo da habilidade em questão. Subdivisões da memória implícita vêm sendo propostas e, como visto na Figura 1A, estão associadas a diferentes estruturas nervosas.

Tratando-se de habilidades e hábitos é bastante aceito que boa parte dos desafios envolvidos na prática esportiva seja do tipo não consciente, automático e, portanto, de memória implícita.

A aplicação dos modelos de sistemas de memória embasa as concepções acerca de como se pode caracterizar o aprendizado de habilidades específicas a partir da interação de áreas do sistema nervoso e módulos de memória.

## 2. Imaginação Motora Aplicada ao Esporte

Uma importante estratégia de treinamento esportivo envolve a imaginação motora (IM). A IM é definida como um estado dinâmico durante o qual representações de um dado ato motor são ensaiadas mentalmente na memória operacional sem que qualquer manifestação motora seja de fato executada (Decety, 1996) para a aquisição de memórias implícitas. Essa possibilidade leva a crer que tanto a imaginação de uma dada ação quanto a sua execução partilham um substrato cognitivo comum.

De fato, a IM vem sendo usada há décadas no treino esportivo como prática adicional ao treinamento físico. A supressão da execução dos movimentos é extremamente vantajosa no treinamento esportivo, dado que são comuns as lesões por sobrecarga das estruturas do sistema músculo-esquelético, como tendinites e fraturas por estresse. Qualquer treinamento que melhore o desempenho sem gerar custos teciduais é, portanto, bem-vindo nessa área.

### 2.1 Bases Anatômicas e Fisiológicas da Imaginação Motora

A partir de estudos anatômicos e funcionais realizados com tomografia por emissão de pósitrons e com ressonância magnética funcional foi observado que a IM leva frequentemente ao aumento do fluxo sanguíneo em áreas frontais, pré-motoras (córtex pré-motor dorsal e área motora suplementar), nos núcleos da base e no cerebelo (Grèzes e Decety, 2001). Esses dados mostram que a imaginação e a execução de movimentos utilizam, ao menos em parte, os mesmos mecanismos neurais, especialmente aqueles relacionados ao planejamento e à programação do movimento. Segundo essa interpretação, a imaginação motora seria, então, uma ação programada mas interrompida antes da execução (Decety, 1996), e todos os benefícios advindos do treinamento referente à preparação para a ação estariam presentes, de maneira semelhante, em um

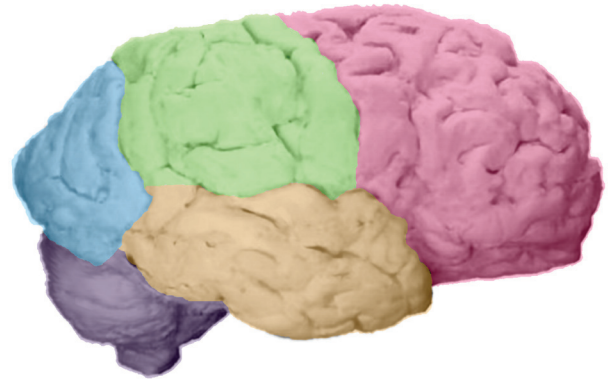


Figura 2: Áreas encefálicas ativas durante a imaginação motora (Grèzes e Decety, 2001). O córtex motor primário (em azul claro) é ativado durante a imaginação motora, porém em amplitude menor do que quando há a execução do movimento. Rostralmente a ele, estão as áreas pré-motoras propriamente ditas e a área motora suplementar (em vermelho). Elas são responsáveis pelo planejamento, programação, iniciação e direcionamento dos movimentos simples e complexos. A parte dorsal do giro frontal médio (em rosa) está envolvida em ações geradas internamente quando a decisão e a seleção da ação são subjetivas ou baseadas em informação retida na memória de trabalho. A parte ventral está envolvida na inibição da execução do movimento. As partes triangular e opercular do giro frontal inferior (em amarelo) correspondem às áreas 44 e 45 de Broadmann e estariam implicadas na verbalização silenciosa da imaginação motora. Em verde, temos o lóbulo parietal inferior, responsável pelo armazenamento, geração e acesso às representações motoras, função também conhecida como praxia. E em roxo temos o cerebelo.

treino imaginativo.

Além da ativação dos circuitos neurais diretamente relacionados ao movimento, a IM também promove alterações autonômicas (Decety, 1991), que vêm sendo utilizadas, inclusive, para medir o engajamento dos voluntários na IM (Papadelis et al., 2007). Essas alterações na frequência cardíaca e respiratória e da condutância da pele são usualmente interpretadas como parte da programação motora (ajustes autonômicos antecipatórios ao movimento) que não é eficazmente suprimida (Decety, 1991; Papadelis et al., 2007; Oishi e Maeshima, 2004).

No entanto, se inicialmente o córtex motor primário (M1) foi considerado como o local onde ocorreria a inibição do plano motor (antes de se tornar efetivamente uma ação motora) que seria apenas imaginado (Decety et al., 1994; Stephan et al., 1995; Parsons et al., 1995; Graf-ton et al., 1996), parece que há mais sobre imaginar ações. Diversos estudos mais recentes vêm mostrando consistentemente o envolvimento da área M1 na IM, como mostrado por Munzert e colaboradores (2009) em uma extensa revisão bibliográfica que incluiu estudos de neuroimagem, de magnetoencefalografia e de eletroencefalografia. Mais ainda, parece ser possível assumir que aprender pela imaginação seja uma atividade que faça parte do conjunto de tarefas ao qual o sistema nervoso esteja preparado a fazer.

### 2.2 A Imaginação Motora e o Desempenho Esportivo

A IM é capaz de promover diversas alterações comportamentais, tanto em habilidades básicas, como o au-

mento da força máxima voluntária (Ranganathan et al., 2004; Reiser, Büsch e Munzert, 2011) e da flexibilidade (Guillot, Tolleran e Collet, 2010), quanto em habilidades específicas, como, por exemplo, aumento dos acertos durante o saque no tênis (Coelho et al., 2007), melhora do arco formado pelo corpo durante o salto em altura (Olsson, Jonsson e Nyberg, 2008) e melhora no desempenho de golfistas novatos na primeira tacada (Brouziyne e Molinaro, 2005).

#### *Atletas Experientes Versus Novatos*

Entre os diversos fatores que determinam efetividade da IM está a experiência prévia do indivíduo com a tarefa em questão. É necessário considerar o quão específicas devem ser as representações mentais de um dado movimento para que possa existir a equivalência funcional (ou cognitiva) entre essas duas atividades: a imaginação e a execução de uma ação. Olsson e Nyberg (2010) propõem que o sucesso da IM no treinamento esportivo depende da existência prévia de representações específicas bem estabelecidas. Isso seria decorrência da melhor capacidade desses atletas de assumirem a perspectiva em primeira pessoa para a execução de uma tarefa complexa.

Brouziyne e Molinaro (2005) mostraram, no entanto, que a IM pode beneficiar atletas iniciantes. Em estudo realizado com jogadores de golfe na fase inicial de aprendizagem, mediu-se a distância (em zonas de proximidade) que a bola ficava em relação ao alvo após a tacada inicial, sendo que a bola era inicialmente colocada a 50m do alvo. Os voluntários foram divididos em três grupos, um que realizou o treinamento físico, outro que realizou a IM associada ao treinamento físico, e o controle, que realizou outras atividades durante as 5 sessões de treino. A prática física isolada e a combinada com IM não foram diferentes na avaliação após o treino em nenhuma das zonas. Além disso, a prática associada foi significativamente melhor do que o controle na zona mais periférica (distância do alvo maior que 6m), o que não aconteceu com a prática física exclusiva.

Geralmente a IM é utilizada para o aperfeiçoamento de tarefas nas quais os indivíduos já têm alguma prática física, como discutido acima. Isso acarreta em diversas vantagens para o sucesso da IM na melhora do desempenho real de tarefas motoras. No entanto, alguns pesquisadores vêm propondo que a IM pode também ser usada para a

aquisição de novas habilidades.

Se a experiência não é necessária, ela pode, no entanto, ser um fator importante na qualidade da IM, de forma que atletas experientes se beneficiariam mais do que os novatos adicionando a IM a seu treino. Possivelmente isso seria consequência da incapacidade dos novatos de assumir a perspectiva em primeira pessoa e, assim, ativar suficientemente as áreas motoras (Olsson et al., 2008).

#### *Modalidades de Imaginação Motora*

De fato, é importante considerar que a perspectiva (visual ou cinestésica) utilizada na IM interfere nos ganhos que o indivíduo tem com a prática (Schuster et al., 2011). Isso é, provavelmente, decorrência das diferenças entre os circuitos neurais que são ativados durante a imaginação. Ambos os tipos de imaginação ativam áreas motoras e os lóbulos parietais inferior e superior. Quando comparadas, no entanto, a imaginação visual (perspectiva em terceira pessoa) ativa principalmente áreas occipitais e o lóbulo parietal superior, enquanto que a cinestésica (em primeira pessoa) ativa mais as áreas motoras e o lóbulo parietal inferior (Guillot et al., 2009).

#### *Habilidades Motoras Diferentemente Suscetíveis à Imaginação Motora*

Outro fator que pode influenciar a efetividade da IM no esporte é a natureza da tarefa em si, ou o quanto da tarefa depende exclusivamente da programação motora do indivíduo e o quanto de fatores externos imprevisíveis. Alguns esportes, como o golfe, o tiro (com arma de fogo ou arco), a natação e a corrida, dependem muito pouco de variações ambientais. Outros, principalmente os coletivos, são caracterizados essencialmente por essa variação situacional, exceto por alguns momentos como o saque no tênis, o tiro livre ou o pênalti no futebol e o lançamento livre no basquete. Investigando essa questão, Coelho e colaboradores (2007), avaliaram os efeitos da IM sobre a habilidade de jogadores de tênis federados no saque e na recepção do saque. Os voluntários foram separados em dois grupos, um exclusivamente com a prática física e outro com três sessões semanais de IM associadas à prática física. Após oito semanas de treinamento, os autores encontraram que apenas o saque se beneficiava do treinamento adicional com IM, sugerindo que esse tipo de tarefa pode ser mais suscetível à IM do que as tarefas nas quais o ambiente é muito variável.

### **3. A Busca de Marcadores Cognitivos do Desempenho**

O conhecimento das capacidades cognitivas e seu desenvolvimento pode ajudar na compreensão dos resultados das capacidades técnico-táticas na atuação de um atleta, uma vez que entende-se que a ação do jogador é concretizada pela transformação dos processos mentais em uma atividade motora (Greco, 1999, apud Matias e Greco, 2009). Matias e Greco (2009) consideram que um gesto esportivo (um arremesso, um saque, etc) implica em uma função cognitiva, e o desempenho de um atleta pe-

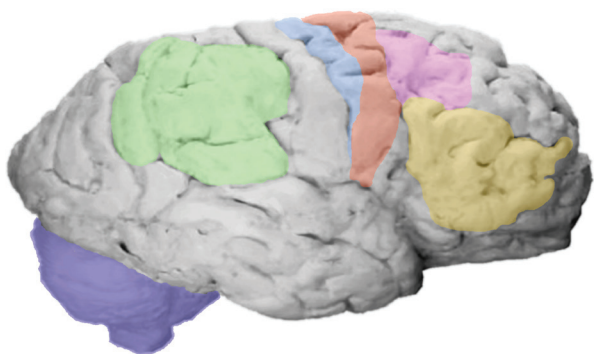


Figura 3: Subdivisões encefálicas: cerebelo (roxo), córtex frontal (rosa), córtex parietal (verde), córtex occipital (azul) e córtex temporal (amarelo).



rito, ou expert, é suportado pelos aspectos dessa função (McPherson, 1994; Dantas e Manoel, 2005, apud Matias e Greco, 2009). Sendo assim, um efetivo processo cognitivo, como a tomada de decisão, por exemplo, que inclui antecipação, reconhecimento de padrões e reconhecimento de sinais relevantes, contribui para o sucesso no esporte (Allard e Burnett, 1985; McPherson, 1994; Elfering-Gemser *et al.*, 2004; Greco, 2002; Dantas e Manoel, 2005; Poolton *et al.*, 2005, apud Matias e Greco, 2009).

A análise da aplicação desses aspectos ao futebol é de especial interesse, visto ser o esporte com maior participação e espectadores no mundo, sendo 265 milhões de jogadores ativos mundialmente (FIFA, apud Ali, 2010) e 32 bilhões de espectadores como audiência acumulada (ou seja, a soma de pessoas atingidas por uma programação num veículo, ou grupo de veículos, de informação) durante a Copa de 2006 na Alemanha (Ali, 2010).

### 3.1 O Futebol

O futebol é considerado um esporte complexo, com repetição de várias ações de disparo, alta variabilidade técnica, aleatoriedade e multiplicidade de escolhas, rápidas mudanças e imprevisibilidade. Estas condições levam os jogadores a freqüentes escolhas de comportamento recorrente de capacidades cognitivas e perceptuais, que parecem ser determinantes de seu desempenho no jogo (Ali, 2010).

Devido ao complexo contexto ambiental, para que um jogador seja bem sucedido durante uma partida é necessário que se adapte a esse contexto, sendo obrigado a decidir e elaborar respostas certas, rápidas e precisas (Sisto e Greco, 1995; Oliveira *et al.*, 2003, apud Matias e Greco, 2009). Ao considerar e saber interpretar informações tais como sua posição e a de seus parceiros e/ou adversários, localização e trajetória da bola, distância até o gol ou limite de campo, instruções de seu treinador, conhecimento da desenvoltura dos jogadores em campo, dentre outros, o jogador poderá elevar seu nível de 'leitura' (ou capacidade de tratar os sinais relevantes) de jogo e decidir mais adequadamente as ações frente a seus objetivos (Greco e Chagas, 1992; Thomas e Thomas, 1994; McPherson, 1994; French *et al.*, 1996; Kioumourtzoglou *et al.*, 2000; Williams *et al.*, 2003; Baker *et al.*, 2005; Poolton *et al.*, 2005; Banks e Millward, 2007; Raab e Johnson, 2007, apud Matias e Greco, 2009). Portanto, mesmo que a agilidade e técnica motora sejam muito relevantes, dominar habilidades cognitivas pode ser um fator determinante para que o atleta, mesmo sob pressão, aprimore seu desempenho diminuindo o tempo de decisão e o tempo de reação dessa decisão, e até antecipe mais facilmente jogadas adversárias (Ali, 2010; Matias e Greco, 2009; Williams, 2000).

Essa capacidade de ler o jogo com conseqüente tomada de decisão adequada é considerada um fator que distingue o sucesso de um jogador (Ali, 2010) e, diante da dificuldade dos clubes em identificar jogadores talentosos, o que se procura fazer, juntamente com técnicos, olheiros e administradores, é delinear efeitos chaves e desenvolver testes específicos que facilitem essa busca. Até então, os novos jogadores são selecionados por caça-talentos atra-

vés da observação de treinos e jogos, porém esse método é extremamente subjetivo e, por mais que o caça-talentos tenha conhecimento do ramo, a escolha é muito mais baseada em suas intuições do que em critérios objetivos. Sendo assim, existe uma necessidade dos clubes em desenvolver métodos mais efetivos e objetivos para a identificação de talentos (Williams, 2000).

### 3.2 Habilidades Perceptuais, Cognitivas e Motoras

Apesar da dificuldade de se avaliar as várias partes integrantes do futebol, existem testes que se propõem a examinar as habilidades perceptuais, cognitivas e/ou motoras dos jogadores para se tentar chegar a métodos mais eficientes na identificação de talentos. Em seus artigos, Ali (2010), Williams (2000) e Matias e Greco (2009) apresentam e analisam uma variedade desses testes, com as mais diferentes aplicações, porém os que nos interessam no momento são os de caráter cognitivo. A partir dos resultados obtidos em um conjunto de trabalhos (Ali, 2010; Williams, 2000; Matias e Greco, 2009) é possível observar que avaliações cognitivas podem ser usadas para aprimorar questões relativas tanto à validade, confiabilidade e sensibilidade dos testes quanto ao desenvolvimento do atleta ou de novas técnicas de busca de talentos através de conclusões sobre padrões de comportamento, leitura de postura e orientação corporal do oponente, utilização dos sinais para leitura de jogo, melhora na tomada de decisões e, conseqüentemente, melhora no desempenho do jogador. Ainda, parece ser possível afirmar que há diferença entre jogadores talentosos e não-talentosos (quanto ao bom desempenho de suas aptidões) e entre experientes e novatos (relativo a horas de treinamento, participação em competições, etc), o que talvez seja o mais importante, pois fundamenta o trabalho de identificação de talentos pela distinção entre as habilidades dos atletas.

De acordo com os resultados tratados por esses autores, jogadores de elite (talentosos e/ou experientes) são capazes de gerenciar estratégias baseadas em uma maior quantidade de informações para antecipar suas ações; antecipam maior quantidade de jogadas; reconhecem, analisam e processam informações com qualidade mais rapidamente; fazem escaneamento ocular com um padrão mais estruturado, consistente e de curta duração, focando não tanto no oponente em si ou na bola, mas em áreas no meio entre eles, por exemplo, possibilitando uma leitura mais ampla num breve intervalo de tempo (dados obtidos por aparelhos de eye tracking); reconhecem e recordam padrões estruturais de jogo; possivelmente 'eliminam' muitos eventos como sendo 'altamente improváveis' e anexam uma hierarquia de probabilidades dos eventos restantes; possuem superior execução de habilidades motoras; possuem melhor seleção dos sinais relevantes; reconhecem padrões de jogos de seus adversários; planejam ações; e possuem maior capacidade de adaptação a novas situações (Ali, 2010; Matias e Greco, 2009; Williams, 2000).

Em um estudo recente, realizado por Vestberg e colaboradores (2012), jogadores de futebol foram analisados em duas etapas: num primeiro momento foram submeti-



dos a testes laboratoriais, com o intuito de se avaliar suas funções executivas; e, após alguns meses, foram avaliados durante algumas partidas, onde a medida de desempenho foi baseada em quantidade de gols e assistências realizadas. Dessa forma, os pesquisadores observaram que há uma correlação entre habilidades cognitivas e motoras. Ainda, sugerem que o recrutamento de novos jogadores deveria considerar também medidas de funções executivas por testes neuropsicológicos, o que talvez ajude a identificar se um jogador tem a capacidade de alcançar níveis mais altos no futebol.

### 3.3 Medidas Atencionais e Esporte

Pensando no aprimoramento desses métodos de identificação de talentos, podemos considerar os aspectos atencionais como ponto de estudo de habilidades esportivas. Alguns autores, dentre eles Filgueiras (2010a, 2010b), estudam a atenção como processo importante no sucesso do jogador e consideram a orientação e manutenção da atenção como relevantes ao longo do evento esportivo. Apesar de se reconhecer a importância de tal processo no desempenho do atleta, ainda há pouco conhecimento consolidado e que consiga o explicar por completo, precisando ainda ser analisado em todas as suas facetas.

Talvez com a aplicação do teste de Posner (1980), em que o participante é submetido a uma tarefa de busca visual (com utilização de ponto de fixação - pista - alvo), possam ser levantados mais dados que enriqueçam o aprimoramento tanto da identificação de talentos através de novos métodos mais eficazes quanto do desempenho dos atletas pelo desenvolvimento de técnicas e táticas de treino que favoreçam o domínio da atenção seletiva dos jogadores em campo.

Num estudo realizado por Rohenkohl e colaboradores (2012), os pesquisadores se propuseram a analisar o fato de que constantemente geramos e atualizamos as expectativas sobre eventos relevantes que possam ocorrer para lidarmos com a rica e rápida mudança de cenário a qual o nosso sistema sensorial é constantemente exposto. Segundo os autores, a tendência antecipatória não se restringe somente aos sinais sobre as características espaciais do objeto, mas também se estendem ao domínio temporal. O estudo sugere que o arraste do foco atencional para estrutura temporal de eventos externos atua como um mecanismo central para a modulação perceptual de informações sensoriais relevantes, ou seja, expectativas temporais podem aumentar a percepção de eventos relevantes modulando diretamente a excitabilidade perceptual e melhorando funções perceptivas visuais anteriores, aumentando a qualidade da representação sensorial, sendo que o aumento na sensibilidade psicofísica é acompanhado por uma redução nos tempos de reação. As conclusões levantadas nesse trabalho podem ser utilizadas no aprimoramento de testes de identificação de talentos devido a seu alto valor informativo sobre respostas perante questões cognitivas.

Seja no aprendizado das regras de um jogo ou, mais ainda, das habilidades envolvidas em sua prática, por exemplo em como deve ser o movimento da mão para

que uma bola possa alcançar seu destino final, a trajetória que ela deve ter para que seu adversário não a alcance, ou na forma como o movimento do corpo de seu adversário indica a trajetória que ele pretende seguir, os aspectos envolvendo memória e atenção de experiências relacionadas ao esporte são críticos para o bom desempenho na prática esportiva. A despeito disso, muito pouco ainda é dito sobre quais são ou como podem ser tratadas as aptidões comportamentais e suas bases biológicas no desempenho esportivo.

Pesquisadores e profissionais do esporte consideram que o desempenho de um atleta resulta da interação entre suas aptidões físicas, motoras, técnico-táticas, cognitivas, dentre outras. Apesar das três primeiras capacidades citadas terem sido mais amplamente abordadas nos estudos até o momento, mais recentemente a cognição tem sido ressaltada, especialmente devido à sua reconhecida importância para um bom desempenho do atleta em sua modalidade. Mais ainda, o desenvolvimento de técnicas de treinamento e seleção de atletas deve caminhar na compreensão de como aspectos cognitivos influenciam o desempenho esportivo. Numa área de intersecção tão antiga, a neurociência aplicada ao esporte deve, cada vez mais, gerar contribuições importantes.

### Referências Bibliográficas

- Ali A. 2010. Measuring soccer skill performance: a review. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 21:170-183.
- Atkinson RC, Shiffrin RM. 1968. Human memory: a proposed system and its control processes. In: *The psychology of learning and motivation: advances in research and theory*. New-York: Academic Press 89-195.
- Baddeley AD. 1992. Working memory. *Science* 255:556-559.
- Baddeley AD, Hitch G. 1974. Working memory. In: Bower GA (Ed.). *The Psychology of Learning and Motivation*. New York: Academic Press. 8:47-89.
- Brouziyne M, Molinaro, C. 2005. Mental imagery combine with physical practice of approach shots for golf beginners. *Perceptual and motor skills* 101:203-211.
- Coelho R, Campos WD, Silva SD, Ozakaki F, Keller B. 2007. Imagery intervention in open and closed tennis motor skill performance. *Perceptual and motor skills* 105:458-468.
- Cohen NJ. 1984. Preserved learning capacity in amnesia: evidence for multiple memory systems. In Squire LR, Butters N (Eds.). *The Neuropsychology of Memory*. New York: Guilford Press 83-103.
- Decety J, Jeannerod M, Germain M, Pastène J. 1991. Vegetative response during imagined movement is proportional to mental effort. *Behavioral Brain Research* 42:1-5.
- Decety J, Perani D, Jeannerod M, Bettinardi V, Tadary B, Woods R, Mazziota JC, Fazio F. 1994. Mapping motor representations with positron emission tomography. *Nature* 371:600-601.
- Decety J. 1996. Do imagined and executed actions share the same neural substrate? *Cognitive Brain Research*, 3:87-93.
- Filgueiras A. 2010. Abordagem Neuropsicológica dos Processos de Orientação da Atenção Visuo-Espacial e Manutenção da Concentração em Atletas da Categoria Sub-13 de Futebol de Campo. *Ciências & Cognição* 15:142-154.
- Filgueiras A. 2011. A Influência de Características dos Uniformes de Times de Futebol no Tempo de Reação Manual em

- Tarefas de Orientação da Atenção Visual. *Ciências & Cognição* 16:19-34.
- Gardner H. 1985. *A nova ciência da mente*. São Paulo: EDUSP.
- Gould D, Pick S. 1995. Sport psychology: the Griffith Era, 1920–1940. *The Sport psychologist* 9:391-405.
- Grafton ST, Arbib MA, Fadiga L, Rizzolatti G. 1996. Localization of grasp representations in humans by positron emission tomography. 2. Observation compared with imagination. *Experimental Brain Research* 112:103-111.
- Grèzes J, Decety J. 2001. Functional anatomy of execution, mental simulation, observation, and verb generation of actions: a meta-analysis. *Human Brain Mapping* 12:1-19.
- Guillot A, Collet c, Nguyen VA, Malouin F, Richards C, Doyon J. 2009. Brain activity during visual versus kinesthetic imagery: an fMRI study. *Human Brain Mapping* 30:2157-2172.
- Guillot A, Tollerón C, Collet C. 2010. Does motor imagery enhance stretching and flexibility? *Journal of Sports Sciences* 28:291-298.
- Helene AF, Xavier GF. 2006. Working memory and acquisition of implicit knowledge by imagery training, without actual task performance. *Neuroscience* 139:401-413.
- Klein SB, Cosmides L, Tooby J e Chance Klein S. 2002. Decisions and the evolution of memory: multiple systems, multiple functions. *Psychological Review* 109: 2, 306–329.
- Matias CJ, Greco PJ. 2010. *Cognição & Ação nos Jogos Esportivos Coletivos*. *Ciências & Cognição*. 15:252-271.
- Munzert J, Lorey B, Zentgraf K. 2009. Cognitive motor processes: the role of motor imagery in the study of motor representations. *Brain Research Reviews* 60: 306-326.
- Oishi K, Maeshima T. 2004. Autonomic nervous system activities during motor imagery in elite athletes. *Journal of Clinical Neurophysiology* 21: 170-179.
- Olsson CJ, Jonsson B, Nyberg L. 2008. Internal imagery training in active high jumpers. *Scandinavian Journal of Psychology* 49:133-140.
- Olsson CJ, Nyberg L. 2010. Motor imagery: if you can't do it, you won't think it. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports* 20:710-715.
- Papadelis C, Kourtidou-Papadeli C, Bamidis P, Albani M. 2007. Effects of imagery training on cognitive performance and use of physiological measures as an assessment tool of mental effort. *Brain and cognition* 64: 74-85.
- Parsons LM, Fox PT, Downs JH, Glass T, Hirsch TB, Martin CC, Jerabek PA, Lancaster JL. 1995. Use of implicit motor imagery for visual shape discrimination as revealed by PET. *Nature* 375:54-58.
- Posner, M.I. 1980. Orienting of Attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32, 3-25.
- Ranganathan VK, Siemionow V, Liu JZ, Sahgal V, Yue GH. 2004. From mental power to muscle power: gaining strength by using the mind. *Neuropsychologia* 42:944-956.
- Reiser M, Büsch D, Munzert J. 2011. Strength gains by motor imagery with different ratios of physical to mental practice. *Frontiers in Psychology* 2:1-8.
- Rohenkohl G, Cravo AM, Wyart V, Nobre AC. 2012. Temporal expectation improves the quality of sensory Information. *The Journal of Neuroscience* 32:8424-8428.
- Schacter DL. 1987. Implicit memory: history and current status. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 13:501-508.
- Schuster C, Hilfiker R, Amft O, Scheidhauer A, Andrews B, Butler J, Kischka U, Ettlin T. 2011. Best practice for motor imagery: a systematic literature review on motor imagery training elements in five different disciplines. *BMC Medicine* 9:75.
- Scoville WB, Milner B. 1957. Loss of recent memory after bilateral hippocampal lesions. *Journal of Neurology Neurosurgery and Psychiatry* 20:11-20.
- Squire LR, Knowlton BJ. 1995. Memory, hippocampus, and brain systems. In Gazzaniga MS (Ed.). *The cognitive neurosciences*. Cambridge: A Bradford Book 825-837.
- Squire LR, Zola-Morgan S. 1991. The medial temporal lobe memory system. *Science* 253:1380-1386.
- Stephan KM, Fink GR, Passingham RE, Silbersweig D, Ceballos-Baumann AO, Frith CD, Frackowiak RS. 1995. Functional anatomy of the mental representation of upper extremity movements in healthy subjects. *Journal of Neurophysiology* 73:373-386.
- Vestberg T, Gustafson R, Maurex I, Ingvar m, Petrovic P. 2012. Executive functions predict the success of top-soccer players. *PLoS ONE* 7:e34731.
- Williams, AM. 2010. Perceptual skill in soccer: implications for talent identification and development. *Journal of Sports Sciences* 18:737-750.