

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE EDUCAÇÃO FÍSICA

Marcela Alves Sanseverino

**CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS BIOMECÂNICOS E A ECONOMIA
DE CORRIDA**

Porto Alegre
2012

Marcela Alves Sanseverino

**CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS BIOMECÂNICOS E A ECONOMIA
DE CORRIDA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Programa de Graduação em Educação
Física – Bacharelado da Escola de Educação
Física da Universidade Federal do Rio Grande
do Sul.

ORIENTADOR: Leonardo Alexandre Peyré-
Tartaruga

CO-ORIENTADOR: Jorge Luiz Lopes
Storniolo Junior

Porto Alegre
2012

RESUMO

A Teoria de Geração de Força foi primeiramente proposta por Taylor (1980) aplicada à corrida de mamíferos. O autor sugere que o consumo de energia metabólica estaria principalmente relacionado com a força exercida pela musculatura ativa durante esta atividade. Com isso, o volume muscular ativo seria proporcional ao tamanho do animal que se locomove, pois a força gerada está ligada com a sustentação do peso corporal. Além disso, esse consumo de energia também deve ser proporcional ao tempo disponível para aplicação de força no solo, o qual corresponde ao tempo em que o pé mantém contato com o solo durante a corrida. Neste caso, quanto menor o tempo que o animal tem para gerar a força, maior seria o despêndio metabólico durante a corrida. Com isso, o objetivo do estudo foi verificar e correlacionar esses parâmetros biomecânicos da teoria de geração de força com a economia de corrida avaliada em um grupo de corredores. Foram selecionados treze corredores para participar dessa pesquisa, os quais realizaram testes de consumo máximo de oxigênio ($VO_{2MÁX}$), economia de corrida (ECO) - com análise cinemática - e uma prova de 10.000 metros de corrida em pista aberta. No software *LabVIEW* 8.5 foram criadas três rotinas matemáticas com base nas equações advindas da literatura. Para análise estatística verificou-se a normalidade dos dados através do teste de *Shapiro-Wilk*. Além disso, foram desenvolvidas análises descritivas e de correlação Produto-Momento de *Pearson* ($\alpha = 0,05$) entre as variáveis apresentadas nas equações preditivas com aquelas avaliadas diretamente durante os testes. Além da ECO, variáveis advindas das equações, como o valor de energia dispendida durante a corrida (E_{trans}), a força vertical aplicada no solo (\bar{F}) e o coeficiente de custo (c) também foram utilizadas, assim como o tempo de contato (t_c) e a frequência de passo (\dot{N}). A correlação entre a ECO e E_{trans} demonstrou-se fraca ($r = -0,26$). Da mesma forma, ECO não apresentou forte correlação com as variáveis espaço-temporais (t_c , $r = -0,26$; \dot{N} , $r = -0,01$), o que demonstra certa fragilidade das equações propostas pela literatura. Por outro lado, \bar{F} apresentou uma forte correlação com o ECO ($r = 0,92$), o que evidencia que essa variável pode influenciar nessa resposta fisiológica. Soma-se a isso a forte correlação encontrada entre \bar{F} e c ($r = 0,91$). Portanto, a partir desses resultados, pode-se afirmar que o sujeito com maior ECO aplicará uma força com maior magnitude durante o t_c , pois esta variável apresentou uma forte correlação linear com a ECO. Concluiu-se que a teoria pode explicar as determinantes da energia metabólica dispendida pelos animais vertebrados durante a corrida de uma forma abrangente. No entanto, quando aplicada especificamente a um grupo homogêneo (mamíferos bípedes treinados), ela não representa a quantidade de energia gasta para essa atividade de forma precisa.

Palavras-chave: energia metabólica; equações preditivas; locomoção humana

ABSTRACT

The theory of generating force was first proposed by Taylor (1980) applied to the running of mammals. The author suggests that the metabolic energy consumption would be mainly related to the force exerted by the musculature active during this task. Consequently, the volume of active muscles should be proportional to the size of the animal that moves. Furthermore, this consumption should also be proportional to the time available to apply the force on the ground, and this corresponds to the time the foot maintain contact with the ground. In this case, the smaller is the time the animal has to generate the force, greater is the metabolic expenditure during running. Thus, the objective of this study was to verify and correlate these biomechanical parameters of the theory of generating force with running economy evaluated in a group of runners. Thirteen runners were selected to participate in this study. They were submitted to maximal oxygen consumption (VO_{2MAX}) test, running economy (ECO) test – with kinematic analyses – and a 10.000 meters running test in an open track. In the software *LabVIEW* 8.5 three mathematical routines were created based on the equations found on the literature. For statistical analyses it was verified if the data was parametric through *Shapiro-Wilk* test. Moreover, descriptive analyses were developed and Pearson's Product-moment correlation ($\alpha = 0,05$) were developed between the variables presented in the predictive equations and those evaluated during directly tests. Besides the ECO, variables coming from the equations, as the value of energy expenditure (E_{trans}), the vertical force apply on the ground (\bar{F}) and cost coefficient (c) were also used in the analyses, as well as the contact time (tc) and the step frequency (\dot{N}). The correlation between ECO and E_{trans} was weak ($r = -0,26$). ECO also did not show a strong correlation with spatiotemporal variables (tc , $r = -0,26$; \dot{N} , $r = -0,01$), showing some fragility of the equations proposed by the literature. Contrarily, \bar{F} presented a strong correlation with ECO ($r = 0,92$), which evidences that that this variable may influence on physiological responses. Additionally, a strong correlation was found between \bar{F} and c ($r = 0,91$). Therefore, through these results, it is possible to affirm that the subject with higher ECO will apply a force with larger magnitude during tc , because this variable presented a strong linear relationship with ECO. In conclusion, the theory can explain the determinants to the energy consumption of all vertebrate animals during running in general. However, when applied to a specific homogeneous group (bipeds trained mammals), the theory does not represent the energy expenditure to this task.

Keywords: metabolic energy; predictive equations; human locomotion

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE EQUAÇÕES	7
LISTA DE TABELAS	8
LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E UNIDADES	9
1. INTRODUÇÃO	10
1.1 O problema e sua importância	10
1.2. Objetivos	12
1.2.1. Objetivos Gerais	12
1.2.2. Objetivos específicos	12
1.3. Hipóteses	13
2. REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1. Energética da Corrida	14
2.2. Biomecânica da Corrida.....	15
2.3. Teoria da Geração de Força	17
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
3.1. População e Amostra	20
3.2. Procedimento para a Seleção da Amostra	20
3.3. Instrumentos de Medida	20
3.4. Variáveis	21
3.5. Procedimentos de coleta de dados	22
3.5.1. Consumo Máximo de Oxigênio	22
3.5.2. Teste de Economia de Corrida	22
3.5.3. Prova de 10.000 metros	23
3.6. Análise dos dados	23
3.6.1. Descrição das Equações	23
3.6.2 Construção das Rotinas	24
3.7. Análise Estatística	25
4. RESULTADOS.....	26
5. DISCUSSÃO	30
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
7. REFERÊNCIAS	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Respostas do comprimento (círculos pretos), frequência de passada (círculos brancos), tempo aéreo (círculos pretos) e tempo de contato (círculos brancos). (Adaptado de NUMMELA <i>et al.</i> , 2007).....	17
Figura 2 - Coeficientes de correlação de <i>Pearson</i> (r) entre as variáveis: (A) TP (s) vs ECO ($J.kg^{-1}.m^{-1}$); (B) E_{trans} ($J.m^{-1}$) vs ECO ($J.kg^{-1}.m^{-1}$); (C) c ($J.N^{-1}$) vs \bar{F} (N); (D) tc (s) vs \bar{F} (N)	27

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	16
Equação 2.....	16
Equação 3.....	16
Equação 4.....	23
Equação 5.....	24
Equação 6.....	24
Equação 7.....	24
Equação 8.....	24
Equação 9.....	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização da Amostra.....	26
Tabela 2 - Coeficientes de correlação entre as variáveis analisadas.....	26

LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E UNIDADES

cp	Comprimento de passada
c	Coefficiente do custo
ECO	Economia de corrida
\dot{E}_{metab}	Energia metabólica
E_{trans}	Custo de transporte
\bar{F}	Força externa vertical
fp	Frequência de passada
\dot{N}	Frequência de passo
ta	Tempo aéreo
tc	Tempo de contato
tp	Tempo da passada
TP	Tempo de prova
v	Velocidade
VO ₂	Consumo de oxigênio
VO _{2MÁX}	Consumo máximo de oxigênio
m	Metros
J	Joules
J.m ⁻¹	Joules por metro
J.s ⁻¹	Joules por segundo
ml.kg ⁻¹ .min ⁻¹	Mililitro por quilograma minuto
ciclos.s ⁻¹	Ciclos por segundo
N	Newtons
J.kg ⁻¹ .m ⁻¹	Joules por quilograma metro

1. INTRODUÇÃO

1.1 O problema e sua importância

O treinamento esportivo está sempre buscando a melhor maneira de avaliar seus atletas para poder alcançar melhor planejamento a fim de prepará-los e obter melhor desempenho possível. A avaliação da corrida humana pode ser realizada a partir da verificação do consumo máximo de oxigênio ($VO_{2MÁX}$), da determinação de limiares ventilatórios ou da economia de corrida (ECO). A literatura tem mostrado que este último parâmetro metabólico tem se correlacionado melhor com o desempenho para atletas de alto rendimento (NUMELLA *et al.*, 2007; FLETCHER *et al.*, 2009).

Diante disso, a teoria de geração de força proposta por Taylor *et al.* (1980) procura explicar a origem desta energia metabólica dispendida durante a corrida. Ela afirma que esse despêndio não está baseado somente na sustentação da massa corporal durante o tempo de atividade ($ml.kg^{-1}.min^{-1}$). Segundo os autores, além da massa corporal, a força aplicada em cada período do passo ($J.N^{-1}.s^{-1}$) também influencia no gasto de energia durante a corrida de mamíferos.

Além da influência de aplicação de força, o despêndio metabólico também pode ser expresso através da distância percorrida. Esse comportamento é definido como custo de transporte e caracteriza-se pelo despêndio de uma unidade de energia para transportar uma unidade de massa corporal por metro percorrido ($J.kg^{-1}.m^{-1}$). Essa variável, quando analisada na corrida, também pode ser denominada como economia de corrida (ECO), pois é conceituada como o gasto energético em relação à distância percorrida. Dessa forma, o indivíduo mais econômico (do ponto de vista metabólico) é aquele capaz de despendar menos energia metabólica para a mesma distância percorrida (DI PRAMPERO *et al.*, 1986; DENADAI, 1996)

Diante disso, Kram & Taylor (1990) estudaram a corrida em cinco espécies de mamíferos e propuseram três equações com o mesmo objetivo: predição do consumo energético durante a corrida, tanto em função do tempo como em função da distância percorrida. Segundo os autores, esse despêndio está relacionado a um custo para manter o peso corporal durante o tempo disponível para geração de força. Esse tempo para gerar força estaria associado ao tempo de aplicação do passo no solo. Eles afirmaram que a maior parte da força produzida pelos músculos é uma ação em oposição à

gravidade. Além disso, o volume muscular ativo produziria a mesma quantidade de força sem considerar a velocidade, ou o tamanho do animal. Por fim, os músculos trabalhariam de forma similar em relação a força por eles produzida e suas velocidades de encurtamento, sem considerar a velocidade da corrida e o tamanho do animal.

Baseado nesse último pressuposto, afirmou-se que animais menores requerem fibras mais rápidas em altas velocidades, pois eles possuem um menor comprimento de membros inferiores. Assim, os tempos para aplicação de força também diminuiriam. Os autores concluíram que a hipótese estava correta, visto que seus resultados mostraram que o consumo de energia metabólica é influenciado pelo tempo para aplicação de força e o custo para suportar o peso corporal em mamíferos abrangendo entre 30 g a 140 kg.

Roberts *et al.* (1998) basearam-se nos mesmos pressupostos de Kram & Taylor (1990) e utilizaram as mesmas equações para comparar a corrida de animais bípedes com quadrúpedes. Para tal comparação eles calcularam o coeficiente de custo (c), que expressa a proporção entre a energia metabólica dispendida relativa ao peso corporal e a taxa de aplicação de força (inverso do tempo de contato). Os resultados demonstraram que os animais bípedes consomem em média duas vezes mais energia que quadrúpedes de mesma massa corporal em uma mesma velocidade de corrida. Com isso, foi possível concluir que os bípedes recrutam maior volume muscular para suportar seu peso corporal, e que provavelmente outros fatores podem contribuir para a diferença encontrada, tais como a velocidade relativa de encurtamento dos músculos.

Nesse contexto, Sih & Stuhmiller (2003) demonstraram que tanto parâmetros biomecânicos da corrida, como aspectos da fibra muscular, também podem influenciar o consumo de energia metabólica durante a corrida. Essa conclusão atribuiu-se a partir da proposição de uma nova equação, baseada na frequência de passo e na força externa aplicada durante o contato do pé com o solo. Contudo, as correlações utilizadas entre o c em diferentes movimentos, para diferentes espécies de animais não apresentou robustez. Diante disso, eles acrescentam a necessidade de estudos que avaliem a frequência de contração do músculo, e a força muscular gerada por estas contrações. Esses dois fatores baseiam-se no princípio no qual o músculo trabalha com sua velocidade mais eficiente de contração (BOTTINELLI & REGGIANI, 2000).

Com isso, a utilização dessas equações para predição da energia metabólica consumida durante a corrida de bípedes ainda não apresentou resultados conclusivos para os humanos. Além disso, sabe-se que apenas fatores ligados à biomecânica da corrida (utilizados nessas equações), não são suficientes para estimar a energia

metabólica. Por isso, este estudo tem por objetivo investigar os parâmetros biomecânicos sugeridos pela teoria de geração de força durante a corrida e correlacionar suas variáveis com a ECO (mensurada diretamente e estimada pelas equações) em humanos corredores de rendimento.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos Gerais

- Correlacionar a economia de corrida calculada a partir das equações com aquela calculada no laboratório.
- Correlacionar as variáveis propostas pela teoria de geração de força na corrida humana.
- Verificar a força externa vertical aplicada em cada passo a partir da equação proposta pela teoria de geração de força.

1.2.2. Objetivos específicos

- Correlacionar a força externa vertical calculada através da equação proposta Sih & Stuhmiller (2003) com o tempo de contato.
- Correlacionar a força externa vertical calculada através da equação proposta Sih & Stuhmiller (2003) com a economia de corrida coletada a partir da calorimetria indireta.
- Correlacionar a força externa vertical calculada através da equação proposta Sih & Stuhmiller (2003) com o peso corporal.
- Correlacionar a força externa vertical calculada através da equação proposta Sih & Stuhmiller (2003) com o coeficiente do custo calculado a partir de uma equação por Kram & Taylor (1990).
- Correlacionar o coeficiente do custo calculado a partir de uma equação por Kram & Taylor (1990) com o tempo de contato.
- Correlacionar o coeficiente do custo calculado a partir de uma equação por Kram & Taylor (1990) com o peso corporal.
- Correlacionar o coeficiente do custo calculado a partir de uma equação por Kram & Taylor (1990) com a economia de corrida coletada a partir da calorimetria indireta.
- Correlacionar a economia de corrida coletada a partir da calorimetria indireta com o peso corporal.

- Correlacionar a economia de corrida coletada a partir da calorimetria indireta com o tempo de contato.
- Correlacionar a economia de corrida coletada a partir da calorimetria indireta com o desempenho dos atletas na corrida de 10.000 metros.

1.3. Hipóteses

As variáveis biomecânicas, principalmente, a frequência de passo (\dot{N}), o tempo de contato (t_c) e a força vertical externa aplicada ao solo (\bar{F}) correlacionam-se de forma significativa com a economia de corrida (ECO). Além disso, c tem comportamento constante e por este motivo não apresenta uma forte correlação com nenhuma outra variável do estudo. Espera-se encontrar correlação importante entre ECO com o custo de transporte (E_{trans}) e dessas com o desempenho dos corredores na prova de 10.000 metros.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Energética da Corrida

Durante a locomoção, os animais dispendem energia metabólica durante a contração muscular. Essa energia química é transformada em energia mecânica para que o movimento seja realizado (TAYLOR *et al.*, 1982). O despêndio de energia usualmente pode ser calculado pelo consumo de oxigênio durante a caminhada, corrida ou outra forma de locomoção, conforme o modelo animal analisado. Esse dado obtido é expresso como a quantidade de oxigênio consumido durante a corrida relativo à massa corporal e pelo tempo da atividade. Para converter esse dado em energia metabólica, utiliza-se uma constante metabólica, o qual assume que o metabolismo utilizado é predominante o aeróbio (BLAXTER, 1989). Dessa forma tem-se uma potência metabólica que representa a quantidade de energia dispendida relativa ao tempo (TAYLOR *et al.*, 1982).

O custo metabólico é um valor que advém da energia metabólica e expressa a energia dispendida para determinada atividade realizada em intensidade constante. Para isso, ela analisa a diferença entre os consumos de energia metabólica durante o exercício e o repouso, relativizando-a pela distância percorrida (KYROLAINEN *et al.*, 2003; SAIBENE & MINETTI, 2003). Essa variável é definida usualmente como economia de corrida (ECO), pois ela representa a quantidade de energia utilizada para mover uma unidade de sua massa corporal em uma unidade de distância (FLETCHER *et al.*, 2009).

Esse despêndio de energia por unidade de distância também é avaliado durante outras formas de locomoção e demonstra comportamentos diferentes em cada uma delas em relação à velocidade. Pois, durante a caminhada, existe uma velocidade intermediária no qual o custo de transporte é mínimo. Geralmente, essa velocidade equivale à velocidade auto selecionada pelo sujeito durante esse tipo de locomoção. Enquanto isso, em velocidades abaixo e acima desta, o custo para transportar uma unidade de energia metabólica por metro percorrido aumenta, ilustrando uma dependência a partir da velocidade assumida para a caminhada. Por outro lado, a corrida apresenta um comportamento para ECO independente da velocidade selecionada. Dessa forma, o aumento da velocidade não acarreta em um maior consumo de energia metabólica pela distância percorrida (CAVAGNA & KANEKO, 1977; SAIBENE &

MINETTI, 2003). Apesar disso, deve-se levar em consideração que esse gasto de energia corresponde somente ao metabolismo aeróbio, o qual não contabiliza a porção anaeróbia durante a atividade constante (DI PRAMPERO *et al.*, 1986; FLETCHER *et al.*, 2009). Diante disso, a contribuição do componente anaeróbio ainda necessita de maiores investigações devido a dificuldade em mensurar a quantidade de energia representada por essa rota metabólica durante o exercício (MEDBO *et al.*, 1988; KANEKO, 1990; DI PRAMPERO *et al.*, 2009).

Além da locomoção em humanos, o custo de transporte também foi avaliado em cavalos (caminhada, trote e galope), comparando-os com a caminhada de seres humanos. Este apresentou um comportamento similar entre as marchas, visto que o custo energético demonstrou menor valor em uma velocidade intermediária para cada marcha. Ao comparar esse valor mínimo entre cada forma de locomoção, observou-se um comportamento constante do consumo de energia metabólica (MINETTI *et al.*, 1999).

2.2. Biomecânica da Corrida

A corrida é definida como uma atividade cíclica, representada pela sucessão de pequenos saltos (saltitos) e caracterizada por uma fase aérea. Do ponto de vista biomecânico ela pode ser dividida pelos ciclos de passada. Cada ciclo é mensurado a partir do primeiro toque do pé no solo até um novo toque deste mesmo pé. Para avaliação biomecânica da corrida pode-se contabilizar o número de passadas realizadas em uma unidade de tempo, resultando na frequência de passada (fp; CAVAGNA *et al.*, 1988; BLICKHAN, 1989). **Da mesma forma, pode-se realizar essa análise por passo, cujo ciclo inicia com o toque de um pé com o solo e encerra com o toque subsequente do pé contralateral. Ao analisar a quantidade de ciclos por minuto, tem-se a variável ~~defini-se como~~ frequência de passo** (Ñ; NOVACHEK, 1998). Além desse valor, pode-se mensurar o comprimento de passada (cp), ou seja, a distância do primeiro toque do pé com o solo até o novo toque deste mesmo pé. Além disso, avalia-se o tempo de cada passada. Este tempo pode ser dividido em tempo aéreo (*ta*) e tempo de contato (*tc*). O primeiro refere-se ao momento em que nenhum dos pés está em contato com o solo. Esse período representa a fase de voo da corrida. Enquanto isso, *tc* é o tempo em que o pé está em contato com o solo. Essas medidas são analisadas principalmente através da cinemática (análise de uma sequência de quadros).

Esses parâmetros são diretamente influenciados pela velocidade da corrida e possuem características diferentes. Com o aumento da velocidade, tanto fp , quanto cp , aumentam seus valores. Não obstante, o tempo de passada (tp) assim como o ta e tc , tendem a diminuir com a velocidade de corrida (NUMELLA *et al.*, 2007 - figura 1). Essas proporções podem ser avaliadas a partir das seguintes equações, que apresentam uma forma de calcular a velocidade a partir dos parâmetros biomecânicos da corrida (SIH & STUHMILLER, 2003):

$$v = cp \times fp \quad (1)$$

$$v = \frac{cp}{tp} \quad (2)$$

Onde, v é a velocidade de corrida em metros por segundos, cp é expresso em metros, fp em número de ciclos por segundos e tp em segundos. É importante ressaltar que o inverso do tp é igual à fp (SIH & STUHMILLER, 2003).

$$fp = \frac{1}{tp} \quad (3)$$

Além da cinemática, outros parâmetros podem ser analisados durante a corrida. Eles correspondem à dinamometria, que mensuram as forças de reação do solo durante a realização de cada passo. Elas são uma resposta à força que se aplica no solo no momento do contato do pé e podem ser divididas nos eixos vertical e horizontal (anteroposterior e médio-lateral). A primeira é descrita pela aceleração da gravidade no centro de massa (que resulta no peso corporal, pois é a massa corporal multiplicada pela aceleração da gravidade), equilibrada pelo impulso gerado pelo membro inferior no momento do contato com o solo. A componente horizontal da força é descrita primeiramente pela desaceleração do centro de massa na primeira metade da fase de apoio, para depois movimenta-lo à frente. Estas duas componentes se comportam, conforme anteriormente apresentado, em velocidade constante com os parâmetros fisiológicos estáveis (ROBILLIARD & WILSON, 2005).

A força externa vertical está diretamente relacionada à elevação do centro de massa durante o ciclo do passo e seus níveis de magnitude são maiores do que às de força externa anteroposterior (NILSSON & THORSTENSSON, 1989). De acordo com Sih & Stuhmiller (2003), a energia metabólica é dispendida principalmente para gerar impulso vertical.

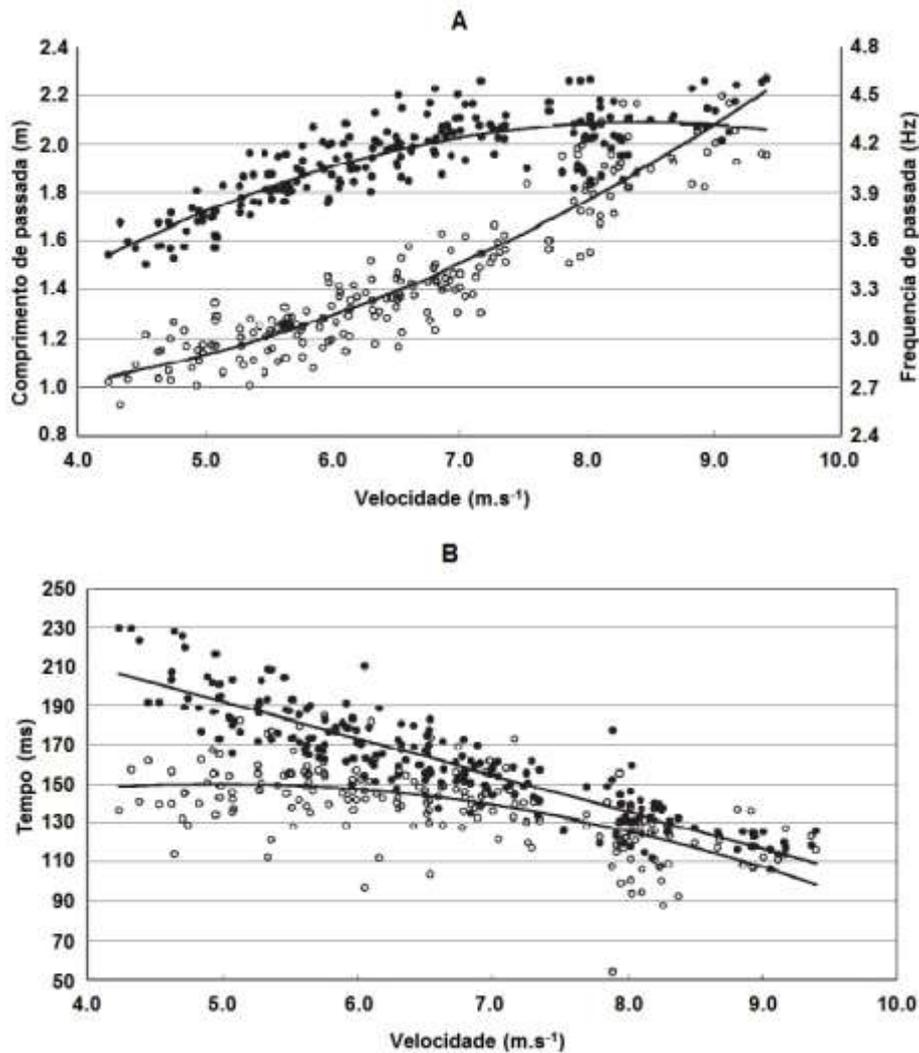


Figura 1 – Parâmetros biomecânicos da corrida de 25 atletas de elite em diferentes velocidades de corrida. (A) comprimento de passada (círculos pretos) e frequência de passada (círculos brancos). (B) tempo aéreo (círculos pretos) e tempo de contato (círculos brancos). Adaptado de NUMMELA *et al.* (2007).

2.3. Teoria da Geração de Força

Segundo Hill (1950), existem três propriedades semelhantes para os músculos de todos os vertebrados, sem considerar o tamanho corporal: força por área de secção transversa, trabalho máximo para cada grama de músculo ativo durante a contração, e eficiência máxima de cada músculo para converter energia química em energia mecânica. Diante disso, acreditou-se que animais pequenos trabalhariam e consumiriam energia em taxas mais elevadas, comparados com animais maiores, pois esses animais precisam realizar um número maior de passadas para cobrir a mesma distância percorrida por um animal maior (TAYLOR, 1985). Essa característica estaria presente

nesses animais devido ao seu menor comprimento de membro, e, portanto, possuiriam uma passada menor (ROBERTS *et al.*, 1998).

Com isso, para que esses animais percorram a mesma distância, quando comparados com animais maiores, eles deverão dispendir mais energia metabólica, em virtude do maior percentual de fibras rápidas (tipo IIX) presente na musculatura do aparelho locomotor (ALEXANDER, 2002). Diante desse aspecto, sabe-se que esse tipo de fibra é mais fatigável e consome mais energia metabólica durante sua contração, quando comparado com fibras lentas (tipo I). Dessa forma seu despêndio energético seria maior, comparado a um animal de maior tamanho (TAYLOR *et al.*, 1982).

Com isso, Taylor (1980) propôs uma equação de forma empírica que predizia a energia dispendida através do peso corporal e da velocidade, com dados advindos da corrida de mamíferos. Posteriormente, Taylor *et al.* (1982) analisaram dados advindos da literatura, com novos dados de mamíferos maiores, com o objetivo de ampliar o número de animais avaliados. Com isso, eles propuseram uma equação para cada grupo de animais com base em cálculos alométricos, afirmando que a energia metabólica estava relacionada à massa corporal e à velocidade.

Com base na literatura descrita, Kram & Taylor (1990) formularam equações para estimar a energia metabólica consumida durante a corrida. Para tal experimento, os autores correlacionaram as variáveis biomecânicas espaço-temporais com a \dot{E}_{metab} expressa como uma potência, e ECO. Assumiram-se três pressupostos, os quais afirmavam que a taxa metabólica dispendida durante a fase de balanço poderia ser desconsiderada, pois possui valor muito pequeno em comparação à taxa necessária para sustentar o peso corporal. Além disso, acreditava-se que, durante a corrida, a variação do comprimento muscular comporta-se de forma similar, independente do peso e da velocidade. E, por fim, os autores presumiram que o volume muscular ativo seria proporcional ao peso corporal dos corredores, pois a maior parte da energia produzida seria utilizada para suportá-lo.

Além disso, foi possível observar que animais menores, como ratos, têm altas taxas metabólicas dispendidas, por possuírem um maior percentual de fibras rápidas, e com isso, utilizá-las com maior frequência, pois possuem menores passadas (TAYLOR *et al.*, 1980). Soma-se a isso o fato de que o tempo de contato de cada pé com o solo é o tempo disponível para produção de força em cada passo. Portanto, a taxa metabólica seria proporcional ao peso corporal e ao tempo disponível para produzir força (KRAM & TAYLOR, 1990; ROBERTS *et al.*, 1998).

Sih & Stuhmiller (2003) sugeriram uma nova equação originada a partir da equação de Kram & Taylor (1990). Contudo, os autores adicionaram à equação a ideia de energia dispendida por passo, proposta por Gold (1974). Além disso, ao invés de utilizar o peso corporal, eles utilizaram a força de reação do solo vertical, uma vez que esta pode variar de acordo com a atividade a ser realizada. Com isso, formularam uma equação que prediz a \dot{E}_{metab} dispendida durante uma atividade física, a partir da f_p e da \bar{F} .

Logo, o custo de locomoção é influenciado pelo custo de ativação muscular e de geração de uma unidade de força por uma unidade de tempo (HEGLUND *et al.*, 1988). O volume muscular ativo produzirá energia metabólica para gerar movimentos de oposição à gravidade. Mas também será inversamente proporcional ao t_c , pois quanto menor esse tempo, maior será a ativação de fibras rápidas, resultando em um maior despêndio energético (KRAM & TAYLOR, 1990). Da mesma forma, a f_p influencia a energia dispendida, pois quanto mais passos são realizados durante um determinado período de tempo avaliado, mais contatos do pé com o solo estarão ocorrendo (SIH & STUHMILLER, 2003).

Essas proporções irão indicar uma potência, ou seja, a \dot{E}_{metab} gasta durante a atividade da corrida. Mas se este valor for relativo à velocidade, ele será caracterizado como um custo metabólico de transporte para uma determinada distância percorrida. Assim, este valor não indicará simplesmente o despêndio energético, e sim o quanto de energia um animal necessita para mover um quilograma de massa corporal em uma unidade de distância (KYRÖLÄINEN *et al.*, 2001).

Desta forma, a teoria de geração de força poderia ser utilizada para explicar a economia de corrida de humanos, assim como já está descrita sua importância para esclarecer as diferenças de gasto metabólico entre os animais.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. População e Amostra

O cálculo amostral (n) foi fundamentado em três estudos, os quais apresentam semelhança nas avaliações com esta pesquisa. Entre eles está o estudo de Ingham *et al.* (2008) que investigou os fatores determinantes do desempenho em provas de 800 e 1.500 metros. Além dele, o trabalho de Conley & Krahenbuhl (1980) também foi incluso, pois determinou a relação entre economia de corrida (ECO) e desempenho de corredores de 10.000 metros. E, por fim, o estudo de Lloyd & Zacks (1972), que investigou a eficiência mecânica da corrida em esteira rolante de corredores de rendimento. O cálculo foi realizado para amostras emparelhadas por meio do programa PEPI (*Computer Programs for Epidemiologic Analyses*) versão 4.0, sendo adotado um nível de significância de 0,05, um poder de 80% e um coeficiente de correlação (r) de 1 para todas as variáveis.

Com base nos desvios-padrão e nas diferenças entre as médias obtidas dos estudos anteriores citados, os cálculos realizados demonstraram a necessidade de um n de no mínimo doze participantes.

3.2. Procedimento para a Seleção da Amostra

Este estudo contou com a participação de treze corredores homens para compor a amostra. Eles foram convidados a participar da pesquisa por comunicação oral, foram selecionados por voluntariedade e antes do início da familiarização, leram e assinaram o termo de consentimento livre e esclarecido (TCLE). Além disso, os corredores deveriam ter experiência mínima de dois anos em corrida de 10.000 metros sem apresentar problemas físicos e nem estar em tratamento farmacológico.

O projeto obteve aprovação do Comitê de ética em Pesquisa da Universidade Estadual do Centro-Oeste (COMPESQ – UNICENTRO), número FR-463742.

3.3. Instrumentos de Medida

Para este estudo, foram utilizados os equipamentos do Laboratório de Pesquisa do Exercício (LAPEX) da Escola de Educação física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EsEF – UFRGS).

- Balança e estadiômetro da marca FIZOLA com resolução de 100 g e 1 mm respectivamente;
- Fita métrica da marca STARRETT de 1 m comprimento e resolução de 1 mm;
- Barômetro aneroide da marca SUUNTO com resolução de 1 mbar;
- Termômetro da marca INCOTERM com resolução de 1 °C;
- Calibrador tridimensional PEAK PERFORMANCE (Peak Performance Tchnologies Inc., Englewood, USA);
- Equipamento de ergoespirometria MEDGRAPHICS *Cardiorespiratory Diagnostic Sytem* (MGC/CPX, USA) com software Breeze 3.06;
- Marcadores anatômicos reflexíveis com diâmetro de 1 cm;
- Filmadora da marca CASIO (EX-FH25) com frequência de amostragem de 240 quadros por segundo;
- Holofote de 500 watts da marca DISANO;
- Esteira rolante da marca QUINTON com velocidade máxima de 26 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ e inclinação máxima de 40%, resolução de 0,01 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ e 1% respectivamente;
- Microcomputador portátil da marca Acer;
- Software *DVideow*, versão 5.0;
- Software *LabVIEW*, versão 8.5.

3.4. Variáveis

- Custo de transporte, E_{trans} ($\text{J}\cdot\text{m}^{-1}$);
- Energia metabólica, \dot{E}_{metab} ($\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$);
- Economia de corrida, ECO ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$);
- Peso corporal, W_b (N);
- Tempo de contato, t_c (s);
- Frequência de passo, \dot{N} ($\text{ciclos}\cdot\text{s}^{-1}$);
- Coeficiente do custo, c ($\text{J}\cdot\text{N}^{-1}$);
- Força externa vertical, \bar{F} (N);
- Tempo da prova de 10.000 metros, TP (s).

3.5. Procedimentos de coleta de dados

A coleta de dados foi realizada em três sessões, sendo as duas primeiras de avaliação e a terceira uma prova de 10.000 metros de corrida em esforço máximo. A primeira avaliação foi de consumo máximo de oxigênio ($VO_{2MÁX}$) e a segunda foi um teste de ECO. Todos os participantes foram instruídos a não ingerir cafeína até duas horas antes do teste e não estarem em jejum para a realização das coletas.

No primeiro dia de coleta os participantes leram e assinaram o TCLE. Além disso, foram realizadas as medidas de estatura e de massa corporal dos participantes.

3.5.1. Consumo Máximo de Oxigênio

Este teste tem por objetivo determinar o consumo máximo de oxigênio (VO_{2MAX}) e o limiar anaeróbio (LA). Esses valores serviram para caracterizar a amostra e determinar a velocidade de corrida submáxima para o teste de ECO.

Primeiramente, foi coletado o consumo de oxigênio (VO_2) de repouso com os participantes sentados e em pé totalizando aproximadamente 6 minutos. A seguir, o teste máximo foi realizado com cargas progressivas em esteira rolante. A corrida inicial correspondeu a 10 km.h^{-1} e cada minuto havia o incremento de 1 km.h^{-1} na velocidade. A inclinação da esteira foi mantida em 1% durante todo o teste. Para determinação do VO_{2MAX} foi analisado o platô do consumo de oxigênio a partir de dois estágios consecutivos sem que a taxa de troca respiratória ultrapassasse 1,15.

3.5.2. Teste de Economia de Corrida

Assim como o teste anterior, foi coletado durante seis minutos o VO_2 de repouso dos sujeitos. Para o teste de ECO, foi utilizada uma velocidade constante correspondente à 13 km.h^{-1} equivalente a 80% da velocidade média do LA de toda a amostra. Uma vez que o VO_2 estabilizou na velocidade do teste, foram registrados os valores de VO_2 durante 3 minutos. Além disso, foram realizadas as filmagens nos 30 segundos finais do teste.

Para a análise cinemática, marcadores reflexivos foram fixados em pontos anatômicos de referência. Os pontos foram colocados no maléolo lateral, na tuberosidade lateral do calcâneo e na tuberosidade do quinto osso metatarso tanto do lado direito quanto no esquerdo.

As imagens foram obtidas com quatro filmadoras digitais da marca CASIO (EX-FH25), com frequência de 240 quadros por segundo. O desenho experimental pode ser observado através da figura 2. Em cada câmera foram anexados holofotes da marca DINASO para reflexão dos marcadores.

Para aquisição dos valores de ECO, foi utilizada a média do platô de VO_2 coletado durante a corrida, subtraída pela média do VO_2 de repouso. O resultado da subtração foi multiplicado pela constante 20,1 Joules por mililitro, a qual assume que o metabolismo utilizado é predominantemente aeróbio durante a atividade, quantificando a medida em um valor de energia (TAYLOR *et al.*, 1982). Por fim, multiplicou-se pela velocidade de corrida do teste em metros por segundos (m.s^{-1}). Dessa forma, obteve-se a ECO (J.kg.m^{-1}).

3.5.3. Prova de 10.000 metros

Em um terceiro momento, todos os participantes compareceram à pista de atletismo da Escola de Educação Física da UFRGS, com objetivo de participarem de uma prova de corrida de 10.000 metros. Eles foram orientados e incentivados a apresentarem o melhor desempenho neste teste. O tempo final de cada atleta, assim como os tempos parciais a cada cinco voltas foram mensurados.

3.6. Análise dos dados

3.6.1. Descrição das Equações

A primeira equação formulada por Kram & Taylor (1990) expressa a relação inversa da energia metabólica específica ao peso corporal do animal com o tc do pé com o solo. Além disso, a equação conta com uma constante chamada de c que expressa justamente essa proporção.

$$\frac{\dot{E}_{\text{metab}}}{W_b} = c \times \left(\frac{1}{tc}\right) \quad (4)$$

Na equação, a \dot{E}_{metab} tem como unidade J.s^{-1} , o W_b em N, o c em J.N^{-1} e tc em s.

Para obter um valor de custo de transporte (E_{trans}) é necessário multiplicar a energia metabólica pela velocidade (v), dessa forma, o resultado expressa a quantidade de energia dispendida em uma unidade de distância. Este valor no presente estudo denomina-se ECO (J.m^{-1}).

$$\frac{E_{\text{trans}}}{W_b} = \frac{\dot{E}_{\text{metab}}}{W_b \times v} \quad (5)$$

A unidade da economia nesta equação é joules por metros ($\text{J} \cdot \text{m}^{-1}$) e a velocidade é em metros por segundo ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Ao combinar as equações 2 e 4 com a equação anterior, surge uma nova forma de cálculo para a ECO

$$\frac{E_{\text{trans}}}{W_b} = \frac{c}{L_c} \quad (6)$$

Sih & Stuhmiller (2003), com bases nessas equações e nas proporções sugeridas por Gold em 1974, formularam uma nova forma de calcular a energia metabólica dispendida durante a locomoção.

$$\dot{E}_{\text{metab}} = c \times \bar{F} \times \dot{N} \quad (7)$$

Nesta última equação, \bar{F} representa a força externa vertical e \dot{N} é a frequência de passo.

3.6.2 Construção das Rotinas

A construção das rotinas no software *LabVIEW* 8.5 foi baseada nas equações descritas no capítulo anterior. Portanto, os dados de entrada foram as variáveis existentes em cada uma delas. Para sua utilização nas equações, o VO_2 ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) foi transformado em \dot{E}_{metab} através da multiplicação pela constante 20,1 Joules e da posterior divisão por 60 s.

Na primeira rotina, calculou-se o c para cada um dos sujeitos pela equação 4 (Kram & Taylor, 1990). Para tanto, fez-se necessário isolá-lo na equação da seguinte maneira:

$$c = \frac{\dot{E}_{\text{metab}} \times t_c}{W_b} \quad (8)$$

Para o cálculo da \bar{F} construiu-se outra rotina. Nesta rotina o c calculado na rotina anterior serviu como dado de entrada. Ele foi inserido como uma constante, uma vez que a proposta dos autores foi expressar uma proporção igual entre a energia metabólica relativizada pelo peso corporal e a taxa de aplicação de força no solo entre as espécies. Para isto calculou-se a média do c amostral. Essa rotina foi feita pela equação 7 (Sih & Stuhmiller, 2003), na qual foi isolou-se \bar{F} :

$$\bar{F} = \frac{\dot{E}_{\text{metab}}}{\dot{N} \times c} \quad (9)$$

A terceira rotina estimou a \dot{E}_{metab} e a E_{trans} através das equações 4 e 5. Assim como na rotina anterior, o c foi colocado como uma constante calculada pela média do c amostral.

3.7. Análise Estatística

A estatística descritiva, com médias e desvios-padrão, foi utilizada para observar o comportamento das variáveis dentro do grupo de corredores. Os dados foram normalizados pelo teste de *Shapiro-Wilk* e a homogeneidade das variâncias analisada pelo teste de *Levene*. Além disso, foi desenvolvida a correlação Produto-Momento de *Pearson* ($\alpha = 0,05$). Essa correlação verificou a relação existente entre as variáveis espaço-temporais e a ECO, uma vez que as equações buscam prever a energia metabólica dispendida a partir destas. Outra relação verificada foi entre a \bar{F} calculada através da rotina matemática, com a ECO, visto que, segundo a teoria de geração de força, a \bar{F} seria importante para determinar a energia dispendida. Além disso, \bar{F} também foi correlacionada com o W_b , uma vez que essa última variável é uma das componentes de \bar{F} . Além disso, o c , também calculado através da rotina, foi correlacionado com \bar{F} , t_c , W_b e a ECO, visto que c é a constante advinda da própria teoria que expressa a proporcionalidade entre essas variáveis. Outra relação verificada foi entre a força vertical calculada através das equações e a economia de corrida, com as variáveis espaço-temporais. E por fim, o c , também calculado pelas equações, foi correlacionado com o t_c do pé com o solo, com a \bar{F} , o W_b e a ECO.

4. RESULTADOS

As características dos corredores que fizeram parte deste estudo são mostradas na tabela 1 através de médias e desvios-padrão. A tabela ilustra os valores de consumo máximo de oxigênio ($VO_{2MÁX}$), massa corporal (mc), economia de corrida (ECO) e coeficiente de custo (c).

Tabela 1 – Caracterização da Amostra.

$VO_{2MÁX}$ ($ml.kg^{-1}.min^{-1}$)	mc (kg)	ECO ($J.kg^{-1}.m^{-1}$)	c ($J.N^{-1}$)
52,7 ($\pm 6,4$)	77,3 ($\pm 9,9$)	3,0 ($\pm 0,4$)	0,3 ($\pm 0,1$)

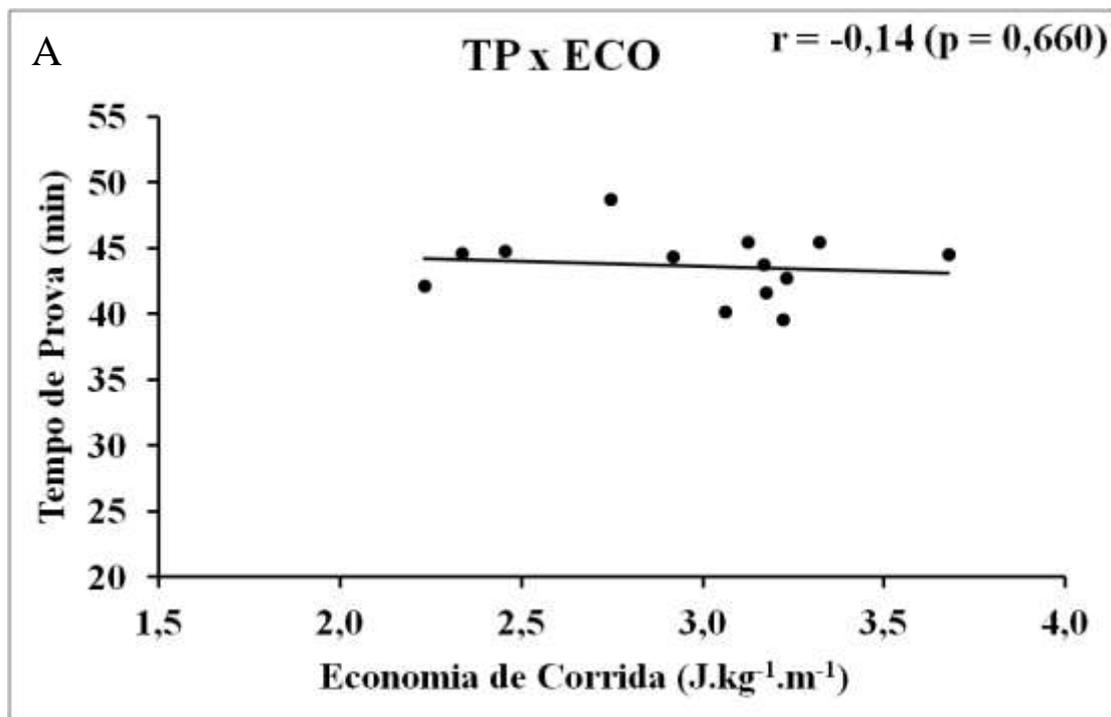
A tabela 2 informa as correlações de economia de corrida (ECO), a força vertical (\bar{F}) calculada através da rotina e do coeficiente de custo (c) também calculado por rotina com as demais variáveis advindas da equação da teoria de geração de força. Os valores apresentados são o coeficiente de correlação de *Pearson* (r) e a significância do teste realizado (p). As maiores correlações foram encontradas entre c com a ECO e com a \bar{F} . Obteve-se comportamento similar entre os valores de ECO e a \bar{F} . Contudo, correlações entre tc com ECO, e \dot{N} com a \bar{F} não apresentaram uma forte correlação, as quais esperavam ser encontradas para esses parâmetros.

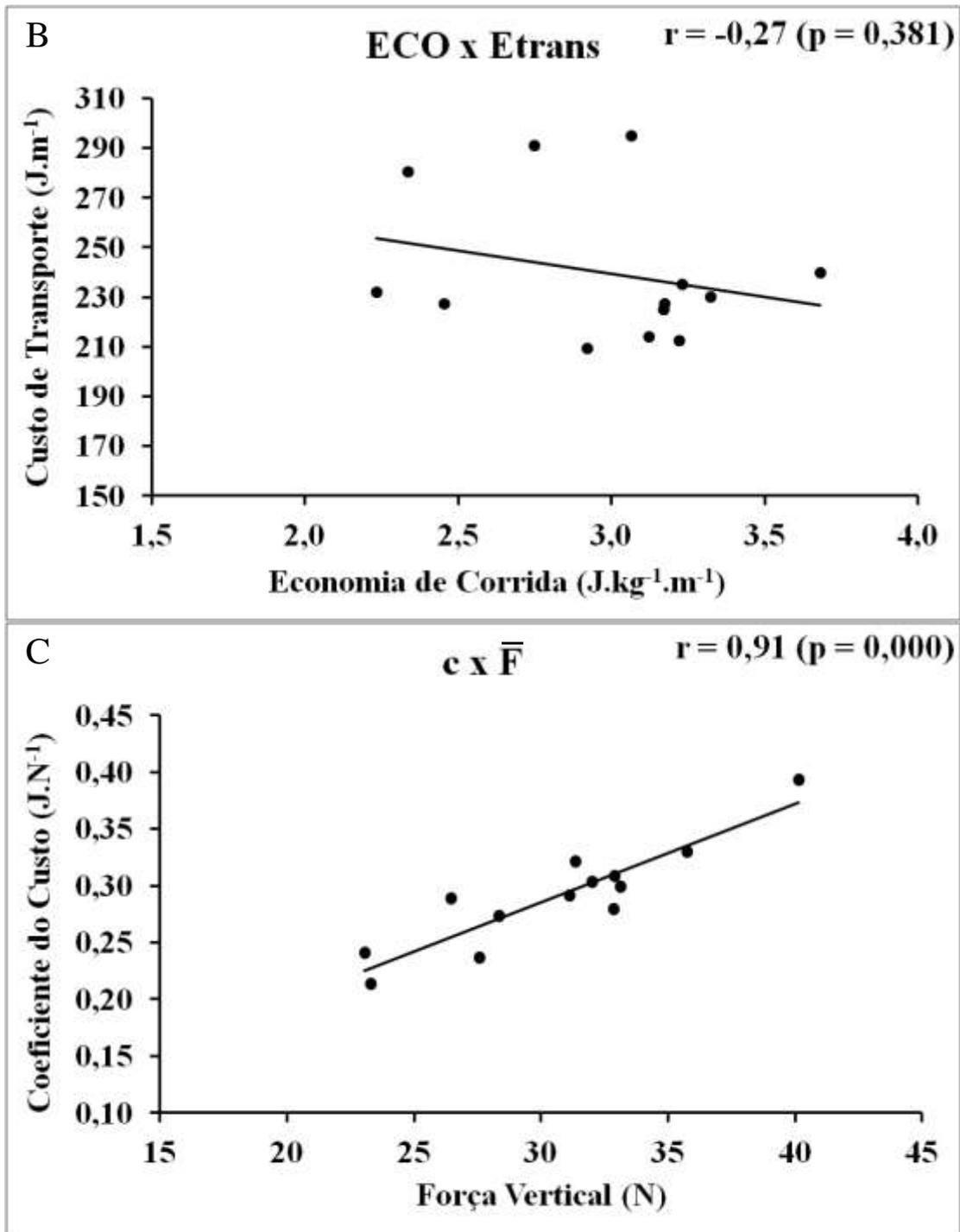
Tabela 2 – Correção das variáveis da Teoria de Geração de Força. Os valores assinalados (**) possuem $p \leq 0,001$.

	ECO ($J.m^{-1}$)	c ($J.N^{-1}$)	\dot{E}_{metab} ($J.s^{-1}$)	E_{trans} ($J.m^{-1}$)	\bar{F} (N)	TP (s)	W_b (N)	tc (s)	\dot{N} ($ciclo.s^{-1}$)
ECO ($J.m^{-1}$)	1	$r = 0,83^{**}$ $p = 0,001$	$r = -0,27$ $p = 0,381$	$r = -0,27$ $p = 0,381$	$r = 0,92^{**}$ $p = 0,000$	$r = -0,14$ $p = 0,660$	$r = -0,41$ $p = 0,169$	$r = -0,26$ $p = 0,385$	$r = -0,01$ $p = 0,967$
c ($J.N^{-1}$)	$r = 0,83^{**}$ $p = 0,001$	1	$r = -0,39$ $p = 0,183$	$r = -0,39$ $p = 0,183$	$r = 0,91^{**}$ $p = 0,000$	$r = 0,16$ $p = 0,614$	$r = -0,18$ $p = 0,556$	$r = -0,32$ $p = 0,188$	$r = -0,39$ $p = 0,183$
\bar{F} (N)	$r = 0,92^{**}$ $p = 0,001$	$r = 0,91^{**}$ $p = 0,001$	$r = -0,45$ $p = 0,128$	$r = -0,45$ $p = 0,128$	1	$r = 0,07$ $p = 0,828$	$r = -0,43$ $p = 0,146$	$r = -0,02$ $p = 0,939$	$r = -0,39$ $p = 0,187$

A figura 3A ilustra a fraca correlação negativa entre o TP e a ECO ($r = -0,14$; $p = 0,660$), indicando que a variável metabólica mensurada a partir da calorimetria indireta não obteve relação com o desempenho dos corredores na prova de 10.000 metros. Além disso, a figura 3B também ilustra uma fraca correlação negativa entre ECO e E_{trans} ($r =$

-0,27; $p = 0,38$), que representa igualmente a correlação de ECO com \dot{E}_{metab} ($r = -0,27$; $p = 0,38$), demonstrando que a economia obtida através de teste laboratorial não possui comportamento proporcional com a calculada pela equação. A figura 3C apresenta graficamente uma forte correlação entre \bar{F} e c ($r = 0,91$; $p = 0,000$), ressaltando a variação da segunda variável. Uma fraca correlação foi apresentada entre \bar{F} e tc ($r = -0,02$; $p = 0,939$) está representada na figura 3D, indicando que a variável espaço-temporal pode não representar a taxa de aplicação de força para essa população, como sugerido pela teoria de geração de força.





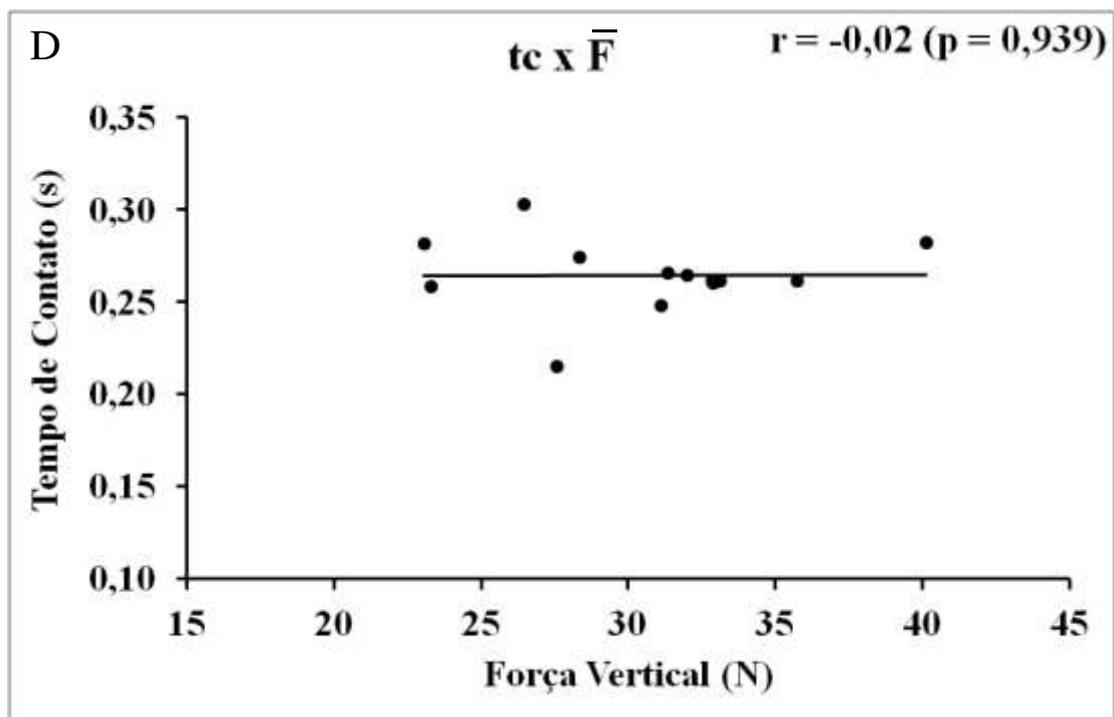


Figura 3 – Os gráficos das figuras a cima representam o coeficiente de correlação de *Pearson* (r) e os respectivos coeficiente de significância (p) entre, nos eixos vertical e horizontal respectivamente: (A) TP (s) vs ECO ($J.kg^{-1}.m^{-1}$); (B) E_{trans} ($J.m^{-1}$) vs ECO ($J.kg^{-1}.m^{-1}$); (C) c ($J.N^{-1}$) vs \bar{F} (N); (D) tc (s) vs \bar{F} (N).

5. DISCUSSÃO

A ECO vem sendo apontada como importante ferramenta de predição de desempenho em humanos (DI PRAMPERO *et al.*, 1986; FLETCHER *et al.*, 2009). Por essa razão, acreditava-se que uma correlação entre moderada e forte poderia ser alcançada entre a ECO e o TP da amostra estudada. No entanto, o presente estudo não encontrou uma correlação significativa entre essas duas variáveis ($r = -0,14$). A justificativa para essa correlação não apresentar altos valores, pode estar na homogeneidade do grupo estudado, cujos participantes obtiveram valores similares de ECO ($3,0 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \pm 0,4$), a falta de variação poderia impossibilitar um comportamento linear crescente entre as variáveis que corresponderia a uma correlação significativa, diferente da encontrada.

Um dos principais resultados do presente estudo apresentou uma importante correlação entre a ECO e o c ($r = 0,83$). Contudo, não esperava-se esse comportamento entre as variáveis, pois de acordo com a teoria de geração de força, c expressaria a proporcionalidade entre a energia dispendida relativa ao peso corporal e a taxa de aplicação de força, e deveria ser constante dentro de uma espécie. Da mesma forma, não esperava-se uma alta correlação, como a encontrada entre \bar{F} e c ($r = 0,91$). Por outro lado, uma vez que a \bar{F} foi calculada a partir da média do próprio c , é possível que essa correlação indique que o valor igual de c utilizado para calcular a força de todos os sujeitos represente com acurácia a população estudada nesta determinada velocidade.

Outro importante resultado apresentado nesse estudo foi a baixa correlação negativa entre os valores de ECO com \dot{E}_{metab} e E_{trans} ($r = -0,27$ para ambos). Estes valores, conforme descrito anteriormente, foram calculados pelas equações de Kram & Taylor (1990), que originalmente haviam sido formuladas para mamíferos. Porém, estudos subsequentes (ROBERTS *et al.*, 1998; SIH & STUHMILLER, 2003) haviam apontado certa fragilidade das equações quando utilizadas para predição de energia dispendida em animais bípedes. Por outro aspecto, não pode-se descartar totalmente a utilização destas equações, pois, o c calculado através delas apresentou eficiência no cálculo posterior de \bar{F} .

Além disso, acreditava-se que correlações significativas ocorreriam entre as variáveis espaço-temporais (t_c e \dot{N} , principalmente) e a ECO, e que estas apresentariam altos valores, devido à relação direta predita pela teoria de geração de força entre elas e a energia metabólica utilizada durante a corrida (KRAM & TAYLOR, 1990). Soma-se a

isso a baixa correlação apresentada entre \bar{F} e t_c ($r = -0,02$) e entre \bar{F} e \dot{N} , uma vez que também esperava-se maior correlação, pois de acordo com a teoria de geração de força, as duas variáveis espaço-temporais representam o tempo existente para que o animal aplique a força produzida contra o solo pelos músculos, e por isso, quanto maior a \dot{N} , ou menor o t_c , maior a força gerada e, por consequência, maior o gasto energético (TAYLOR, 1985).

Dessa forma, pode-se sugerir que tal comportamento deva-se a análise cinemática ter sido realizada em apenas uma velocidade, diferentemente de outros estudos, nos quais t_c diminui seus valores com o aumento da velocidade e a \dot{N} aumenta com o mesmo incremento (KYRÖLAINNEN *et al.*, 2001; NUMMELA *et al.*, 2007). Como os corredores foram avaliados apenas a 13 km.h^{-1} , essas variáveis apresentaram pouca variabilidade, permanecendo constantes para os participantes da pesquisa.

No entanto, outros estudos haviam demonstrado resultados semelhantes. Foi sugerido, então, que apenas as variáveis biomecânicas não seriam suficientes para estimar a energia metabólica consumida durante atividades físicas. Para solucionar essa questão eles sugeriram uma equação com base em parâmetros ao nível da fibra muscular como variação do comprimento durante a contração, a força muscular gerada e a frequência de contração, contudo essa proposta ainda não apresentou dados conclusivos (SIH & STUHMILLER, 2003).

Apesar da baixa correlação apresentada entre ECO e as variáveis biomecânicas calculadas, a variável metabólica apresentou maior valor com a \bar{F} ($r = 0,92$). Este achado foi de encontro com a proposta da teoria de geração de força, pois Sih & Stuhmiller (2003) sugerem que quanto maior a magnitude de \bar{F} aplicada ao solo, maior será o despêndio de \dot{E}_{metab} , visto que maior será a força exercida pela musculatura. Sabendo que o valor de ECO representa o gasto de energia por metro percorrido, assim, pode-se associar a relação deste com a \bar{F} de forma similar. Dessa forma, corrobora com a teoria, a qual afirma que quanto maior for este valor, menos econômico será o corredor que empregar tal força.

A partir das correlações verificadas neste estudo entre ECO e as variáveis biomecânicas (\bar{F} , \dot{N} e t_c), pode-se sugerir que a teoria de geração de força não seja sensível para que estas sejam encontradas em um grupo homogêneo dentro de uma mesma espécie. Por isso, sugerem-se quatro variáveis advindas do modelo massa-mola, o qual busca compreender as troca de energias mecânicas e aquelas geradas pelo

músculo durante corrida humana, e que talvez possam complementar a teoria quando aplicada em indivíduos treinados: o tempo de contato efetivo (t_{ce}), o tempo aéreo efetivo (t_{ae}), o tempo de frenagem (t_{brake}) e o tempo de impulsão (t_{push}).

O t_{ce} e o t_{ae} são provenientes da assimetria existente durante a corrida chamada de “*Asymetry of the rebound*”, ou rebote assimétrico, explicados a partir da força que é aplicada ao solo relativa a um passo. O t_{ce} é considerado o tempo de contato no qual a força aplicada é maior do que W_b , enquanto que durante o t_{ae} é menor do que o W_b (CAVAGNA, 2009). Logo, espera-se que esses parâmetros possuam maior interação com a ECO nesta amostra estudada, pois são específicos para compreender o sistema massa mola atuante na corrida humana (CAVAGNA *et al.*, 2008).

O t_{brake} e o t_{push} advém da segunda assimetria denominada *Landing-takeoff Assymetry*, ou assimetria contato-despregue. Essa assimetria expressa a relação existente entre esses tempos, que resultam da duração do trabalho negativo e positivo durante a realização do passo. Para que a corrida seja simétrica, esses tempos devem ter valores muito próximos, pois dessa forma, as forças atuantes nas duas fases (aterrissagem e impulsão) serão também parecidas, o que resulta em menor gasto metabólico para o músculo (CAVAGNA, 2009; CAVAGNA, 2010).

Dessa forma, as quatro variáveis temporais relacionadas ao sistema massa-mola poderiam expressar a ideia principal da teoria de geração de força, além da importante correlação encontrada entre ECO e a \bar{F} . Pois, este conjunto de fatores poderia exemplificar tanto a força que é aplicada ao solo (não apenas limitada à componente vertical), como a força gerada pela musculatura envolvida para realizar a corrida.

A correlação entre ECO e a \bar{F} indica um comportamento afirmado pela teoria de geração de força: quanto maior a força aplicada no solo durante o tempo de contato do pé, menor será a ECO do corredor (KRAM & TAYLOR, 1990). Concordando com isso, alguns autores (TAYLOR, 1980; GOLD, 1974) afirmaram que a energia metabólica tem relação com o volume muscular ativo, e que quanto maior for este valor, maior será o despêndio metabólico. Portanto, pode-se propor que o corredor mais econômico é aquele que despênde menos energia metabólica por metro percorrido, e, por isso, está relacionado com um volume muscular ativo menor. Logo, o corredor mais efetivo estará relacionado com menor volume muscular atuante durante a corrida, percorrendo determinada distância e tornando-se mais econômico em comparação a um indivíduo destreinado que poderá utilizar maior massa muscular para percorrer uma mesma

distância. Dessa forma, esse indivíduo mais econômico metabolicamente aplicaria uma força vertical durante o contato com o solo menor.

Contudo, as variáveis espaço-temporais (t_c , \dot{N}) e marcadores de desempenho (TP) não correlacionaram-se fortemente com a ECO e nem entre elas, não demonstrando capacidade para explicar o comportamento metabólico dessa atividade para este grupo estudado. Diante disso, torna-se ainda mais recomendado a investigação em pesquisas que avaliem o comportamento muscular de forma dinâmica durante a corrida, associada com o componente metabólico.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados desse estudo, pode-se considerar que a explicação do despêndio de energia metabólica durante a corrida para apenas uma espécie do reino animal, ainda não seja atribuída exclusivamente à teoria de geração de força. E, portanto, não justificaria a variabilidade do desempenho de humanos. Deste modo, sugere-se a inclusão de outras variáveis fisiológicas (ex.: tempo de contração da fibra muscular) e biomecânicas (ex.: t_{ce} , t_{ae} , t_{push} e t_{brake}) que possam corresponder às principais ideias da teoria de geração de força, as quais são estudadas principalmente em modelo humano, e, com isso, poderiam ser mais sensíveis às variações analisadas conforme o presente estudo.

Em relação às correlações realizadas, a ECO pode ser explicada principalmente pela \bar{F} aplicada ao solo durante o passo da corrida. Os valores encontrados indicam que o corredor que aplicar menor magnitude de força por metro percorrido será o mais econômico. Além disso, não foi demonstrado variações importantes no t_c , no t_a ou na \dot{N} para explicar as diferenças na ECO dos corredores.

Com isso, conclui-se que a teoria de geração de força, apesar de ser adequada para explicar o consumo de energia metabólica para um amplo espectro de espécies do reino animal, não é robusta o suficiente para explicar o desempenho específico de seres humanos treinados.

7. REFERÊNCIAS

ALEXANDER R. M. Tendon elasticity and muscle function. **Comparative Biochemistry and Physiology – Part A: Molecular & Integrative Physiology**. v. 133, p. 1001-1011, 2002.

BLAXTER K. Energy metabolism in animals and man. **Cambridge University Press**. v. 336, 1996.

BLICKHAN R. The spring-mass model for running and hopping. **Journal of Biomechanics**. v. 22, p. 1217-1227, 1989.

BOTTINELLI, R.; REGGIANI, C. Human skeletal muscle fibres: molecular and functional diversity. **Progress in Biophysics and Molecular Biology**. v. 73, p. 195-262, 2000.

CAVAGNA G. A.; KANEKO, M. Mechanical work and efficiency in level walking and running. **Journal of Physiology**. v. 268, p. 467-481, 1977.

CAVAGNA G. A.; LEGRAMANDI, M. A.; PEYRÉ-TARTARUGA, L. A. Old men running: mechanical work and elastic bounce. **Proceedings of the Royal Society Biology**. v. 275, p. 411-418, 2008.

CAVAGNA, G. A. The two asymmetries of the bouncing gaits. **European Journal of Applied Physiology**. v. 107, p. 739-742, 2009.

CAVAGNA, G. A. Symmetry and asymmetry in bouncing gaits. **Symmetry**. v. 2, p. 1270-1321, 2010.

CONLEY, D. L.; KRAHENBUHL, G. S. Running economy and distance running performance of highly trained athletes. **Medicine & Science in Sports & Exercise**. v. 12, n. 5, p. 357-360, 1980.

DENADAI, B. S. Fatores fisiológicos associados com desempenho em exercício de média e longa duração. **Revista Brasileira de Atividade Física e Saúde**. v. 1, n. 4, p. 82-91, 1996.

DI PRAMPERO P. E., ATCHOU G., BRÜKNER J. C., MOIA C. The energetics of endurance running. **European Journal of Applied Physiology**, Berlin, v. 55, p. 259-266, 1986.

FLETCHER, J. R., ESAU S. P., MACINTOSH B. R. Economy of running: beyond the measurement of oxygen uptake. **Journal of Applied Physiology**. v. 107, p. 1918–1922, 2009.

GOLD, A. Energy cost of animal locomotion. **Science**. v. 184, p. 1098, 1974.

HEGLUND, N. C.; TAYLOR, R. Speed, stride frequency and energy cost per stride: how do they change with body size and gait? **The Journal of Experimental Biology**. v. 138, p. 301-318, 1988.

INGHAM, S. A.; WHYTE, G. P.; PEDLAR, C.; BAILEY, D. M.; DUNMAN, N.; NEVILL, A. M. Determinants of 800-m and 1500-m running performances using allometric models. **Medicine & Science in Sports & Exercise**. v. 40, n. 2, p. 345-350, 2008.

KANEKO, M. Mechanics and energetics in running with special reference to efficiency. **Journal of Biomechanics**. v. 23, n. 1, p. 57-63, 1990.

KYRÖLAINEN, H.; BELLI, A.; KOMI, P. V. Biomechanical factors affecting running economy. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 33, n. 8, p. 1330-1337, 2001.

KRAM, R.; TAYLOR, R. Energetics of running: a new perspective. **Letters to Nature**. v. 346, p. 265-266, 1990.

LLOYD, B. B.; ZACK, R. M. The mechanical efficiency of treadmill running against a horizontal impeding force. **Journal of Physiology**. v. 223, p. 355-363, 1972.

MEDBO, J. I.; MOHN, A. C.; TABATA, I.; BAHR, R.; VAAGE, O.; SEJERTED, O. M. Anaerobic capacity determined by maximal accumulated oxygen deficit. **Journal of Applied Physiology**. v. 64, n. 1, p. 50-60, 1988.

MINETTI, A. E.; ARDIGÓ, L. P.; REINACH, E.; SAIBENE, F. The relationship between mechanical work and energy Expenditure of locomotion in horses. **The Journal of Experimental Biology**. v. 202, p. 2329–2338, 1999.

NILSSON, J.; THORSTENSSON A. Ground reaction forces at different speeds of human walking and running. **Acta Physiologica Scandinavica**. v. 136 (2): 217-227, 1989.

NOVACHEK, T. The biomechanics of running. **Gait and Posture**. v. 7, p. 77-95, 1998.

NUMMELA, A.; KERANEN, T.; MIKKELSSON, L. O. Factors related to top running speed and economy. **International Journal of Sports and Medicine**. v. 28, n. 8, p. 655-661, 2007.

ROBERTS, T. J.; KRAM, R.; WEYAND, P. G.; TAYLOR, R. Energetics of bipedal running: metabolic cost of force generation. **The Journal of Experimental Biology**. v. 201, p. 2745–2751, 1998.

ROBILLIARD, J. J.; WILSON, A. M. Prediction of kinetics and kinematics of running animals using an analytical approximation to the planar spring-mass system. **The Journal of Experimental Biology**. v. 208, p. 4377-4389, 2005.

SIH, B. L., and J. H. STUHMILLER. The Metabolic Cost of Force Generation. **Medicine & Science in Sports & Exercise**. v. 35, n. 4, p. 623–629, 2003.

TAYLOR, R.; HEGLUND, N. C.; MCMAHONF, T. A.; LOONEY, T. R. Energetic cost of generating muscular force during running. **The Journal of Experimental Biology**. v. 86, p. 8-18, 1980.

TAYLOR, C. R; HEGLUND, N. C.; MALOIY, G. M. O. Energetics and mechanics of terrestrial locomotion. **The Journal of Experimental Biology**. v. 97, p. 1-21, 1982.

TAYLOR, C. R. Force Development during sustained locomotion: a determinant of gait, speed and metabolic power. **The Journal of Experimental Biology**. v. 115, p. 253-262, 1985.