



MEDIDA E PREDIÇÃO DO TRABALHO MECÂNICO INTERNO NA LOCOMOÇÃO HUMANA

Cristhian Ferreira¹
Cristine Lima Alberto²
Eduardo Lusa Cadore²
Carlos Leandro Tiggemann²
Marcus Peikriszwili Tartaruga^{1,2}

¹ Universidade Estadual do Centro-oeste do Paraná (UNICENTRO)

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul (ESEF/UFRGS)

RESUMO

A análise do movimento do corpo durante a locomoção é de grande interesse para vários profissionais da área da saúde (fisiologistas, nutricionistas, educadores físicos, médicos e outros). Um interesse comum no estudo da locomoção humana é o cálculo do trabalho mecânico. Particularmente, o trabalho total da locomoção (W_{tot}) tem sido tradicionalmente calculado pela soma do trabalho mecânico externo (W_{ext}) e do trabalho mecânico interno (W_{int}). Dois modelos preditivos do W_{int} têm chamado a atenção devido a facilidade de aplicação: o modelo proposto por Cavagna et al. (1991) e o modelo de Minetti (1998). Apesar da comprovação científica de ambas os modelos matemáticos preditivos do W_{int}, nenhum estudo foi desenvolvido comparando-se os resultados de ambas as equações matemáticas nos planos horizontal e inclinado. Dezesesseis corredores de prova de fundo (10.000 m), selecionados de forma não aleatória, por voluntariedade, isentos de problemas físicos e de tratamento farmacológico, participaram de uma sessão de avaliação que consistiu de um teste de economia de corrida (ECO). Através da utilização de estatísticas descritivas e comparativas, verificou-se que não houveram diferenças significativas ($p > 0,05$) entre os W_{int} preditos por ambos os modelos., demonstrando que ambos os modelos preditivos do W_{int} podem ser aplicados para determinação desta variável em corredores profissionais, especialistas em provas de meia e longas distâncias.

Palavras-chave: corrida, locomoção, energética

RESUMEN

El análisis de movimiento del cuerpo durante la locomoción es de gran interés para muchos profesionales de la salud (psicólogos, nutricionistas, educadores físicos, y otros). Un interés común en el estudio de la locomoción humana es el cálculo del trabajo mecánico. En particular, el trabajo total de la locomoción (W_{tot}) tradicionalmente ha sido calculado como la suma del trabajo mecánico externo (W_{ext}) y el trabajo mecánico interno (W_{int}). Dos modelos de predicción W_{int} han llamado la atención debido a la facilidad de aplicación: el modelo propuesto por Cavagna et al. (1991) y el modelo de Minetti (1998). A pesar de la evidencia científica de ambos modelos de predicción matemática de W_{int}, ningún estudio se realizó comparando los resultados de ambas ecuaciones matemáticas en paneles horizontales e inclinados. Dieciséis corredores de fondo (10.00m) seleccionados de forma no aleatoria, participaron de una sesión de evaluación que consistió en una teste de economía de corrida (ECO).



Mediante el uso de la estadística descriptiva y datos comparativos, se constató que no hubo diferencias significativas ($p > 0.05$) entre el Wint determinado por los modelos, lo que muestra que los dos modelos de predicción pueden ser usados para la determinación del Wint en corredores profesionales.

Palavras-claves: corrida, locomoción, energética

ABSTRACT

The analysis of body motion during locomotion is of great interest to many health professionals (physiologists, nutritionists, physical educators, and other). A common interest in the study of human locomotion is the calculation of mechanical work. Particularly, the total work of locomotion (W_{tot}) has traditionally been calculated as the sum of external mechanical work (w_{ext}) and the internal mechanical work (W_{int}). Two predictive models W_{int} have drawn attention due to ease of application: the model proposed by Cavagna et al. (1991) and Minetti's model (1998). Despite the scientific evidence of both predictive mathematical models of W_{int} , no study was conducted comparing the results of both mathematical equations in horizontal and inclined panels. Sixteen runners race background (10,000 m) selected on a non-random, voluntary, free from both physical and pharmacological treatment, attended an assessment session which consisted of a test of running economy (ECO). By using descriptive statistics and comparative data, was found that there were no significant differences ($p > 0.05$) between W_{int} predicted by both models, demonstrating that both predictive models can be applied to the determination of this variable in middle and long distances runners.

Keywords: running, locomotion, energy

Introdução

A análise do movimento do corpo durante a locomoção é de grande interesse para vários profissionais da área da saúde (fisiologistas, nutricionistas, educadores físicos, médicos e outros). Um interesse comum no estudo da locomoção humana é o cálculo do trabalho mecânico (WILLIAMS e CAVANAGH, 1983). Particularmente, o trabalho total da locomoção (W_{tot}) tem sido tradicionalmente calculado pela soma do trabalho mecânico externo (W_{ext}) e do trabalho mecânico interno (W_{int}) (CAVAGNA e KANEKO, 1977; SAIBENE e MINETTI, 2003).

O W_{ext} representa o trabalho necessário para levantar e acelerar o centro de massa corporal (CMC) em relação ao ambiente (SAIBENE e MINETTI, 2003). Ele tem sido investigado em diversas condições e populações (MINETTI, ARDIGÒ e SAIBENE, 1993; MINETTI, ARDIGÒ e SAIBENE, 1994; SAIBENE e MINETTI, 2003; SCHEPENS, WILLEMS e CAVAGANA, 1998). Para o cálculo do W_{ext} , conforme a definição acima, é necessário mensurar a energia potencial gravitacional (PE) e a energia cinética (EC) do CMC, onde a soma das duas energias resulta na energia total (ET) ($ET = EP + EC$) em função do tempo (CAVAGNA, THYS e ZAMBONI, 1976; SAIBENE e MINETTI, 2003; WILLEMS, CAVAGNA e HEGLUND, 1995). Todo esse procedimento metodológico pode ser desenvolvido através do uso da dinamometria (dinâmica direta) ou da técnica de análise do movimento (dinâmica inversa) (PURKISS, GORDON e ROBERTSON, 2003; WINTER, 2005).



Já o Wint, advindo da movimentação dos segmentos corporais, que não afetam a trajetória do CMC (CAVAGNA, SAIBENE e MARGARIA, 1964; MINETTI, 1998; WINTER, 1978), está relacionado as forças internas do corpo e, conseqüentemente, ao trabalho associado às mudanças de energia internas (energia de cada segmento corporal) em relação ao CMC (WILLEMS, CAVAGNA e HEGLUND, 1995). Isso significa que o Wint representa o trabalho necessário para acelerar os membros em relação ao CMC durante a locomoção humana (CAVAGNA e KANEKO, 1977; CAVAGNA, LEGRAMANDI e PEYRÉ-TARTARUGA, 2008, CAVAGNA, SAIBENE e MARGARIA, 1964; MINETTI, 1998; MINETTI, ARDIGÒ, RENAICH e SAIBENE, 1999; MINETTI e SAIBENE, 1992; MINETTI, ARDIGÒ e SAIBENE, 1993; MINETTI, ARDIGÒ e SAIBENE, 1994; SAIBENE e MINETTI, 2003; SCHEPENS, WILLEMS e CAVAGANA, 1998, 2001; WINTER, 1979). O cálculo computacional do Wint considera o movimento dos segmentos corporais e seus parâmetros antropométricos (SCHEPENS, WILLEMS e CAVAGANA, 2001).

Historicamente, o conceito de Wint foi introduzido por Fenn (1930) e formalizado por Cavagna e Kaneko (1977). O Wint deriva do teorema da energia cinética total de um sistema, de Köning. Este teorema diz que “a energia cinética de um sistema de partículas é a energia cinética associada ao movimento das partículas em relação ao centro de massa”. Além disso, em um sistema multi-segmentar, “a energia cinética total pode ser dividida em dois diferentes componentes: a energia total do sistema relacionada ao movimento do CMC em relação ao ambiente externo (Wext) e a energia de cada segmento corporal relacionada ao movimento do centro de massa de cada segmento em relação ao CMC (Wint)”. Conseqüentemente, o objetivo biomecânico reside na capacidade de calcular a aceleração dos segmentos corporais na locomoção humana (caminhada e corrida, particularmente), onde os membros são movimentados quase que simetricamente em relação ao CMC (MINETTI, 1998; MINETTI, ARDIGÒ e SAIBENE, 1993).

Entretanto, calcular o Wint é mais complicado do que o Wext. Os recortes cinematográficos segmentares para o cálculo da energia mecânica são muito complexos e de difícil interpretação (ZATSIORSKY, 2002). Além disso, a determinação do Wint requer calcular as transferências de energias entre os segmentos que ocorrem durante o movimento. De fato, o Wint pode ser calculado pela soma das curvas da energia cinética segmentar positiva (aceleração) (WILLEMS, CAVAGNA e HEGLUND, 1995).

Diferentes modelos computacionais têm sido propostos para prever o Wint. Muitos desses modelos têm sido criados considerando a transferência de energia segmentar que ocorre durante a locomoção humana (PURKISS, GORDON e ROBERTSON, 2003; WINTER, 1978); outros têm considerado os resultados advindos da dinâmica inversa e da análise da força articular (FORMENTI, ARDIGÒ e MINETTI, 2005; PURKISS, GORDON e ROBERTSON, 2003). Os vários modelos/técnicas utilizados para predição e medida do Wint têm sofrido diversas modificações e adaptações (NARDELLO, ARDIGÒ e MINETTI, 2011).

Dois modelos preditivos do Wint têm chamado a atenção devido a facilidade de aplicação. O modelo proposto por Cavagna *et al.* (1991) (equação 1) e o modelo de Minetti (1998) (equação 2).

$$\text{Wint} = 0,1451 \times 10^{-0,209 L} \quad (1)$$

Onde, L é a distância horizontal percorrida pelo CMC (m).

$$\text{Wint} = f s (1 + (d / 1 - d)^2) q \quad (2)$$

Onde, f é a frequência de passada (Hz), s é a velocidade média de deslocamento (m.s^{-2}), d é a fração do passo correspondente ao contato de um dos pés com o solo – *duty factor* (%), e q é a constante relacionada à geometria de membros e massa fracional, que segundo Nardello, Ardigo e Minetti (2011) corresponde a 0,1 para locomoções executadas em plano horizontal e 0,08 em plano inclinado.

Em ambas as equações, a unidade de medida do Wint é $\text{J}/(\text{km.m})$.



Apesar da comprovação científica de ambas os modelos matemáticos preditivos do Wint, nenhum estudo foi desenvolvido comparando-se os resultados de ambas as equações matemáticas nos planos horizontal e inclinado. Dessa forma, o objetivo do estudo foi comparar os valores de Wint preditos pelas equações de Cavagna *et al.* (1991) e Minetti (1998) nos planos horizontal e inclinado.

Metodologia

Dezesseis corredores de prova de fundo (10.000 m), selecionados de forma não aleatória, por voluntariedade, isentos de problemas físicos e de tratamento farmacológico, participaram de uma sessão de avaliação que consistiu de um teste de economia de corrida (ECO). Os corredores utilizaram seus próprios calçados de treino, emborrachados e sem pregos. A temperatura ambiente de 25 °C e o percentual relativo do ar de 53% foram controlados, conforme as normas internacionais ISO-8573-1.

O número amostral (n) foi calculado com base nos estudos de Williams e Cavanagh (1987), Wank *et al.* (1998) e Tartaruga *et al.* (2004), onde foi adotado um nível de significância de 0,05, um poder de 80% e um coeficiente de correlação (r) de 0,7 para todas as variáveis.

Teste de Economia de Corrida

O teste de ECO teve por objetivo o registro do comportamento das variáveis cinemáticas (tempo de passada, tempo de suporte, tempo de balanço, comprimento de passada, comprimento de passo, frequência de passada e *duty factor*) utilizando-se uma filmadora digital da marca PUNIX PROGRESSIVE SCAM. Quatro marcadores anatômicos foram distribuídos da seguinte forma: joelho, tornozelo, calcanhar e dedo.

As magnitudes das variáveis cinemáticas da corrida foram registradas a partir do quarto minuto de corrida com a utilização do sistema de cinemetria SPICA e calculadas visualmente através de análises de quadros cinematográficos. Foram analisados três passadas onde o valor médio correspondente a magnitude de cada variável cinemática foi determinada.

A partir dos resultados cinemáticos, foram aplicadas os modelos preditores do Wint propostos por Cavagna *et al.* (1991) (equação 1) e o modelo de Minetti (1998) (equação 2).

Foi desenvolvida uma análise descritiva com médias e desvios-padrão e para comparação dos resultados preditos por ambos os modelos, foi aplicado o teste T de *Student* para variáveis dependentes. O índice de significância adotado foi de 0,05.

Resultados

A tabela 1 apresenta a caracterização da amostra.

Tabela 1 – Caracterização da amostra: médias e desvios-padrão da média (DP) das variáveis idade, massa corporal e estatura de 16 corredores de rendimento.

Variáveis	Média	DP
Idade (anos)	27,13	± 1,43
Massa corporal (kg)	64,52	± 1,47



Estatura (m) 1,74 $\pm 0,02$

A tabela 2 apresenta os valores cinemáticos e os trabalhos internos preditos por ambos os modelos.

Tabela 2 – Média e desvios-padrão das variáveis cinemáticas, do *ducty factor* e dos trabalhos internos preditos pelas fórmulas de Cavagna *et al.* (1991) e Minetti (1998).

Variáveis	Média	DP
Comprimento de passada (m)	3,07	$\pm 0,16$
Comprimento de passo (m)	1,54	$\pm 0,08$
Frequência de passada (passos/s)	1,45	$\pm 0,07$
Tempo de passada (s)	0,69	$\pm 0,07$
Tempo de suporte (s)	0,21	$\pm 0,04$
<i>Ducty factor</i> (%)	30,54	$\pm 2,74$
Wint (Cavagna <i>et al.</i> , 1991) (J/(km.m))	0,69	$\pm 0,03$
Wint (Minetti 1998) (J/(km.m))	0,64	$\pm 0,03$

Os resultados mostram que não houveram diferenças significativas entre os Wint preditos por ambos os modelos.

Discussão

O trabalho necessário para acelerar os membros em relação ao centro de massa corporal durante a locomoção tem sido preconizado por Fenn (1930) e posteriormente formalizado como Wint (CAVAGNA e KANEKO, 1977). Diferentemente do Wext que está relacionado com mudanças nas energias potencial e cinética do centro de massa corporal, visto através da utilização de um referencial inercial externo (ambiente), o principal interesse do Wint reside na capacidade de considerar a aceleração do centro de massa segmentar independente do deslocamento de coentro de massa corporal em relação ao meio ambiente. Isto é particularmente o caso da locomoção terrestre, onde os membros são movimentados quase que simetricamente em relação ao centro de massa corporal. O conceito de energia mecânica relacionada ao Teorema de Köning destaca que a energia pode ser dividida na energia despendida para movimentar o centro de massa corporal e os centros de massas segmentares. Ambas as energias associadas determinam o Wtot.

Cavagna *et al.*, (1991) e Minetti (1998) desenvolveram modelos matemáticos com o objetivo de prever o Wint. Minetti (1998) desenvolveu seu modelo matemático com o objetivo de aperfeiçoar o modelo de Cavagna *et al.* (1991). Nessa tentativa, Minetti considerou no seu modelo matemático a variável q , que é a constante relacionada à geometria de membros e massa fracional, que segundo Nardello, Ardigo e Minetti (2011) corresponde a 0,1 para locomoções executadas em plano horizontal e 0,08 em plano inclinado. Além disso, o modelo de Minetti (1998) foi desenvolvido adotando-se velocidades diferentes das velocidades adotadas por Cavagna *et al.* (1991), destacando inclusive que quanto maior a velocidade de corrida, maior predição.

Em relação a constante relacionada à geometria de membros e massa fracional, segundo Minetti (1998) a mesma tende a demonstrar resultados interessantes, como por exemplo, a afirmação descrita por este autor em seu



estudo de que cavalos tendem a apresentar maiores minimizações de energias em relação a seres humanos, demonstrando com isso que o modelo desenvolvido por este pode ser aplicado a diversas espécies animais. Este tipo de discussão não é verificada no estudo de Cavagna *et al.* (1991), o que destaca a importância de se desenvolverem estudos comparativos de ambos os modelos em diferentes espécies e tipos de locomoção.

Este estudo contribui para um melhor esclarecimento da aplicabilidade de ambos os modelos preditivos do Wint. Apesar de serem modelos distintos, ambos predizem de forma semelhante o comportamento do Wint em corredores profissionais correndo a uma velocidade de 16 km.h⁻¹.

Conclusão

Pode-se concluir com este estudo que ambos os modelos preditivos do Wint podem ser aplicados para determinação desta variável em corredores profissionais, especialistas em provas de meia e longas distâncias. Sugere-se, entretanto, que outras situações de deslocamento sejam utilizadas para a comparação de ambos os modelos preditivos, bem como destes com modelos de determinação do Wint através de digitalizações cinematográficas.

Bibliografia

- Cavagna, G. A., & Kaneko, M. (1977). Mechanical work and efficiency in level walking and running. *Journal of Physiology*, 268, 467–481.
- Cavagna, G. A., Legramandi, M. A., & Peyre-Tartaruga, L. A. (2008). Old men running: Mechanical work and elastic bounce. *Proceedings of the Royal Society B*, 275, 411–418.
- Cavagna, G. A., Saibene, F., & Margaria, R. (1964). Mechanical work in running. *Journal of Applied Physiology*, 19, 249–256.
- Cavagna, G. A., Thys, H., & Zamboni, A. (1976). The sources of external work in level walking and running. *Journal of Physiology*, 262, 639–657.
- Cavagna, G. A., Willems, P. A., Franzetti, P., & Detrembleur, C. (1991). The two power limits conditioning step frequency in human running. *Journal of Physiology*, 437, 95–108.
- Fenn, W. O. (1930). Frictional and kinetic factors in the work of sprint running. *American Journal of Physiology*, 92, 582–611.
- Formenti, F., Ardigò, L. P., & Minetti, A. E. (2005). Human locomotion on snow: Determinants of economy and velocity of skiing across the ages. *Proceedings of the Royal Society B*, 272, 1561–1569.
- Jackson, A. S., Pollock, M. L. (1978). Generalized equations for predicting body density of men. *British Journal of Nutrition*, 40, 497–504.
- Minetti, A. E. (1998). A model equation for the prediction of mechanical internal work of terrestrial locomotion. *Journal of Biomechanics*, 31, 463–468.



- Minetti, A. E., & Saibene, F. (1992). Mechanical work rate minimization and freely chosen stride frequency of human walking: A mathematical model. *The Journal of Experimental Biology*, 170, 19–34.
- Minetti, A. E., Ardigò, L. P., & Saibene, F. (1993). Mechanical determinants of gradient walking energetics in man. *Journal of Physiology*, 471, 725–735. Erratum in: *Journal of Physiology (London)*, 1994, 15, 475, 548.
- Minetti, A. E., Ardigò, L. P., & Saibene, F. (1994). The transition between walking and running in man: Metabolic and mechanical aspects at different gradients. *Acta Physiologica Scandinavica*, 150, 315–323.
- Minetti, A. E., Ardigò, L. P., Renaich, E., & Saibene, F. (1999). The relationship between mechanical work and energy expenditure of locomotion in horses. *The Journal of Experimental Biology*, 202, 2329–2338.
- Nardello, F., Ardigò, L. P., Minetti, A. E. (2011). Measured and predicted mechanical internal work in human locomotion. *Human Movement Science*, 30, 90–104.
- Petroski, E. L. (1995). Desenvolvimento e validação de equações generalizadas para predição da densidade corporal. Programa de Pós-graduação da Escola de Educação Física, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS.
- Purkiss, B. A., Gordon, D., & Robertson, E. (2003). Methods for calculating internal mechanical work: Comparison using elite runners. *Gait & Posture*, 18, 143–149.
- Saibene, F., & Minetti, A. E. (2003). Biomechanical and physiological aspects of legged locomotion in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 88, 297–316.
- Schepens, B., Willems, P. A., & Cavagna, G. A. (1998). The mechanics of running in children. *Journal of Physiology (London)*, 509, 927–940.
- Schepens, B., Willems, P. A., & Cavagna, G. A. (2001). Mechanical power and efficiency in running children. *European Journal of Physiology*, 442, 107–116.
- Siri, W. E. (1993). Body composition from fluid spaces and density: analysis of methods. *Nutrition*, 9, 480–91.
- Tartaruga, L. A. P., Tartaruga, M. P., Ribeiro, J. L., Coertjens, M., Ribas, L. R., Krueel, L. F. M. (2004). Correlation between running economy and kinematic variables in high level runners. *Brazilian Journal of Biomechanics*, 5, 51–58.
- Willems, P. A., Cavagna, G. A., & Heglund, N. C. (1995). External, internal and total work in human locomotion. *The Journal of Experimental Biology*, 198, 379–393.
- Williams, K. R., & Cavanagh, P. R. (1983). A model for the calculation of mechanical power during distance running. *Journal of Biomechanics*, 16, 115–128.
- Williams, K. R., Cavanagh, P. R. (1987). Relationship between distance running mechanics, running economy, and performance. *Journal of Applied Physiology*, 63, 1236–1245.



Winter, D. A. (1978). Calculation and interpretation of mechanical energy of movement. Exercise Sports Science Review, 6, 183–201.

Winter, D. A. (1979). A new definition of mechanical work done in human movement. Journal of Applied Physiology, 46, 79–83.

Winter, D. A. (2005). Biomechanics and motor control of human movement (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons, Inc.

Zatsiorsky, V.M. (2002). Kinetics of human motion. Human kinetics, United States of America.

Endereço para correspondência:

Marcus Peikriszwili Tartaruga
Setor de Ciências da Saúde - SES
Departamento de Educação Física de Guarapuava - DEDUF/G
Universidade Estadual do Centro-Oeste - UNICENTRO - Campus CEDETEG
Rua Simeão Camargo Varela de Sá, 03 - Bairro Cascavel - 85015-430
Guarapuava-PR (42) 3629 8132 ou (42) 9911 3004
E-mail: mtartaruga@unicentro.br
Skype: mtartaruga