

**Artigo Original**

recebido: 05/05/98 e aceito: 12/05/99

**Contribuição da energia mecânica dos segmentos para a análise biomecânica da locomoção humana**

*Mechanical energy contribution of the segments to the biomechanical analysis of the human locomotion*

**S.C. Corrêa**

Pesquisador (bolsa de pós-doutorado Fapesp),  
Lab. de eletromiografia e biomecânica da postura,  
Faculdade de Educação Física, UNICAMP,  
Rua Érico Veríssimo 701, 13083-970 - Campinas-SP.  
Email: Soniac@ibm.net.

**A.C. Amadio**

Laboratório de Biomecânica,  
Escola de Educação Física e Esportes,  
Universidade de São Paulo, USP, Brasil

**U. Glitsch**

**W. Baumann**

Instituto de Biomecânica,  
Escola Superior Alemã de Esportes,  
Colônia, Alemanha.

**Resumo**

Os estudos das variações de energia mecânica no andar e no correr apresentam resultados bastante controversos, impossibilitando na maior parte das vezes uma comparação entre os resultados, especialmente ao se considerar a contribuição dos segmentos para o movimento. O objetivo deste trabalho foi descrever e comparar as curvas de variação de energia mecânica (potencial e cinética) das extremidades superior e inferior no andar a 1,5 m/s e no correr a 3,0 m/s e 4.0 m/s nos mesmos indivíduos no movimento executado na esteira rolante. O estudo utilizou como procedimentos de mensuração a cinemetria, a antropometria e as equações para energia mecânica propostas por Zatsiorsky *et al.*(1987). Ao compararmos as curvas do andar e do correr a 3.0 m/s encontramos: a) a variação de energia mecânica da extremidade inferior é quatro vezes maior que a variação da extremidade superior no andar e seis vezes maior no correr; b) para ambas as formas de movimento a maior contribuição para a variação de energia na coxa é a energia potencial, e para a perna e pé é a energia cinética; c) no andar a contribuição da variação de energia da coxa e perna é proporcionalmente igual para a variação total enquanto no correr a contribuição da perna é maior. Em função da variação de velocidade de corrida observamos que na maior velocidade: a) não existe diferença na variação de energia para a extremidade superior; b) a variação de energia é 100% maior na extremidade inferior ; c) existe um aumento de 100% na variação de energia da perna devido principalmente a um aumento na variação de energia cinética.

**Palavras-chave:** biomecânica, energia mecânica, andar, correr, esteira rolante.

**Abstract**

*The results presented by the studies of the mechanical energy changes in walking and running are controversial, and most of them are very difficult to compare, especially when considering the contribution of the segments to the movement. The aim of this paper was to describe and compare the curves of mechanical energy change (potential and kinetic) of the upper and lower extremities from six subjects while walking at 1.5 m/s and running at 3.0 and 4.0 m/s on a treadmill. The measuring procedures comprised: videography, anthropometry, and the equations of mechanical energy as proposed by Zatsiorsky et al. (1987). In relation to the differences between walking and running, the following observations were made: a) energy change at the lower extremity is four times greater than the energy change at the upper extremity in walking and six times greater in running; b) in both locomotion patterns the greatest contribution for the energy change in the thigh is generated by the potential energy, and for leg and foot by the kinetic energy; c) in walking thigh and leg show the same percentual*

contribution for the total energy change, while in running the contribution of the leg is greater. Comparing the variations in the two velocities of running, the following conclusions were drawn at the greatest velocity : a) there is no difference in the energy change at the upper extremity; b) the energy change is 100% greater at the lower extremity; c) there is an increase of 100% in the energy change of the leg, mainly due to an increase in the kinetic energy change.

**Keywords:** biomechanics, mechanical energy, walking, running, treadmill.

## Introdução

Desde o trabalho pioneiro de Fenn (1930), vários pesquisadores têm estudado a forma de determinar a energia mecânica durante o movimento. Energia pode ser definida como a capacidade de realizar trabalho, e a energia mecânica como a energia que o corpo apresenta em função do movimento, por causa de sua posição relativa à superfície da terra ou porque foi empurrado ou puxado para fora de sua forma normal (Hay & Reid, 1982). Na mecânica clássica (Kittel *et al.*) a energia cinética é definida como a energia de movimento das diferentes partes do corpo e a energia potencial como o trabalho necessário para levar um corpo sem aceleração de um ponto inicial, que denominamos de ponto de energia zero, a um ponto específico, sendo pois uma função do lugar.

Um dos maiores problemas para calcular a energia durante o movimento humano, é que este é um sistema não-conservativo e portanto parte da energia é dissipada e parte é utilizada no movimento. Além disso existem diferentes maneiras de se recuperar a energia mecânica durante o movimento, o que pode nos levar a erros no resultado final, gerando valores maiores ou menores que o valor real. Segundo Zatsiorsky *et al.* (1987) as três possibilidades de recuperação de energia

mecânica conhecidas pelo homem são: a) a transformação de energia cinética em energia potencial e ao contrário; b) a transferência de energia cinética de uma parte do corpo para outra e c) a transformação de energia cinética do movimento em energia elástica do músculo e do tendão e ao contrário.

Existem vários procedimentos para cálculo de energia, hoje, se registrarmos padronizadamente os dados de cinemetria e de dinâmica do movimento de um determinado indivíduo e realizarmos, segundo diferentes autores, os cálculos específicos, obteremos resultados completamente diferentes para a estimativa de energia para o movimento selecionado. Williams & Cavanagh (1983) encontraram para uma mesma situação de pesquisa valores para a potência que variaram de 273 a 1775 watts, dependendo das suposições específicas feitas em cada método e dos cálculos computacionais empregados pelos diferentes autores. Para Morton (1985) as variações encontradas por esses autores são simplesmente derivadas da utilização da mecânica Newtoniana, que depende das variações de massa e aceleração dos indivíduos estudados. O que observamos é que não existe uma única forma de cálculo aceita como a mais adequada e padronizada para a estimativa de energia e trabalho realizado pelo corpo humano.

Cavanagh (1990) relata uma variação ainda maior nas estimativas de potência em corrida entre 3,3 e 3,9 m/s, com valores variando de 170 a 1700 w (Tabela 1), apontando como principais fatores que contribuem para o erro: o armazenamento de energia elástica, a transferência de energia entre os segmentos, o custo do trabalho positivo versus o do trabalho negativo, e os métodos numéricos utilizados nos cálculos. Portanto, o que distingue basicamente um

**Tabela 1** - Estimativas da potência final durante corrida com velocidade entre 3,3 e 3,9 m/s, de sete grupos diferentes de autores (Cavanagh, 1990).

Autores	Método	Potência Estimada (W)
Fukunaga <i>et al.</i> (1978)	1	343
Cavanagh <i>et al.</i> (1989)	2	556
Norman <i>et al.</i> (1976)	3	172
Gregor & Kirkendal (1978)	3	163
Luhtanen & Komi (1978)	3	1650
Williams & Cavanagh (1983)	1-4	273-1775
Martin & Morgan (1989)	1,4	10-17 x (PC em kg)

**Métodos utilizados:** 1. Somente Centro de Massa (C.M.) / 2. C.M. mais movimento dos membros com relação ao C.M. / 3. Pseudo trabalho. 4. Análise segmentar (incluindo transferência de energia)

procedimento do outro não é só a metodologia de aquisição e registro dos dados mas também o fundamento teórico que suporta a rotina para os cálculos específicos.

Um dos maiores problemas gerados por esta grande variedade de fatores que interferem no cálculo da energia mecânica é que torna muito difícil comparar e compreender resultados apresentados por diferentes autores para o mesmo movimento assim como acompanhar diferenças entre movimentos diferentes (andar e correr) ou alterações decorrentes de diversas velocidades do mesmo movimento (correr). Isto também ocorre para os cálculos de energia mecânica dos diferentes segmentos (Corrêa, 1996).

O objetivo deste trabalho foi descrever e comparar as curvas de variação de energia mecânica (potencial e cinética) das extremidades superior e inferior no andar a 1,5 m/s e no correr a 3,0 m/s e 4.0 m/s nos mesmos indivíduos no movimento executado na esteira rolante.

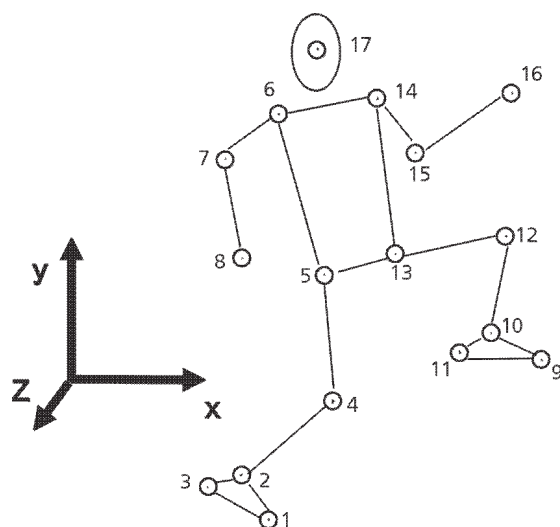
### Metodologia

O estudo utilizou como procedimentos de mensuração a cinemetria, a antropometria. Para a cinemetria foram utilizadas duas câmeras de vídeo. As câmeras (Sony - 50 Hz) foram colocadas à uma distância de sete metros da linha percorrida pelo indivíduo formando um ângulo em torno de 90° entre os focos das lentes e registrando o plano sagital do indivíduo. A altura da câmera foi ajustada de modo a manter o quadril do indivíduo no centro da imagem. O campo de filmagem tinha a altura de 1,87 m e 1,0 m de largura.

Antes de iniciar a filmagem do indivíduo, de maneira a permitir a calibração e reconstrução das coordenadas tridimensionais das coordenadas dos pontos marcados no indivíduo, filmou-se uma estrutura metálica (cubo). O cubo possuía pontos marcados com coordenadas (x, y, z) conhecidas e necessariamente deveria ocupar todo o espaço percorrido pelo indivíduo. Existem vários métodos para resolver o problema da reconstrução das coordenadas espaciais, o utilizado neste estudo foi o DLT (Direct Linear Transformation) proposto por Abdel-Aziz & Karara (1971), como descrito e modificado por Stucke (1984).

O modelo antropométrico utilizado foi o modelo de Dempster (1955) como descrito por Winter (1979), o qual se baseia em 13 segmentos: considerando os segmentos pé, perna, coxa, mão, antebraço e braço para os dois lados, e o tronco como um único segmento acoplado à cabeça. O indivíduo antes de ser filmado recebeu uma marcação especial de fundo preto com um centro em branco em determinados pontos anatômicos e foram coletadas as medidas de massa e altura. Estes pontos foram digitados e armazenados (Corrêa, 1996). A seqüência dos 17 pontos marcados pode ser observada na Figura 1.

Para a digitação manual dos pontos utilizamos uma placa vídeo-digitadora da FAST - Screen Machine II, uma resolução de 640 x 480 pixels e um campo de digitação de 27 cm x 19 cm. A precisão do sistema depende fundamentalmente da reconstrução do sistema de coordenadas e portanto da calibragem inicial das câmeras. Os desvios médios em mm do valor



### Pontos do lado direito e esquerdo

- 1, 9 - quinta articulação metatarso-falangeana
- 2, 10 - maléolo lateral
- 3, 11 - calcanhar
- 4, 12 - eixo do joelho
- 5, 13 - grande trocanter
- 6, 14 - articulação glenoumeral
- 7, 15 - eixo do cotovelo
- 8, 16 - processo estilóide da ulna
- 17 - centro do conduto auditivo externo

**Figura 1.** Pontos digitados no indivíduo.

reconstruído com relação ao real nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  e considerando-se as três direções ao mesmo tempo foram respectivamente neste estudo de 0,70 mm, 1,13 mm, 0,82 mm e 4,40 mm.

Os seis indivíduos foram filmados andando a 1,5 m/s e correndo a 3,0 e 4,0 m/s na esteira rolante e as suas características antropométricas podem ser observadas na Tabela 2.

O modelo utilizado para o cálculo das variáveis cinemáticas foi o proposto por Winter (1979). São apresentadas tabelas de percentuais de comprimento e massa de segmento com relação à massa e altura do corpo como um todo ( $m$ ,  $h$ ), assim como para o raio de rotação dos segmentos com relação ao comprimento do segmento. De posse dos dados percentuais para comprimento ( $\%c_i$ ), massa ( $\%m_i$ ), raio do centro de gravidade ( $\%l$ ) e raio de rotação em torno do eixo Z ( $\%r_z$ ) dos segmentos se obtêm:

- o comprimento de cada segmento:  
 $c_i = h \cdot \%c_i$  [cm]
- o raio do centro de gravidade para cada segmento:  $l_{c.m} = c_i \cdot \%l$  [cm]
- a massa de cada segmento:  $m_i = m \cdot \%m_i$  [kg]
- o momento de inércia do segmento em torno do eixo z:  $I_{iz} = m_i (c_i \cdot \%r_z)^2 \cdot 10^{-4}$  [kg m<sup>2</sup>]

Das diferentes formas de energia mecânica calculou-se a energia potencial, cinética de translação, e cinética de rotação em cada instante de tempo para cada segmento como proposto por Zatsiorsky *et al.* (1987) seguindo as fórmulas como descrito abaixo.

A energia potencial ( $E_{pot_i}$ ) dos diferentes segmentos:

$$E_{pot_i} = m_i g h_i \quad (1)$$

onde  $g$  = aceleração da gravidade;  $h_i$  = altura do C.M. do segmento  $i$ ;  $m_i$  = massa do segmento  $i$

A energia cinética de translação do corpo todo é definida como a soma da energia cinética de translação do C.M. com a energia cinética de translação dos segmentos em relação ao C.M. No caso iremos analisar somente o segundo termo da equação, isto é a relação dos segmentos com o C.M. do corpo como um todo ( $E_{cin}$ ):

$$E_{cin} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i v_i^2 = \frac{1}{2} m v_{C.G.}^2 + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i v_{i,C.G.}^2 \quad (2)$$

onde,  $m$  = massa do corpo todo;  $g$  = aceleração da gravidade;  $v_{C.G.}$  = velocidade do C.M.;  $m_i$  = massa do segmento  $i$  (2);  $v_{i,C.G.}$  = velocidade do segmento  $i$  com relação ao C.M.

Vários autores (Mansour *et al.*, 1982; Norman *et al.*, 1976; Robertson & Winter, 1980; Winter *et al.*, 1976a)

utilizam a velocidade absoluta dos segmentos e no nosso estudo consideramos a velocidade dos segmentos com relação ao C.M. As curvas e valores médios das curvas diferem algumas vezes bastante nos dois casos, mais especialmente quando o segmento apresenta um pequeno aumento da velocidade e o C.M. está apresentando uma diminuição grande de velocidade. Neste caso específico consideramos a separação dos dois conceitos, velocidade do C.M. e velocidade relativa dos segmentos, muito importante para a compreensão do que realmente acontece nos segmentos e da relação entre as contribuições das diversas formas de energia dos segmentos ao movimento como um todo.

A energia cinética de rotação de cada segmento ( $E_{rot_i}$ ) em torno do eixo transversal (Z) estando este localizado na extremidade proximal do segmento, se obtém através de:

$$E_{rot_i} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} I_i \omega_i^2 \quad (3)$$

onde,  $I_i$  = momento de inércia do segmento  $i$  com relação ao eixo transversal;  $\omega_i$  = velocidade angular do segmento  $i$  com relação à coordenada fixa do laboratório.

Uma das diferenças básicas entre o andar e correr, com relação à contribuição dos segmentos à variação total de energia, é quanto à participação do tronco. No entanto, o parâmetro importante para explicar esta diferença seria a relação entre a energia potencial e a cinética do tronco, se utilizando para o cálculo da energia cinética a velocidade absoluta. Como a energia cinética dos segmentos em nossa fórmula é calculada em relação ao C.M. do corpo esta, no caso, portanto, seria muito pequena e não permitiria uma análise mais profunda. Optou-se portanto em se discutir a diferença da função do tronco na locomoção ao se discutir a energia externa que é resultado da soma da energia cinética e potencial do C.M., considerando-se o C.M. de uma forma mais ampliada como representando o tronco (Corrêa *et al.* 1997). Isto está de acordo com o descrito por Winter *et al.* (1976a). Concluímos ao observarmos as componentes da energia externa no andar e no correr - energia potencial e cinética do C.M. - que existem diferenças nos princípios básicos do andar e do correr. Enquanto no andar as duas componentes estão defasadas em praticamente 180°, na corrida estas se comportam em fase. Praticamente isto significa que no andar é possível uma transformação da energia cinética em energia potencial, en-

quanto no correr isto não é realizável (Corrêa *et al.*, 1997, Zatsiorsky *et al.*, 1987). Devido a esta transformação de uma forma de energia em outra não ocorrem alterações significativas na energia externa no andar.

Neste artigo iremos discutir a contribuição dos membros individualmente e divididos em membro superior (braço + antebraço + mão) e inferior (coxa + perna + pé) como um todo, considerando somente o lado direito, e sem considerar o tronco. A partir de agora iremos denominar a energia cinética de translação somente de energia cinética e a energia cinética de rotação de energia rotacional que são formas simplificadas usualmente utilizadas na literatura.

Como o nosso interesse é somente descrever e comparar situações com relação à energia mecânica, utilizamos como referência para comparação entre curvas:

- Para comparar as curvas de energia em si: o valor médio da curva;
- Para comparar a variação de energia mecânica:
  - a) quando se tratar de curvas simétricas o valor numérico da diferença entre o primeiro pico de máximo e o primeiro pico de mínimo;
  - b) quando se tratar de curvas comprovadamente assimétricas (energia da perna direita na passada), em que a energia mecânica em uma parte do ciclo (apoio) é significativamente diferente da segunda parte (balanço) calculamos a soma das diferenças dos respectivos picos de máximo e mínimos nas duas partes do ciclo.

Como foram comparadas curvas de energia mecânica para diferentes indivíduos ou curvas de energia mecânica obtidas em diferentes velocidades, realizou-se a normalização da curva. Isto significou passar o eixo X da variável tempo para a variável percentual da passada. Em termos matemáticos:

$$\text{percentual da passada} = \frac{\text{tempo}}{\text{tempo total}} \times 100 \quad (4)$$

De maneira a possibilitar melhor interpretação dos gráficos, e permitir a relação entre os diferentes gráficos e o movimento executado, colocamos nos gráficos marcações que determinam as diferentes divisões da passada no andar e na corrida.

A passada no andar foi dividida em: início do contato do pé direito no solo (RHS); perda do contato do pé esquerdo com o solo (LTO); início do contato do pé esquerdo no solo (LHS); perda do contato do pé direito com o solo (RTO); início do contato do pé direito com o solo (RHS).

As fases do andar em: apoio duplo (contato dos dois pés no chão), apoio simples (apoio de somente um dos pés no chão) com balanço da perna oposta.

A passada na corrida foi dividida em: início do contato do pé direito no solo (RHS); perda do contato do pé direito com o solo (RTO); início do contato do pé esquerdo no solo (LHS); perda do contato do pé esquerdo com o solo (LTO); início do contato do pé direito com o solo (RHS).

As fases da corrida em: apoio (contato de um dos pés no chão), e vôo (nenhum apoio sobre o solo).

## Resultados e discussão

Diferenças entre o andar e correr com relação à contribuição de energia mecânica dos segmentos

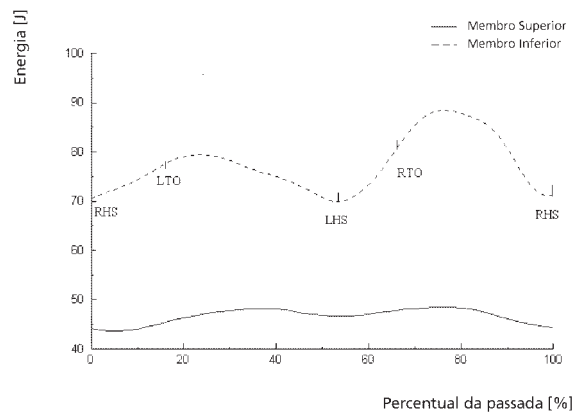
Pode-se observar na Figura 2 (a,b) as variações de energia total (potencial + cinética + rotacional) nos membros superiores e inferiores do lado direito no andar e na corrida. Como os indivíduos apresentavam padrão normal de andar e correr, o padrão das curvas de energia foi muito semelhante para todos os indivíduos, com variações surgindo nos valores médios. Portanto a análise aqui descrita para um indivíduo é representativa do grupo.

Na Figura 2 vemos que as diferenças nas variações de energia do membro superior e inferior entre o andar a 1,5 m/s e o correr a 3,0 m/s são muito pequenas, e isto foi observado para todos os indivíduos. Para o membro superior, em alguns indivíduos, a variação era até maior no andar. Para o membro inferior a variação no correr para todos os indivíduos foi maior que no andar, sendo que a diferença em geral não alcançava 10% sendo exceção os indivíduos MP e HS onde a diferença foi de 35%. A contribuição dos membros inferiores à variação total chegava à quatro vezes a contribuição dos membros superiores no andar e até seis vezes no correr. Em valores absolutos a energia gerada pelos membros, tanto superiores como inferiores, foi sempre maior na corrida, sendo esta diferença média para os seis corredores de 5% para os membros superiores e de 10 % para os membros inferiores.

Como a contribuição dos membros superiores para a variação de energia total é muito pequena verificamos nos membros inferiores como se comportavam as diferentes componentes da energia para os três segmentos que compunham o membro inferior (lado direito): coxa, perna e pé no andar e na corrida a 3,0 m/s, respectivamente para os indivíduos GD e SS (Figura 3 e Figura 4).

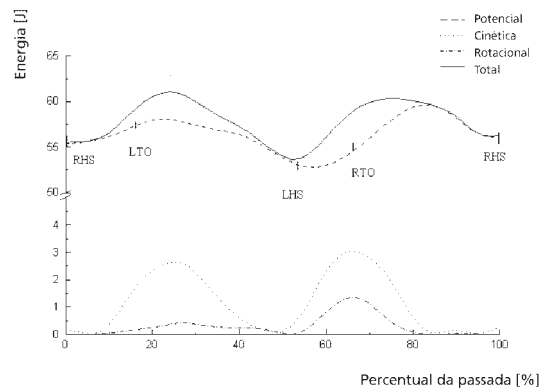
Para a coxa no andar (Figura 3a) podemos

**Andar - GD - 1,5 m/s**

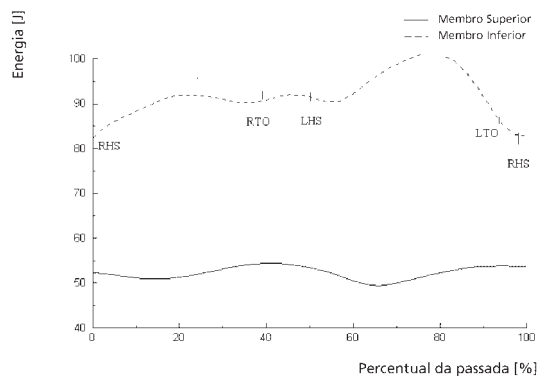


**Andar - 1,5 m/s**

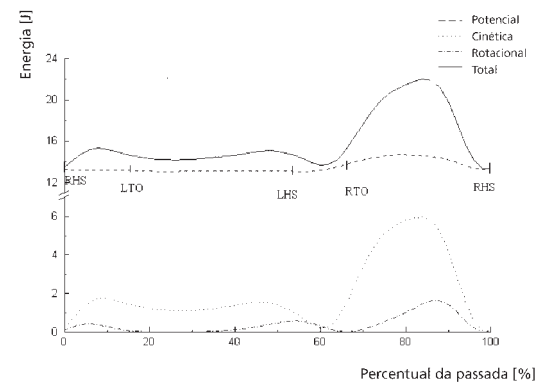
**Coxa**



**Correr - SS - 3,0 m/s**



**Perna**

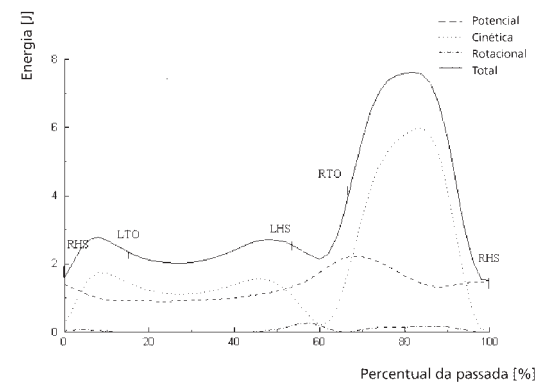


**Figura 2** - Curvas de energia total do membro inferior e do do membro inferior do lado direito para o andar do indivíduo GD a 1,5 m/s (a) e o correr a 3,0 m/s do indivíduo SS (b).

observar que a maior variação ocorre na energia potencial com a energia cinética também apresentando uma contribuição significativa e a variação na energia rotacional podendo ser considerada desprezível. As curvas para a energia cinética e total da coxa apresentadas no nosso estudo diferem bastante das apresentadas por Winter (1976b) pois a influência da velocidade do C.M. é significativa neste caso, alterando o padrão da curva de energia cinética real da coxa. Para Winter (1976b) a maior contribuição para a energia total da coxa advêm de variações na energia cinética.

Para a perna e pé (Figura 3 b, c) as maiores variações ocorrem na energia cinética sendo as variações na energia potencial e rotacional muito pequenas e para a perna praticamente iguais não podendo se desprezar portanto a energia rotacional para a perna (Winter,

**Pé**



**Figura 3** - Curvas de energia potencial, cinética, rotacional e total para os segmentos do membro inferior (lado direito): coxa (a), perna(b) e pé(c); para o indivíduo GD no andar a 1,5 m/s.

1976b). Outra diferença básica entre a coxa e os segmentos da perna e pé é que esta apresenta na curva de energia total dois picos de variação de energia, durante o apoio simples e no balanço, enquanto os outros apresentam um único pico durante o balanço (Robertson & Winter, 1980). Isto aponta para a conclusão que na fase de apoio a maior parte da energia gerada no membro inferior é gerada na coxa. Durante a fase de balanço a maior geração de energia é feita pela perna e na passada completa a contribuição total da coxa e da perna se equipara.

Ao observar-se o comportamento das curvas de energia para cada segmento podemos estudar se possivelmente existe interação entre elas. Para a perna observa-se que todas se comportam em fase, levando a concluir que não existe troca entre as energias dentro do segmento. Para o pé pode-se supor uma pequena interação entre a energia potencial e cinética durante a fase de balanço. Na coxa a interação entre energia potencial e cinética é mais pronunciada, mas como no pé, somente na fase de balanço.

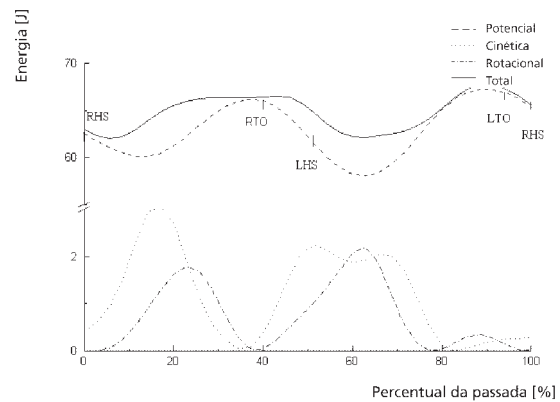
No correr (Figura 4), como para o andar, a maior contribuição para a variação da energia total da coxa é derivada da energia potencial, enquanto para a perna e o pé a maior contribuição vem da energia cinética. Para o pé (Figura 4 c) as outras componentes da energia mecânica se comportam como no andar, com pequeno aumento das variações nas curvas, com exceção da componente rotacional que se mantém desprezível. A curva total para o segmento pé apresenta, como no andar, somente um pico, ocorrendo uma provável transferência de energia entre as componentes potencial e cinética na fase de balanço.

Para a coxa e perna (Figura 4 a, b) a curva total da energia mecânica para os segmentos apresenta dois picos e as curvas de energia potencial e cinética se encontram em oposição durante toda a passada. Isto leva a crer em uma interação entre essas energias durante toda a passada. A variação da energia rotacional na coxa é muito semelhante à variação da energia cinética e está em fase com ela não podendo ser desprezada nos cálculos no entanto, na perna é muito pequena e se encontra em oposição à energia cinética. Essas relações entre as diversas componentes da energia mecânica nos leva a entender porque na variação total dentro dos segmentos a contribuição da coxa na corrida para a variação total é inferior à contribuição da perna e do pé.

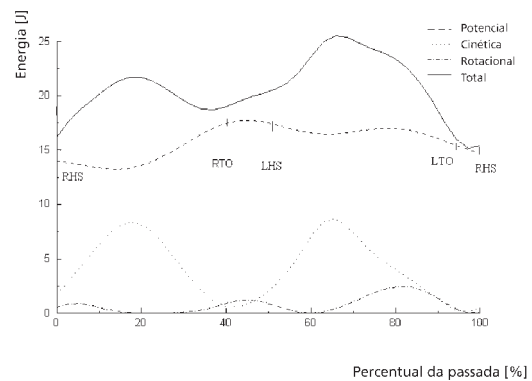
A relação entre a troca dentro e entre os segmentos e a contribuição da atividade muscular para as varia-

**Correr - 3,0 m/s**

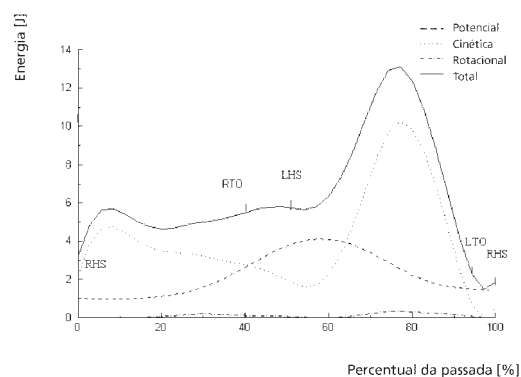
**Coxa**



**Perna**



**Pé**



**Figura 4** - Curvas de energia potencial, cinética, rotacional e total para os segmentos do membro inferior (lado direito): coxa(a), perna(b) e pé(c); para o indivíduo SS no correr a 3,0 m/s.

ções das diversas curvas, tanto no andar como no correr, tem sido objeto de atenção dos pesquisadores em geral, mas a compreensão do fenômeno que ocorre internamente na musculatura e articulações ainda permanece objeto de intensa discussão.

### Variações na energia mecânica dos segmentos em função da velocidade de corrida

Na Figura 5 pode-se observar as curvas de energia total dos membros superiores e inferiores para o indivíduo SS na corrida a 4,0 m/s.

Ao compararmos as curvas da Figura 5 (4,0 m/s) com as curvas da Figura 2 (3,0 m/s) podemos observar que o padrão das curvas é muito semelhante, sendo que para os membros superiores tanto o valor médio da curva como as variações de energia não apresentam diferenças significativas para as alterações nas velocidades. Para os membros inferiores o aumento no valor médio apresentado pela curva foi de somente 10% no entanto o aumento nas variações de energia foram em média de 100%, isto é, os valores dobraram. A contribuição dos membros inferiores com relação à contribuição dos membros superiores passou a ser 10 vezes maior, sendo este valor para os indivíduos HS e RF de até 20 vezes. De modo a observarmos melhor em que segmentos do membro inferior e em que componentes da energia mecânica ocorrem as alterações decorrentes do aumento da velocidade plotamos os gráficos das componentes de energia mecânica dos segmentos coxa, perna e pé de SS na velocidade de corrida de 4,0 m/s (Figura 6).

Observando a Figura 6 a, na coxa podemos logo perceber que conquanto o valor médio da curva de

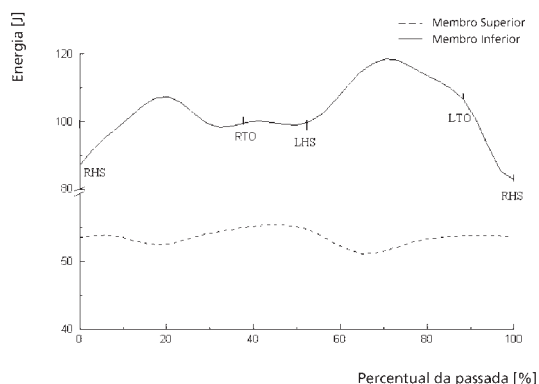
energia total não se altere significativamente com o aumento da velocidade, o padrão em si se encontra alterado. Isto ocorre devido ao valor praticamente igual apresentado pela energia potencial da coxa nas duas velocidades de corrida, valor que na velocidade de 4,0 m/s é acompanhado de um aumento pronunciado da energia cinética e rotacional. Como as energias cinética e rotacional interagem durante toda a passada com a energia potencial a alteração total da energia dentro do segmento se torna muito pequena para a velocidade de 4,0 m/s, pois a soma das variações das energias cinética e rotacional é em algumas fases da passada até um pouco maior que a variação da energia potencial.

Na perna e no pé (Figura 6 b, c) podemos observar que o maior valor médio da curva de energia total em relação à velocidade menor é resultante principalmente do maior valor médio da curva apresentada pela energia cinética na velocidade de 4,0 m/s. Com relação à variação de energia a variação total na perna é o dobro da apresentada na velocidade menor, com aumentos nas variações de energia cinética e potencial, mas sem alteração na rotacional; no pé a fase em que a diferença entre as variações se mostra maior é na fase de apoio e especificamente para a energia cinética, a variação na fase de balanço apresenta poucas diferenças para todas as componentes de energia. Portanto podemos concluir que com o aumento da velocidade a contribuição da variação de energia na coxa diminui, e que a maior contribuição ao aumento na variação de energia no membro inferior vem do aumento da variação da energia cinética da perna.

### Conclusões

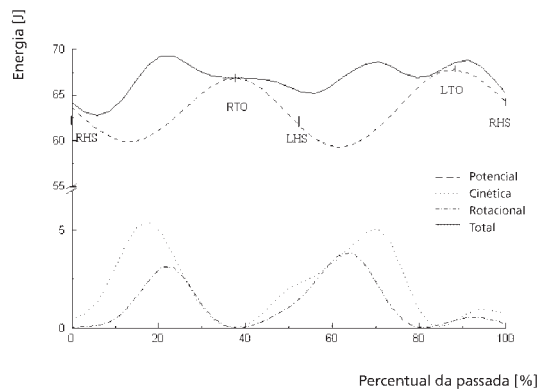
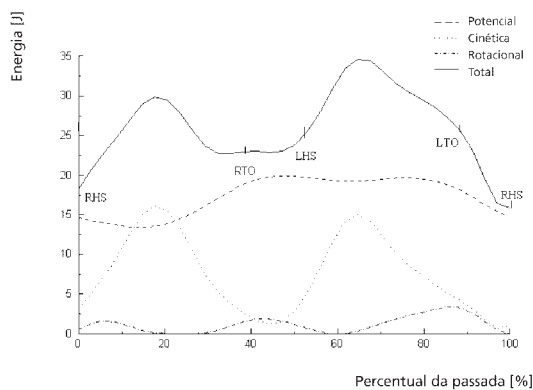
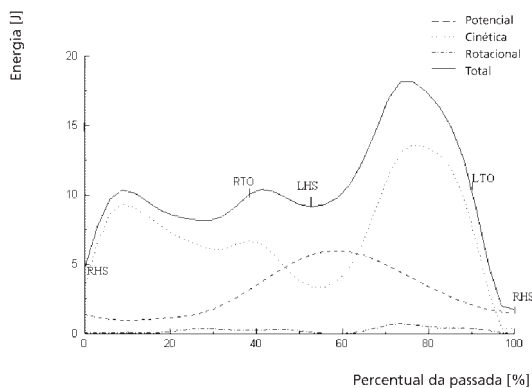
Os resultados derivados dos vários trabalhos de pesquisa em que foram utilizadas: a) estruturas diferentes de coleta e processamento de dados; b) métodos numéricos diferentes; c) cálculos do valor total, representativo da energia produzida, diferentes a partir de curvas de energia semelhantes; d) pressupostos conceituais diferentes da relação entre energia-trabalho-potência; dificilmente podem gerar dados que permitam ser comparados. Esta dificuldade deve ser bem compreendida e analisada de modo a que resultados aparentemente conflitantes ou com valores numéricos muito diferentes não sejam vistos como representativos de erros. Eles expressam simplesmente conceitos gerais opostos ou até complementares, mas diferentes. Uma das funções deste trabalho de pesquisa foi acompanhar com uma mesma metodologia e semelhança de conceitos uma variedade

### Correr - SS - 4,0 m/s



**Figura 5** - Curvas de energia total do membro inferior e do membro inferior do lado direito para o correr a 4,0 m/s do indivíduo SS.



**Correr - 4,0 m/s****Coxa****Perna****Pé**

**Figura 6** - Curvas de energia potencial, cinética, rotacional e total para os segmentos do membro inferior (lado direito): coxa (a), perna(b) e pé(c); para o indivíduo SS no correr a 4,0 m/s.

de fenômenos para o andar e correr dentro da idéia do cálculo de energia mecânica.

Optamos neste estudo por nos fixarmos no cálculo de energia mecânica a partir da cinemática, pois consideramos o cálculo a partir das forças musculares e articulares ainda muito envolvido em suposições e hipóteses ainda necessitando obterem comprovação metodológica do que estão realmente medindo. Reconhecemos no entanto que a cinemática só descreve o efeito, e o primordial é a causa, isto é, as forças de reação do solo assim como as forças musculares e articulares e a conseqüente transmissão entre as articulações e músculos. Talvez o caminho a ser seguido no futuro, deva ser tentar se esclarecer articulação por articulação, com a ajuda da pesquisa em neurofisiologia muscular, o que acontece em termos de trocas energéticas entre os músculos e articulações para se chegar então ao efeito na mecânica por análise comportamental. No entanto um modelo matemático que consiga levar em consideração as peculiaridades específicas dos músculos e articulações apoiado em conceitos já bem estabelecidos na mecânica clássica, e que principalmente possa ser aplicado ao movimento humano seguramente ainda está para ser desenvolvido.

Apesar destas limitações neste estudo descrevemos e analisamos as curvas de energia mecânica para o membro superior e inferior como um todo, assim como para os segmentos que compõem os mesmos, comparando os fenômenos representados pelas curvas de energia mecânica no andar e correr em duas velocidades diferentes.

O estudo foi eminentemente descritivo do padrão normal da locomoção, mas a aplicação prática deste estudo na avaliação de problemas locomotores parece apontar para uma correlação qualitativa entre as variações de energia mecânica e o grau de envolvimento patológico (Mansour *et al.*, 1982).

**Agradecimentos**

S. Corrêa agradece ao Instituto de Biomecânica da Escola Alemã de Esportes (Deutsche Sporthochschule) de Colônia pelo apoio de seus membros assim como pela utilização de aparelhos e programas computacionais da instituição; e ao DAAD (Serviço de Intercâmbio Acadêmico Alemão) e CAPES pelo apoio financeiro para o desenvolvimento do projeto.

**Referências**

Abdel-Aziz, Y.I., Karara, H.M. (1971). "Direct linear transformation from comparator coordinates into object-space coordinates". In: *Proceedings of Asp/Ui*

- Symposium On Close-Range Photogrammetry*.  
Champaign. p. 1-18.
- Cavanagh, P.R. (1990). "Biomechanics: a bridge builder among the sport sciences". *Medicine and Science in Sports and Exercise*, v. 22, p. 546-57.
- Corrêa, S.C. (1996) *Abordagem metodológica para determinação da energia mecânica: aplicação na biomecânica da locomoção humana*. Tese de Doutorado, Escola de Educação Física e Esportes, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Corrêa, S. C., Glitsch, U., Baumann, W., Amadio, A. C. (1997). "Estudo das diferenças de energia mecânica entre o andar e o correr na esteira rolante." *Anais do VII Congresso Nacional de Biomecânica*, Campinas, p. 240-245, 28-30 Maio.
- Dempster, W.T. (1955). "Space requirements of the seated operator.", *WADC Technical Report*. Ohio: Wright-Patterson Air Force Base, p. 55-159.
- Fenn, W.O. (1930) "Frictional and kinetic factors in the work of sprint running". *American Journal of Physiology*, v. 92, p. 583-611.
- Hay, J.G., Reid, J.G. (1982) *The anatomical and mechanical bases of human motion*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Kittel, C., Knight, W.D., Ruderman, M., Helmholz, A., Moyer, B.(1991). *Berkeley Physik Kurs: Mechanik*, Braunschweig: Vieweg.
- Mansour, J.M., Lesh, M.D., Nowak, M.D., Simon, R. (1982). "A three dimensional multi-segmental analysis of the energetics of normal and pathological human gait". *Journal of Biomechanics*, v. 15, p. 51-9.
- Morton, R.H. (1985) "Comment on a model for the calculation of mechanical power during distance running". *Journal of Biomechanics*, v. 18, p. 161-2.
- Norman, R., Sharrat, M., Pezzack, J., Noble, E. (1976). "Reexamination of the mechanical efficiency of horizontal treadmill running. In: *Biomechanics V B*". Ed. : P.V. KOMI, Baltimore: University Park Press, p. 87-93.
- Robertson, G., Winter, D. (1980). "Mechanical energy generation, absorption and transfer amongst segments during walking". *Journal of Biomechanics*, v. 13, p. 845-54.
- Stucke, H. (1984). *Datengewinnung mittels kinemetrie*. Tese de Doutorado. Deutsche Sporthochschule Köln, Köln, 200p.
- Williams, K.R., Cavanagh, P.R. (1983). "A model for the calculation of mechanical power during distance running". *Journal of Biomechanics*, v. 26, p. 115-28.
- Winter, D.A. (1979). *Biomechanics of human movement*, New York: John Wiley.
- Winter, D., Quanbury, A.O., Reimer G.D. (1976a). "Analysis of instantaneous energy of normal gait". *Journal of Biomechanics*, v. 9, p. 253-7.
- Winter, D., Quanbury, A.O., Reimer G.D. (1976b). "Instantaneous energy and power flow in normal human gait. In: *Biomechanics V B*". Ed. : P.V. Komi, Baltimore: University Park, p. 334-40.
- Zatsiorsky, V., Aleshinsky, S.Y., Jakunin, N.A. (1987). *Biomechanische Grundlagen der Ausdauer*, Berlin: Sportverlag.