
ATTI ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI
CLASSE SCIENZE FISICHE MATEMATICHE NATURALI

RENDICONTI

GIOVANNI A. CAVAGNA, RODOLFO MARGARIA

La meccanica della marcia e l'attività muscolare richiesta nelle singole fasi del passo

*Atti della Accademia Nazionale dei Lincei. Classe di Scienze Fisiche,
Matematiche e Naturali. Rendiconti, Serie 8, Vol. 38 (1965), n.3, p. 331-337.*

Accademia Nazionale dei Lincei

<http://www.bdim.eu/item?id=RLINA_1965_8_38_3_331_0>

L'utilizzo e la stampa di questo documento digitale è consentito liberamente per motivi di ricerca e studio. Non è consentito l'utilizzo dello stesso per motivi commerciali. Tutte le copie di questo documento devono riportare questo avvertimento.

*Articolo digitalizzato nel quadro del programma
bdim (Biblioteca Digitale Italiana di Matematica)*

SIMAI & UMI

<http://www.bdim.eu/>

Fisiologia. — *La meccanica della marcia e l'attività muscolare richiesta nelle singole fasi del passo* (*). Nota di GIOVANNI A. CAVAGNA e RODOLFO MARGARIA, presentata (**) dal Socio R. MARGARIA.

Il lavoro esterno nella marcia può essere considerato come dovuto sostanzialmente a due componenti: una inerziale che viene misurata dalle variazioni di velocità in direzione anteroposteriore, che si hanno ad ogni passo, W_F , ed una gravitazionale che può essere calcolata dallo spostamento ciclico del centro di gravità in direzione verticale, W_V . Il lavoro necessario per sostenere gli spostamenti laterali del centro di gravità non ammonta che a circa l'1% del totale ed è quindi stato trascurato [1].

Il lavoro esterno può quindi essere calcolato quando si conoscano gli spostamenti del centro di gravità in direzione verticale ed anteroposteriore, in funzione del tempo.

Questi sono stati determinati su tre soggetti per mezzo di una piattaforma sensibile alle componenti verticale e anteroposteriore della forza impressa al suolo dal piede, durante la marcia da 3 a 12 km/h. Se si prescinde dal peso del soggetto, le altre forze rilevate per mezzo della piattaforma sono inerziali, in relazione con la variazione di moto del soggetto ($F = M \cdot a$); essendo la massa del corpo, M , costante, si può quindi per integrazione grafica della funzione $F = f$ (tempo) conoscere la velocità v , e, per ulteriore integrazione, gli spostamenti del centro di gravità nelle direzioni considerate.

Dalla componente anteroposteriore della velocità, v_F , essendo nota la massa del corpo M , è stata calcolata l'energia cinetica del corpo $E_k = 1/2 M v_F^2$, le cui variazioni esprimono direttamente la componente W_F del lavoro.

Il lavoro, W_V , necessario per sostenere gli spostamenti del centro di gravità in direzione verticale, S_V , è stato calcolato dalla

$$(1) \quad W_V = S_V(P + F_V)$$

in cui P è il peso corporeo e F_V la componente verticale delle forze inerziali. In fig. 1 sono poste le curve del lavoro compiuto in direzione verticale W_V , dell'energia cinetica E_k e dell'energia totale del corpo $E_{TOT} = W_V + E_k$ durante un passo, a differenti valori di velocità di marcia. Le curve tratteggiate indicano l'andamento dell'energia potenziale, $E_p = S_V \cdot P$, calcolata moltiplicando gli spostamenti in direzione verticale per il peso del corpo, senza tenere conto della componente verticale delle forze inerziali. Poiché le curve W_V (o E_p) e E_k sono sostanzialmente in opposizione di fase, il lavoro positivo compiuto per passo, che è dato dalla somma degli incrementi

(*) Dall'Istituto di Fisiologia Umana dell'Università di Milano.

(**) Nella seduta del 13 marzo 1965.

a e b della curva E_{TOT} , è inferiore alla somma dei valori assoluti del lavoro compiuto contro la gravità (ampiezza dell'oscillazione della curva E_p , o W_V) e del lavoro necessario per sostenere le variazioni di velocità in direzione

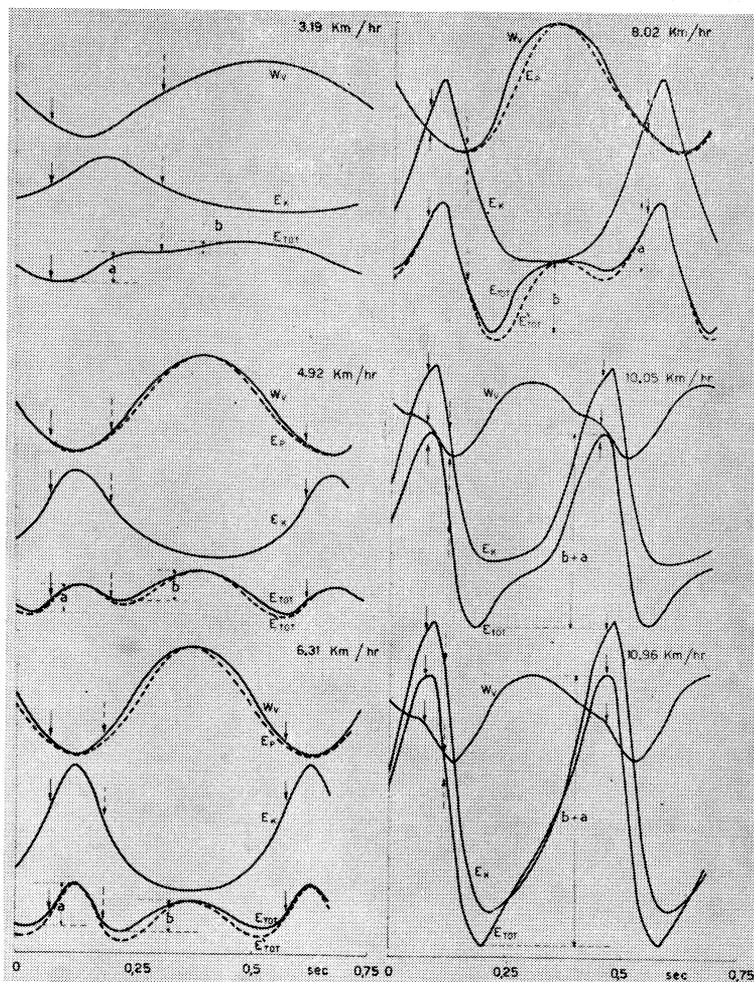


Fig. 1. - Curve del lavoro compiuto contro la gravità, W_V , dell'energia cinetica, E_k , e dell'energia totale del corpo, $E_{TOT} = W_V + E_k$, in funzione del tempo, nella marcia in piano alla velocità indicata.

Le curve tratteggiate si riferiscono rispettivamente all'energia potenziale, E_p , ed alla somma $E_p + E_k = E'_{TOT}$. Gli incrementi a e b della curva E_{TOT} rappresentano il lavoro positivo esterno compiuto ad ogni passo. Le frecce in tratto continuo indicano il momento in cui il tallone tocca il suolo, quelle in tratteggio il momento in cui l'altro piede lascia il suolo. Le divisioni sull'ordinata corrispondono a 2 piccole calorie.

anteroposteriore (ampiezza dell'oscillazione della curva E_k). È interessante notare che il lavoro totale calcolato dalla curva $E'_{TOT} = E_p + E_k$ è superiore di circa il 10% a quello calcolato dalla curva E_{TOT} : evidentemente la componente verticale delle forze inerziali viene sfruttata ai fini della progressione.

In fig. 2 il lavoro meccanico esterno, per minuto e per kg di peso, \dot{W}_{TOT} , è posto in funzione della velocità di marcia: nella stessa figura sono rappre-

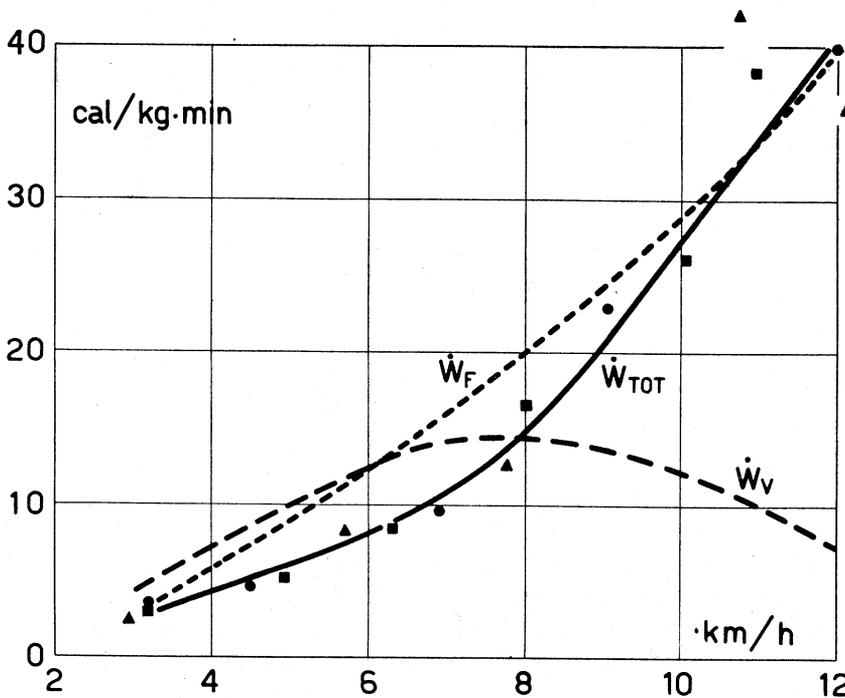


Fig. 2. - Lavoro esterno totale, per minuto e per kg di peso corporeo, \dot{W}_{TOT} , in funzione della velocità di marcia (linea continua).

Le curve tratteggiate si riferiscono alle singole componenti, e cioè a) al lavoro compiuto contro la gravità, \dot{W}_V , e b) al lavoro necessario per sostenere le variazioni di velocità in direzione anteroposteriore, \dot{W}_F .

sentate in tratteggio singolarmente le curve del lavoro compiuto contro la gravità \dot{W}_V e del lavoro dovuto alle variazioni di velocità in direzione anteroposteriore \dot{W}_F .

LAVORO COMPIUTO CONTRO LA GRAVITÀ.

Il lavoro compiuto contro la gravità, \dot{W}_V , aumenta fino ad un massimo alla velocità di marcia di 8 km/h circa, e si riduce quindi progressivamente fino a scendere, alla velocità di 12 km/h, a circa la metà del valore massimo: la curva degli spostamenti verticali ad ogni passo in funzione della velocità ha un andamento analogo.

Certamente uno dei fattori determinanti l'escursione verticale del centro di gravità è la lunghezza del passo: il centro di gravità raggiunge il suo punto più basso quando è massimo il divaricamento degli arti inferiori ed il punto più alto pressapoco quando il divaricamento è nullo. Quanto più lungo è

il passo, tanto maggiore tende perciò ad essere l'escursione verticale del centro di gravità.

Un altro fattore che tende a spostare verso l'alto il centro di gravità è la rapida estensione del piede che sta per lasciare il terreno, e che imprime al corpo una spinta verso l'alto e l'avanti. Questa ha luogo nel momento in cui gli arti inferiori sono nella fase di massimo divaricamento, ed il centro di gravità sta raggiungendo il punto più basso. Con l'aumentare della velocità, tale spinta diventa sempre più vigorosa, e la componente verticale di essa tende ad opporsi all'abbassamento del centro di gravità riducendone l'entità. Questa è verosimilmente la ragione della diminuzione dell'ampiezza delle oscillazioni del centro di gravità in direzione verticale ad elevata velocità di marcia.

LAVORO DOVUTO ALLE VARIAZIONI DI VELOCITÀ IN DIREZIONE ANTEROPOSTERIORE.

La componente \dot{W}_F del lavoro è molto piccola a bassa velocità di marcia e aumenta progressivamente con la velocità raggiungendo a 12 km/h valori circa 5 volte superiori a quelli del lavoro compiuto contro la gravità.

Il lavoro W_F è necessario per sostenere le variazioni della velocità del corpo in direzione anteroposteriore che si osservano ad ogni passo, e che sono causate dalla decelerazione che segue il contatto del piede contro il suolo.

Tali variazioni, che possono essere espresse dalla differenza tra la velocità massima e la minima, $v_1 - v_2$, sono tanto più grandi quanto maggiore è la velocità media di marcia v_m . Risulta dai dati sperimentali che fino alla velocità di 9 km/h circa tale relazione può essere definita da una retta che risponde all'equazione:

$$(2) \quad v_1 - v_2 = 0,136 + 0,066 v_m$$

la velocità essendo espressa in m/sec.

Essendo approssimativamente la velocità media

$$(3) \quad \frac{v_1 + v_2}{2} = v_m$$

da cui

$$(4) \quad v_1 + v_2 = 2 v_m$$

moltiplicando membro a membro la 2) e la 4) si ottiene

$$(5) \quad v_1^2 - v_2^2 = 2 \cdot 0,136 v_m + 2 \cdot 0,066 v_m^2.$$

Dalla quale, moltiplicando ambo i membri per $M/2$, essendo M la massa del corpo in kg, si ottiene

$$(6) \quad M/2 \cdot (v_1^2 - v_2^2) = W_F = M \cdot 0,136 v_m + M \cdot 0,066 v_m^2$$

la (6) illustra come il lavoro W_F compiuto ad ogni passo aumenti con la velocità di marcia.

In fig. 3 la componente del lavoro compiuto nell'unità di tempo, \dot{W}_F , anziché per passo, è posto in funzione della velocità. Poiché

$$(7) \quad \dot{W}_F = W_F \cdot f$$

in cui f è il numero di passi per minuto, risulta evidente che per determinare la funzione $\dot{W}_F = f(v_m)$ è necessario conoscere come aumenta f con la velo-

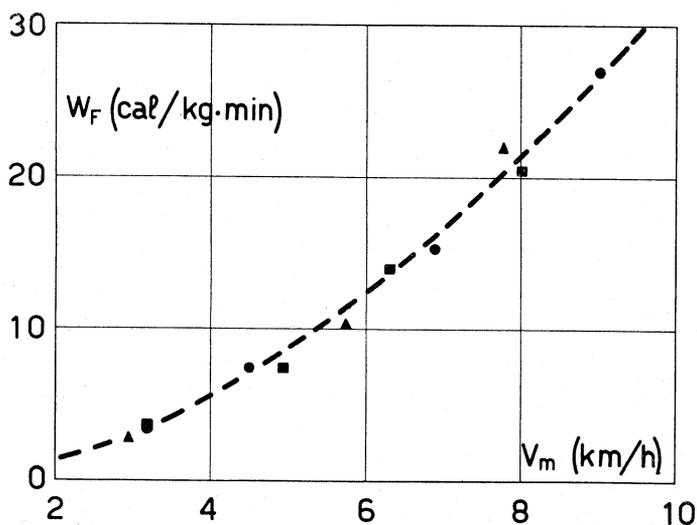


Fig. 3. - Lavoro per minuto e per kg di peso corporeo, necessario per sostenere le variazioni di velocità in direzione anteroposteriore, \dot{W}_F .

La curva tratteggiata è definita dalla (11), e segue soddisfacentemente l'andamento dei dati sperimentali.

rità. La lunghezza del passo L aumenta con la velocità, secondo una relazione lineare, che risulta dai dati sperimentali essere definita dalla

$$(8) \quad L = 0,362 + 0,257 v_m$$

nella quale L è espresso in m e v_m in m/sec .

La velocità media di marcia può essere anche definita dalla

$$(9) \quad v_m = L \cdot f.$$

Dalla (8) e dalla (9) si ottiene

$$(10) \quad f = \frac{v_m}{0,362 + 0,257 v_m}.$$

Moltiplicando membro a membro la (10) e la (6) e riarrangiando si ottiene

$$(11) \quad W_F \cdot f = \dot{W}_F = 14,32 \frac{v_m}{0,362 + 0,257 v_m} (0,136 v_m + 0,066 v_m^2).$$

in cui v_m è espressa in m/sec . e \dot{W}_F in $cal/kg \cdot min$ anziché in kgm/sec .

I dati sperimentali seguono soddisfacentemente l'andamento definito dalla (11), come risulta dalla fig. 3. Appare perciò giustificato affermare che

fino alla velocità di 9 km/h il lavoro per minuto dovuto alle variazioni di velocità in direzione anteroposteriore è condizionato dal fatto che sia la lunghezza del passo, che le variazioni di velocità ad ogni passo, aumentano linearmente con la velocità.

LAVORO ESTERNO TOTALE.

Dalla fig. 2 risulta che il lavoro esterno totale che è necessario compiere per mantenere una determinata velocità di marcia, non solo è sempre inferiore alla somma dei valori assoluti delle due componenti \dot{W}_F e \dot{W}_V , ma, fino alla velocità di circa 8 km/h, è anche inferiore al valore di ciascuna di esse. Ciò è dovuto al fatto che il lavoro compiuto contro la gravità e quello necessario per sostenere le variazioni di velocità in direzione anteroposteriore, sono sostenuti oltre che dall'attività muscolare anche dalle strutture scheletriche di sostegno che, in alcune fasi del passo, permettono una trasformazione dell'energia cinetica in potenziale e viceversa. Ovviamente quando una forma di energia si trasforma nell'altra il lavoro esterno totale è nullo. Gli incrementi (lavoro positivo) ed i decrementi (lavoro negativo) della curva E_{TOT} , che è la somma delle curve W_V e E_k , sono quindi sostenuti esclusivamente dall'attività muscolare.

Un'analisi delle variazioni dell'energia totale E_{TOT} (fig. 1) durante il ciclo di un passo permette di rilevare che i muscoli compiono lavoro positivo esterno in due fasi del passo, nelle quali si osservano gli incrementi *a* e *b* della curva E_{TOT} , intercalate da due fasi in cui viene compiuto lavoro negativo.

Lavoro esterno positivo viene compiuto *a*) quando il centro di gravità del corpo si approssima al suo punto più basso ed i muscoli estensori del piede (gastrocnemio, ecc.) che sta per lasciare il suolo, conferiscono al corpo una spinta diretta verso l'alto e l'avanti, che ha come effetto utile netto di accelerare il corpo verso l'avanti (aumento dell'energia cinetica); *b*) quando il centro di gravità sta per raggiungere il suo punto più elevato, ed entrano in attività i muscoli estensori della coscia (glutei, ecc) che sollevano il centro di gravità (aumento dell'energia potenziale).

Lavoro esterno negativo viene compiuto *c*) quando inizia il sollevamento del corpo, ed il piede che poggia sul suolo si trova davanti al centro di gravità: ciò implica una decelerazione del corpo ed i muscoli estensori della coscia e della gamba, entrando in attività per opporsi alla tendenza del tronco a flettersi in avanti, vengono stirati da forze inerziali (diminuzione dell'energia cinetica); *d*) quando inizia l'abbassamento del centro di gravità, e l'arto che poggia sul terreno, in seguito allo spostamento del centro di gravità in avanti, viene iperesteso, provocando uno stiramento dei muscoli flessori della coscia (ileopsoas, ecc.), che ha luogo a spese di una diminuzione dell'energia potenziale.

A velocità di marcia > 9 km/h il lavoro negativo compiuto in *d*) si riduce fino ad annullarsi, in modo che le due fasi *a*) e *b*) del lavoro positivo

si fondono in una sola, seguita da una sola fase *c*) di lavoro negativo. Anche nella corsa nel ciclo di un passo si osserva una sola fase di lavoro positivo ed una di lavoro negativo, come nella marcia veloce.

Evidentemente la meccanica della marcia si altera progressivamente a velocità elevata, a causa della sempre maggiore importanza della spinta verso l'alto e l'avanti del piede che sta per lasciare il suolo, e che è responsabile per il lavoro esterno *a* (vedi curva E_{TOT} in fig. 1). Quando la componente verticale di tale spinta supera il peso del corpo, questo si stacca dal suolo, e le due curve dell'energia potenziale e cinetica del corpo diventano perfettamente in fase: si ha allora il passaggio dalla marcia alla corsa.

Il lavoro meccanico esterno, espresso per km di percorso, aumenta progressivamente con la velocità e non si mantiene costante, come si poteva dedurre da dati pubblicati precedentemente riferentisi a velocità inferiori a 7,5 km/h [1]. Il lavoro esterno per km, che nella marcia a circa 3-4 km/h è di circa 0,05 kcal/kg km, raggiunge a 12 km/h valori dello stesso ordine di quelli osservati nella corsa (0,25 kcal/kg km); il consumo per km nella marcia a tale velocità, è invece apprezzabilmente superiore che nella corsa. Evidentemente il lavoro interno nella marcia veloce è notevolmente più elevato che nella corsa: vi contribuiscono verosimilmente *a*) contrazioni isometriche di estese masse muscolari degli arti aventi lo scopo di irrigidire le strutture portanti che vengono sottoposte a molto maggiori sollecitazioni, e *b*) attività muscolare necessaria per sostenere quei movimenti degli arti che, essendo uguali ed opposti, non comportano spostamenti del centro di gravità.

BIBLIOGRAFIA.

[1] G. A. CAVAGNA, F. P. SAIBENE and R. MARGARIA, « J. Appl. Physiol. », 18, 1 (1963).

ABSTRACT. — The vertical and the frontal components of the push exerted by the foot on the ground, walking at different speeds (3-12 km/h), have been measured by means of a sensitive platform, and the work against gravity, \dot{W}_V , and the work due to velocity changes in forward direction, \dot{W}_F , have been calculated.

The work per minute against gravity, \dot{W}_V , increases up to 8 km/h and then decreases. The work per minute due to velocity changes in forward direction, \dot{W}_F , on the contrary, increases progressively with increasing speed. The characteristic patterns of \dot{W}_V and \dot{W}_F as a function of speed, have been analyzed.

The external work per step $W_{TOT} = W_V + W_F$, must be sustained by muscular activity; both W_V and W_F alone on the contrary are not directly related with muscular activity, as the rigid skeletal structures make possible the transformation of kinetic energy into potential and viceversa. This gives reason of the fact that up to 8 km/h, W_{TOT} is less than each of its components W_F and W_V . Two phases, in which muscles perform external positive work, are evidenced in the step cycle; these are separated by two interposed phases, in which negative work is performed.