

ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI

ANNO CCCLXIII - 1966

QUADERNO N. 78

PROBLEMI ATTUALI
DI SCIENZA E DI CULTURA

RODOLFO MARGARIA

**LA LOCOMOZIONE UMANA
IN SUBGRAVITÀ**

RELAZIONE SVOLTA NELLA SEDUTA ORDINARIA
DELL'11 DICEMBRE 1965



ROMA
ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI
1966

PRESIDENTE SEGRE -- Questa volta ritengo di dovere modificare un po' la prassi delle sedute, in vista dell'innovazione di avere una conferenza in occasione di ogni seduta di Classe. È questa un'iniziativa che il Consiglio di Presidenza ha preso concordemente, sia per la nostra Classe che per la Classe di Scienze morali, presso la quale in questo momento viene tenuta un'altra conferenza, riguardante la Costituzione Italiana. Tale iniziativa si ispira a motivi e si svolgerà secondo linee che non sto ora ad enunciare perché, dato che abbiamo già l'oscuramento predisposto per la conferenza e relative proiezioni, sarà meglio parlarne dopo, nella seconda parte della seduta, alla quale rimando l'illustrazione del programma che si svolgerà nella nostra Classe.

Parlerà fra breve il prof. Rodolfo Margaria, Socio Nazionale della nostra Accademia, che alle sue ben note eminenti qualità scientifiche aggiunge quella forse non altrettanto conosciuta di valente ed appassionato sportivo. Credo che ciò abbia potuto influire sulla scelta dell'argomento della sua conferenza, oltre al fatto ch'esso è di palpitante attualità: la locomozione umana subgravitazionale. In virtù dei miracoli che sempre più frequentemente stanno avvenendo nei cieli col lancio dei vari missili e sputnik e della conseguente possibilità di arrivare presto sulla luna o su altri satelliti o pianeti, il suddetto argomento - di grande interesse teorico - potrebbe infatti anche ricevere applicazioni pratiche a non lunga scadenza. Ringrazio sentitamente il prof. Margaria per aver accettato l'invito ad essere il primo oratore in questa serie di conferenze, che verranno pubblicate nella collezione dei Quaderni della nostra Accademia e di cui sarà così data larga diffusione, e gli cedo senz'altro la parola.

RODOLFO MARGARÍA

LA LOCOMOZIONE UMANA IN SUBGRAVITÀ ¹

Fa veramente stupire come l'attività forse più comune dell'uomo, una delle più importanti e più caratteristiche per ciò che riguarda la vita di relazione, la locomozione, e cioè la marcia e la corsa, abbia attirato così poco finora l'attenzione dei fisiologi, tanto che solo negli ultimi anni sono stati acquisiti dati che riguardano questa importante funzione.

Uno studio razionale della locomozione umana anzitutto implica *a)* una analisi della meccanica della locomozione e *b)* la determinazione del costo energetico necessario.

L'analisi del *costo energetico della marcia e della corsa* a tutte le velocità, in salita ed in discesa, ad inclinazione del terreno fino al $\pm 40\%$ è stata fatta alcuni anni or sono e pubblicata in una Memoria di quest'Accademia [1]; a quanto mi risulta essa è ancora oggi la più completa esistente nella letteratura, ed alcuni dati significativi sono riassunti nelle figg. 1 e 2.

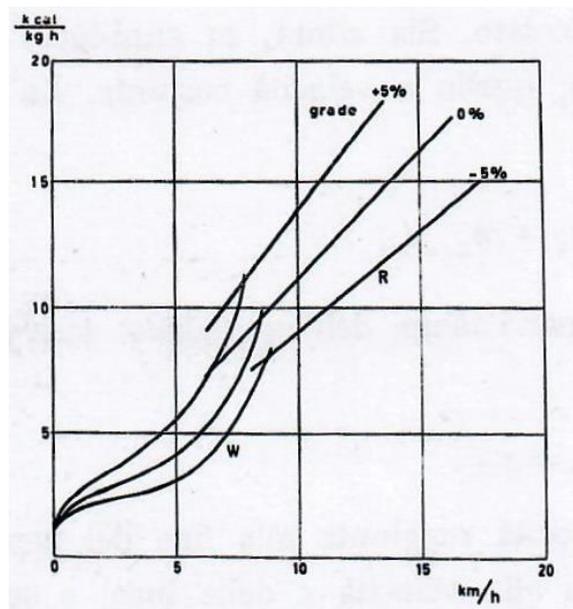


Fig. 1. - Consumo energetico nella marcia e nella corsa W_R in piano ed a lieve inclinazione del terreno (-5% / $+5\%$). Il punto di incrocio delle curve indica il limite al quale la corsa diventa più redditizia della marcia (da MARGARIA, 1938).

Particolarmente dalla figura 2 i valori di consumo energetico, espressi in kcal per kg di peso e per km, di un individuo che cammini, sono facilmente rilevabili, e possono essere utilizzati per calcolare il fabbisogno energetico o l'equivalente calorico di una passeggiata di qualsiasi entità, quando sia noto il percorso.

¹ Relazione svolta nella seduta ordinaria dell'11 dicembre 1965.

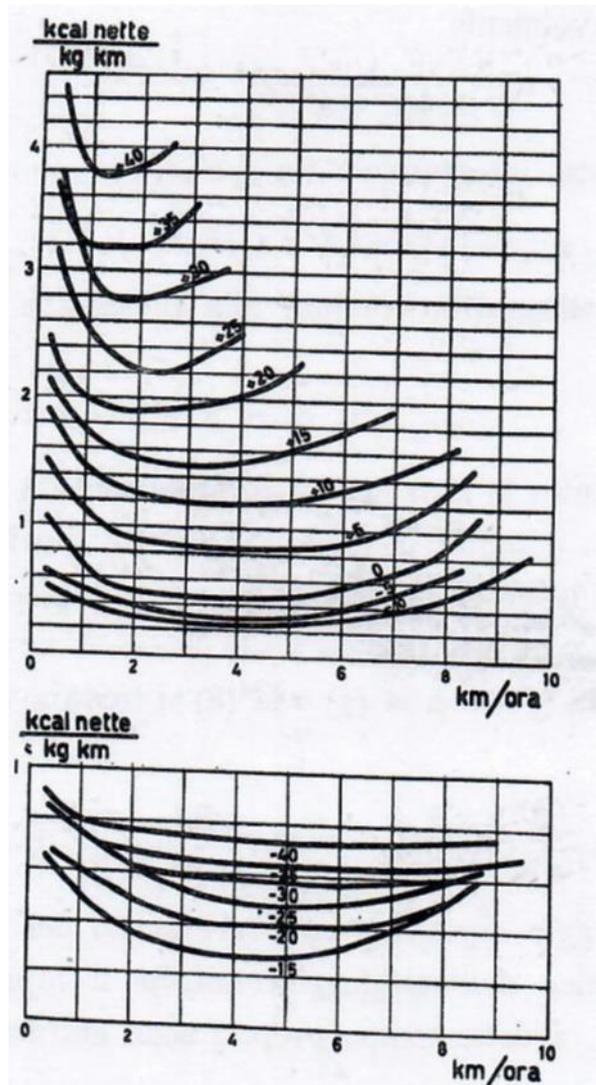


Fig. 2. - Sottraendo dalla spesa energetica totale per kg e per h il valore di riposo (velocità = 0) e dividendo per la velocità, si ottiene il costo energetico netto per km. Questo valore è posto sull'ordinata in funzione della velocità c per tutti i valori di inclinazione del terreno, compresi entro $\pm 40\%$ (da MARCARIA, 1938).

Ma ciò che risulta prepotentemente da questo grafico è che, fuorché nella marcia in salita ad inclinazioni elevate, il costo energetico della marcia per una larga zona di valori di velocità è pressoché indipendente da quest'ultima, e non è che alle velocità estreme che il costo aumenta. Ad esempio, nella marcia in piano, in una zona di velocità che va da 2 a 5 km/h, il costo è sempre di 0,5 kcal per kg di peso e per km, e nella marcia in discesa, quando l'inclinazione del terreno è del 40%, questa zona di costo costante è ancora più estesa, perché va da 2 a 9 km/h, il costo essendo di 0,7\$ kcal/kg km.

La variazione del costo energetico per km di percorso è invece molto sensibile quando varia l'inclinazione del terreno: il costo aumenta progressivamente nella salita fino a tendere ad un incremento corrispondente ad un rendimento meccanico del 25% (ved. fig. 3). Diminuisce nella discesa, fino ad un minimo ad inclinazione del 10%, per

umentare in seguito a discese più ripide, ma con un incremento molto minore che nella marcia in salita. Se invece della marcia si considera la corsa, la costanza del costo energetico per kg e per km di percorso è ancora più evidente (ved. fig. 1) e vale anche per le massime velocità di corsa sperimentate su atleti, capaci di mantenere una velocità di regime di 22 km/h [2].

Questi risultati, che sono stati ottenuti su soggetti che camminavano e correvano su un nastro trasportatore che si muoveva a velocità costante, non si differenziano da quelli ottenuti su strada, altro che per la resistenza

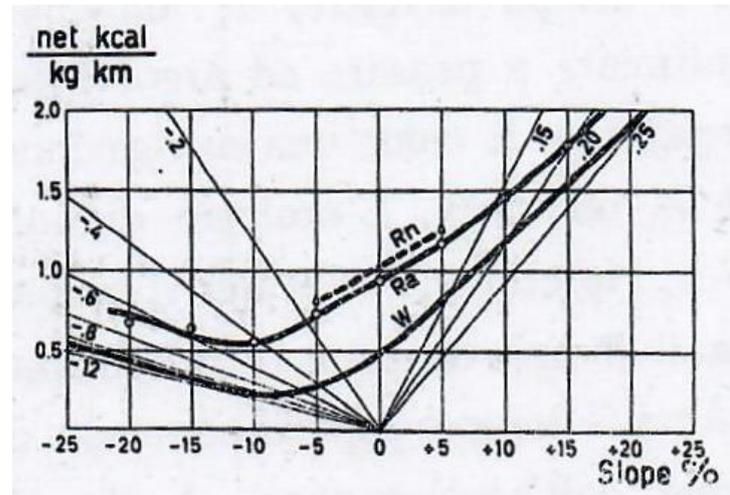


Fig. 3. - Consumo energetico per kg di peso e per km nella marcia alla velocità più economica (W) e nella corsa (R) in funzione dell'inclinazione del terreno: *a* = atleti, *n* – non atleti.

Considerando come lavoro meccanico soltanto il sollevamento del peso del corpo, il rendimento può essere calcolato, e le linee iso-rendimento irradiatesi dallo zero sono indicate. Il rendimento così calcolato tende a raggiungere un valore di 0,25 nella marcia o nella corsa in salita, ed un valore di $-1,2$ nella marcia in discesa (da MARGARIA e coll., 1963).

del vento, che ovviamente era nulla nel nostro caso. Per conoscere il costo energetico di un soggetto che corre su strada, occorre aggiungere ai dati delle figg. 1-3 il costo energetico necessario per vincere la resistenza d'attrito dovuta all'aria.

Data l'indipendenza del costo energetico nella locomozione dalla velocità, i dati della fig. 2 possono essere raccolti più sinteticamente nella fig. 3, in cui il costo energetico è rappresentato in funzione dell'inclinazione del terreno. In questo i dati per la corsa (R) valgono per tutte le velocità, quelli per la marcia (W) valgono solo per la velocità di marcia più economica.

Poiché il consumo energetico è indipendente dalla velocità, e questo vale particolarmente per la corsa, e poiché gli attriti aumentano secondo una funzione esponenziale con la velocità, è ovvio che l'energia impiegata per vincere gli attriti, esclusi quelli dovuti alla resistenza dell'aria, nella locomozione è trascurabile. E poiché il costo energetico aumenta invece molto sensibilmente con l'inclinazione del terreno, e, per una pendenza del terreno superiore al 20% nella marcia in salita è addirittura proporzionale ad esso, vien da pensare che il lavoro compiuto nella locomozione sia soprattutto *lavoro antigravitario*, quale è quello impiegato per l'innalzamento del corpo che ha luogo nella prima metà di ogni passo.

Si rendeva perciò necessaria un'analisi dettagliata della *meccanica della locomozione*, che finora è stata ancora più trascurata del consumo energetico.

Questo studio è stato avviato nel nostro Istituto servendoci di tre metodi *a)* applicando al tronco del soggetto un accelerometro sensibile alle tre direzioni ortogonali, *b)* analizzando i movimenti del soggetto con metodo cinematografico, ed infine *c)* per mezzo di una piattaforma sensibile alle componenti orizzontale e verticale della forza esercitata dal piede sul suolo [3 e 4]. Questi due ultimi metodi erano già stati utilizzati da altri Autori in precedenza [5, 6].

Questo studio, oltre che di interesse fisiologico, avrebbe potuto avere, a nostro avviso, varie applicazioni a problemi di grande attualità connessi con la Fisiologia del Lavoro, e cioè con l'Ergonomia, e soprattutto con la Fisiologia dello Sport e dell'atletismo.

Inoltre, questo problema riveste anche un particolare interesse per la possibilità che l'uomo un giorno atterri sulla Luna o su un altro pianeta che abbia una forza gravitazionale sensibilmente differente da quella della terra: ed è nostro compito provvedere ad individuare le alterazioni di ogni tipo alle quali i viaggiatori spaziali possono andare incontro, affinché le incognite che essi devono affrontare, ed i problemi che essi possono non essere preparati a risolvere, vengano ridotte al minimo.

Dallo studio della meccanica della locomozione sulla superficie terrestre si può infatti giungere a prevedere quali possono essere le condizioni meccaniche di progressione sulla superficie lunare.

Consideriamo dapprima la *marcia*: ad ogni passo il centro di gravità del corpo compie delle oscillazioni in senso verticale di 4-5 cm (curve S_y della fig. 4), e l'energia potenziale del corpo, o energia gravitazionale, oscilla corrispondentemente (curve W_y). Ma questa non è che una frazione dell'energia totale posseduta da un corpo in movimento: a questo bisogna aggiungere l'energia cinetica, W_F che è funzione della velocità, che pure subisce delle oscillazioni ad ogni passo.

Nella marcia gli spostamenti del centro di gravità in senso verticale ed in senso laterale avvengono ad una velocità molto bassa, e le variazioni di energia cinetica sono quindi molto piccole, tali da poter essere trascurate in prima approssimazione: esse ammontano a non più del 2% del lavoro totale compiuto. Notevoli invece sono le oscillazioni di velocità in direzione della progressione, e da queste le corrispondenti oscillazioni di energia cinetica possono essere facilmente calcolate (curve indicate con W_F nella fig. 4). Supponendo che queste due siano le uniche forme di energia disponibile, l'energia totale del corpo può quindi essere rappresentata dalla somma delle curve W_y e W_F e cioè dalla curva indicata in W_{TOT}

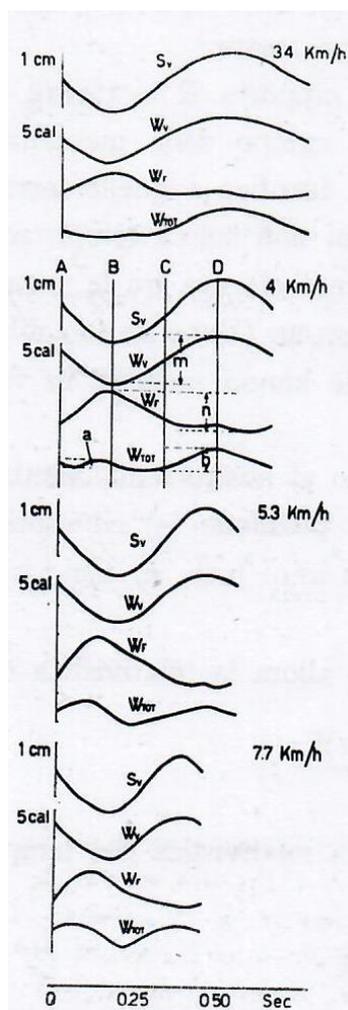


Fig. 4. - Curve dell'energia potenziale (W_v) e cinetica (W_f) del corpo durante un passo di marcia alle velocità rispettivamente di 3,4, 4,0, 5,3 e 7,7 km/h.

W_v è calcolato dagli spostamenti verticali del centro di gravità S_v ; W_f è calcolato dalle oscillazioni di velocità nella direzione del movimento. W_{TOT} è la somma delle due curve $\{W_v$ e $W_f\}$ è il lavoro compiuto contro la gravità, « il lavoro dovuto alle oscillazioni di velocità in direzione frontale: $a+b$ è il lavoro totale esterno. Le divisioni sull'ordinata corrispondono a 5 cal per W , a 1 cm per S_v (da CAVAGNA, SAIBENE e MARGAUIA, 1963).

Appare subito evidente che le curve dell'energia cinetica e potenziale sono sostanzialmente in opposizione di fase: mentre una aumenta l'altra diminuisce e viceversa, e ciò indica che una forma di energia si trasforma nell'altra, senza che varii molto il potenziale energetico del corpo. Infatti le oscillazioni dell'energia totale (a e b) risultano essere molto minori delle oscillazioni di ognuna delle sue componenti, energia potenziale (m) ed energia cinetica (n).

Se noi immaginiamo un uovo che rotoli su un piano, lungo il suo asse maggiore, il tracciato del suo centro di gravità su un piano verticale lungo la traiettoria, sarebbe simile a quello della curva S_v . Anche i livelli energetici potenziale e cinetico, avrebbero un andamento simile a quello delle curve W_v e W_f , solo che le curve sarebbero più regolari e l'opposizione di fase sarebbe perfetta. In questo caso la somma delle due curve, W_{TOT} sarebbe semplicemente una linea orizzontale, nel caso ideale in cui

l'uovo non incontri attriti nella sua traiettoria.

In effetti, parte dell'energia va persa in attriti, e la linea W_{TOT} , anziché essere orizzontale, penderebbe verso il basso: dopo alcuni giri l'uovo si ferma. Ma se supponiamo che al momento in cui il centro di gravità dell'uovo si solleva ed il suo asse maggiore tende ad essere verticale, una certa quantità di energia venga somministrata all'uovo da una forza diretta verso l'alto, in modo da compensare gli attriti e da assicurare che il centro di gravità raggiunga sempre la massima altezza, l'uovo continuerebbe a rotolare e non tenderebbe a fermarsi. Questa energia addizionale apparirebbe nel grafico della fig. 4 come un aumento del livello della linea, W_{TOT} , analogo ai dislivelli indicati con a e b sulla curva che descrive la marcia dell'uomo.

Sotto questo punto di vista l'uovo che rotola è un magnifico *modello della marcia* dell'uomo in piano, ogni ciclo corrispondendo ad un passo.

Ad ogni passo, per effetto della contrazione di appropriati muscoli degli arti e del tronco, un incremento di energia viene fornito al corpo: e questo ha luogo in due fasi nel ciclo di un passo, come è indicato nella fig. 4, nella quale l'entità dell'apporto energetico è rappresentato con a e b . L'incremento a è dovuto alla spinta verso l'alto e verso l'avanti del piede che sta per lasciare il suolo: l'incremento b è dovuto alla contrazione dei muscoli glutei dell'arto che è stato portato innanzi, e che, raccorciandosi, porta sulla verticale l'asse dell'arto e quello del tronco, e tende a sollevare il centro di gravità del corpo [8]. A questa fase di lavoro positivo, costituito dall'apporto energetico della contrazione muscolare, segue una fase di lavoro negativo, la cui entità nella marcia in piano è esattamente uguale a quella del lavoro positivo, sì che il livello energetico si mantiene costante. Mentre la spinta dovuta alla contrazione dei glutei (fase b) ha direzione verticale, la spinta dovuta alla contrazione dei muscoli del polpaccio (fase a) e che è diretta verso il centro di gravità, è praticamente verticale a bassa velocità: a velocità più elevate è diretta un po' più verso l'avanti, ma anche alla massima velocità di marcia, l'asse del corpo non è molto lontano dalla verticale.

Infatti la spinta del piede contro il terreno deve essere il più possibile perpendicolare alla superficie del terreno stesso per essere efficace, e non sarebbe possibile su un terreno piano conferire al corpo una spinta soltanto nella direzione della progressione. Ciò vuol dire che per progredire, poiché non abbiamo la possibilità di aumentare direttamente l'energia cinetica del nostro corpo, si ricorre sostanzialmente a sollevare il corpo, e ad aumentarne così la sua energia potenziale: questa viene poi trasformata in energia cinetica dalla caduta del corpo in avanti. La spinta nella direzione della progressione è quindi sostenuta prevalentemente dalla forza di gravità, opportunamente guidata dalle strutture scheletriche e dal tono muscolare.

Consideriamo ora ciò che succede quando varia la gravità. In assenza di gravità l'uovo può rimanere fermo su uno dei suoi poli, come l'uovo di Colombo; in effetti, in assenza di gravità perde ogni significato il concetto di « alto » e « basso », che per definizione è riferito alla direzione della forza di gravità. In condizioni di gravitazione ridotta, come sulla Luna, ove la forza gravitazionale è circa un sesto di quella della terra, l'uovo posto verticalmente cadrebbe, ma molto più lentamente: così l'uovo che rotoli su un piano sulla superficie lunare, rotolerebbe molto più lentamente, ed il tempo impiegato per ogni ciclo sarebbe molto maggiore di quello impiegato sulla superficie

terrestre.

Analogamente la durata del passo di un uomo che cammini, sarà molto maggiore sulla Luna che sulla terra: e se sulla terra nella marcia veloce si compiono ordinariamente 100-120 passi per min, sulla Luna non è possibile compierne più di 40 circa, corrispondenti ad una velocità di poco superiore a 2 km/h.

Per ciò che riguarda il lavoro, le curve Wv della fig. 4 riferite alla marcia sulla Luna sarebbero molto più appiattite, le oscillazioni sarebbero cioè ridotte ad un sesto. E poiché le oscillazioni della curva WF , (n della fig. 3) espressione del lavoro compiuto ai fini della progressione, sono sostenute dal lavoro compiuto in direzione verticale, cioè dall'ampiezza in delle oscillazioni Wv , anche esse dovranno essere corrispondentemente ridotte.

In altre parole, poiché le variazioni dell'energia cinetica nel senso della progressione sono sostenute dall'energia potenziale, il loro massimo valore è dettato dal peso del corpo del soggetto. Nel caso estremo di assenza di gravità il peso del soggetto si riduce a zero, e la marcia è resa necessariamente impossibile.

Né si può rimediare a questo inconveniente, come è stato suggerito da alcuni, caricando il soggetto con dei pesi: infatti aumentando la massa aumenta proporzionalmente anche la richiesta energetica per lo spostamento nel senso della progressione: soltanto un aumento del peso che avvenga per un aumento della forza gravitazionale, e non della massa, può essere utile a questo fine.

In conclusione, la marcia sulla superficie lunare è così poco redditizia ai fini della progressione, che bisognerà ricorrere ad un altro sistema di progressione, ad esempio a quello della corsa.

La corsa differisce dalla marcia soprattutto per il fatto che mentre in quest'ultima l'energia per la spinta nella direzione della progressione è fornita dall'energia potenziale del corpo che cade, nella corsa è fornita direttamente dalla componente orizzontale della spinta del piede contro il suolo. Nella corsa questa spinta ha una direzione verso l'alto e l'avanti, e la componente verticale ha un valore pressappoco uguale al peso corporeo, qualunque sia la velocità di progressione, mentre la componente orizzontale è tanto maggiore, quanto maggiore è la velocità. A valori elevati di velocità cioè la direzione di questa forza si allontana sempre di più dalla verticale, e l'angolo formato con l'orizzontale diminuisce progressivamente, fino a raggiungere un valore minimo di circa 45 gradi nella corsa molto rapida che implica una forte accelerazione, quale quella che si ha all'inizio di una gara veloce.

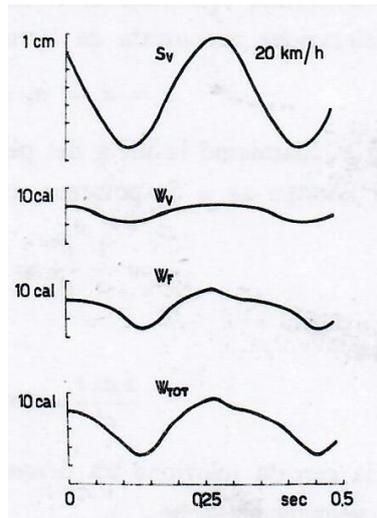


Fig. 5. - Curve della componente verticale del centro di gravità del corpo,

S_v , e dell'energia potenziale, W_v , cinetica, W_k , e totale, W_{TCyr} , durante un passo, nella corsa a 20 km/h: stesse indicazioni che per la fig. 4.

La scala per W è 10 cal per divisione, per S_v i era per divisione (da CAVAGNA, SAIBF.NE e MARGARIA, 1964).

Un angolo minore, e cioè una spinta maggiormente diretta verso l'avanti, non è possibile, perché il piede slitterebbe sul suolo: è questa la ragione dell'uso delle scarpe chiodate nelle corse veloci in gara: aumenta così il coefficiente di attrito del piede contro il suolo.

Che l'energia potenziale aumenti contemporaneamente all'energia cinetica è dunque una caratteristica sostanziale della corsa: la spinta è unica, e quindi non ci può essere trasformazione di una forma di energia nell'altra, come nella marcia (fig. 5).

L'uovo che rotola su un piano non costituisce un modello accettabile di questo tipo di esercizio: la corsa può piuttosto essere paragonata a quello della progressione di una palla elastica che rimbalza.

Nella corsa il centro di gravità del corpo non viene mai portato al di sopra del punto in cui si trova quando l'individuo è fermo in posizione eretta: l'individuo cioè non salta: tuttavia rimane per un istante sospeso nell'aria perché, essendo le gambe piegate, i piedi non toccano il suolo.

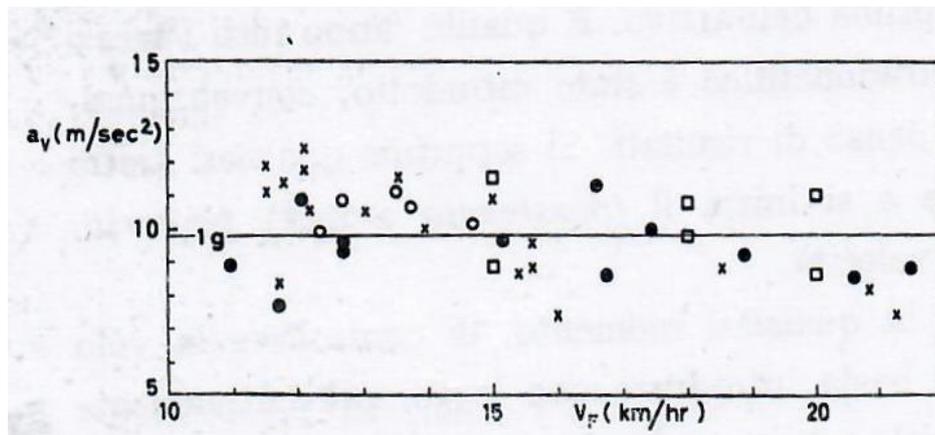


Fig. 6. - Valori medi della componente verticale dell'accelerazione alla quale è sottoposto il centro di gravità del corpo ad ogni passo (a_v) in funzione della velocità di corsa.

La linea è stata disegnata al valore di accelerazione uguale all'accelerazione terrestre ($C \approx i$). La componente verticale della forza impressa dal piede non varia in misura apprezzabile con la velocità di corsa, e ciò indica che il soggetto esercita una forza minima, e perciò la più economica, in tutte le condizioni (da MARGARIA e CAVAGNA 1964).

È quindi soggetto dalla forza di gravità ad una accelerazione verso il basso, e appena il piede anteriore tocca il suolo, questo movimento viene trasformato in uno spostamento verso l'avanti per l'azione delle leve scheletriche.

Per poter parlare di salto, occorrerebbe che la componente verticale della spinta ad ogni passo non fosse uguale al peso corporeo, come si è detto sopra, e come risulta chiaramente dalla fig. 6, ma superiore: è questa una condizione indispensabile perché il centro di gravità del corpo venga sollevato.

Se immaginiamo un uomo che corra sulla superficie lunare, la componente verticale della forza esercitata dal piede contro il suolo sarà ridotta ad un sesto, ed anche il costo energetico per questa attività sarà corrispondentemente ridotto. Il tempo impiegato in ogni passo, d'altra parte, soffrirà delle stesse limitazioni di cui si è detto per ciò che riguarda la marcia; esso sarà cioè aumentato sensibilmente, mentre la lunghezza del passo, che è legata alle dimensioni anatomiche del corpo, sarà la stessa che sulla terra. In altre parole, la frequenza dei passi sarà sensibilmente ridotta, ed è stato calcolato che essa non potrà essere superiore a 160 per minuto se il terreno è compatto, e di 100 per minuto se il coefficiente di attrito del piede col suolo è molto basso: (fig. 8) nella corsa a massima velocità sulla terra invece una frequenza di passi di circa 300 per minuto può essere facilmente raggiunta. Nelle condizioni più ottimistiche, la massima velocità che può essere raggiunta nella corsa sulla superficie lunare sarà di 8-10 km/hr (fig. 7).

Anche la corsa si rivela quindi un meccanismo poco redditizio per la progressione, e per raggiungere una velocità più elevata bisognerà ricorrere ad un terzo meccanismo, che è quello della *progressione per salti*. Questo non è possibile sulla terra, perché la forza muscolare necessaria per questo tipo di esercizio non è sufficiente. Sulla luna invece, pur non essendo aumentata la potenza muscolare, è fortemente ridotta la resistenza, e cioè il peso del corpo: il rapporto potenza/resistenza

è quindi aumentato di circa 6 volte sulla luna. L'uomo si potrà comportare là come sulla superficie della terra si comportano i canguri e le cavallette.

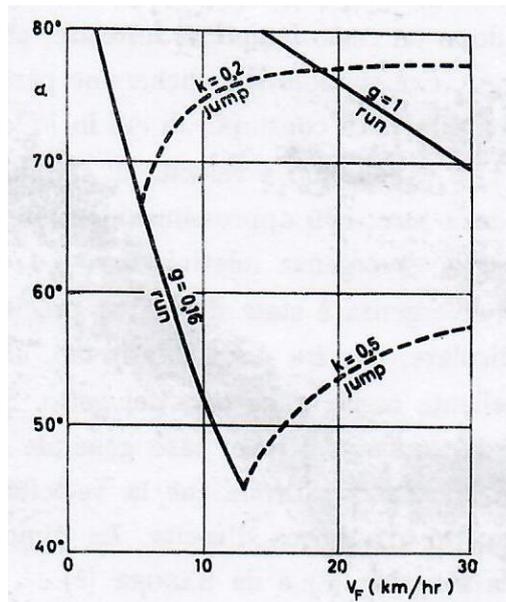


Fig. 7. - L'angolo α formato dalla direzione della spinta del piede con l'orizzontale ad ogni passo è posto in funzione della velocità media di progressione V_F .

La linea $G = 1$ è costruita sulla base di dati sperimentali, la linea per $G=0,16$ (superficie lunare) è calcolata. Ad una velocità di progressione maggiore di quella indicata dall'origine delle linee tratteggiate sulla curva a sinistra, la corsa, come è definita convenzionalmente, non è più possibile, e la progressione non può avvenire che a salti (linea tratteggiata); l'angolo di spinta del piede allora aumenta con la velocità di progressione. Le due linee tratteggiate sono state calcolate a partire da due differenti valori di coefficienti di attrito del suolo lunare col piede (μ), come indicato.

Anche il salto però avrà una durata molto maggiore che sulla superficie della terra, e questo costituisce un limite alla frequenza dei salti, e quanto più potente sarà la spinta, tanto maggiore sarà il tempo che esso richiede. D'altra parte, quanto maggiore sarà la spinta, tanto maggiore sarà l'aderenza del piede contro il suolo, e tanto maggiore potrà quindi essere la componente orizzontale della spinta, e quindi la velocità massima di progressione (fig. 8).

Purtroppo non è possibile sottoporre ad un vaglio sperimentale sufficientemente rigoroso le considerazioni sopra esposte. Tentativi in questo senso sono stati eseguiti, ma relativamente con poco successo. I metodi impiegati a questo fine sono sostanzialmente tre:

a) nel volo parabolico a convessità verso l'alto la forza centrifuga ha una direzione opposta a quella dell'accelerazione di gravità, ed è possibile così ridurre la forza di accelerazione risultante alla quale si è normalmente

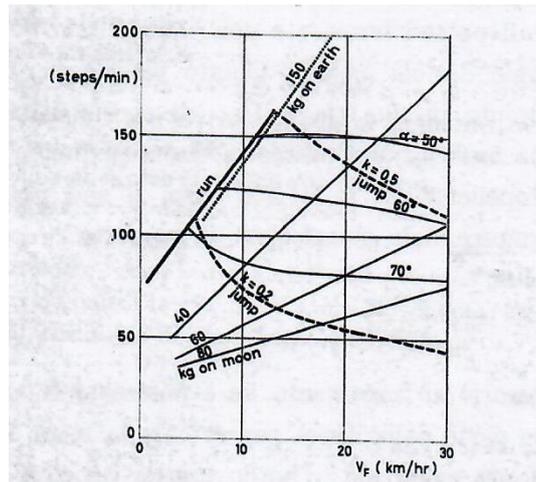


Fig. 8. - Frequenza dei passi nella corsa sulla superficie della terra in funzione della velocità di progressione (linea spessa continua).

La stessa funzione vale anche per le condizioni della superficie lunare fino alle massime velocità di progressione indicate dalla origine delle linee tratteggiate. La frequenza dei passi nella corsa aumenta con l'aumentare della velocità, nella progressione a salti invece diminuisce con la velocità. Sono indicate anche le linee iso-spinta (forza esercitata dal piede, espressa in kg) che indicano la forza media totale esercitata dal piede ad ogni passo sulla superficie terrestre (la singola linea punteggiata), e risp. sulla superficie lunare (linee continue sottili diritte). Sono indicate anche le linee iso-angolo di spinta valide soltanto per la progressione sulla superficie lunare.

sottoposti: ma questa situazione non può durare che alcune decine di secondi, anche disponendo di aerei molto veloci;

b) Si può opporre alla forza di gravità quella di una forza che agisca verso l'alto, applicando al soggetto una molla o un pallone ad idrogeno che sostenga opportunamente il peso del soggetto. Questo sistema ha l'inconveniente che la forza deve necessariamente essere applicata al centro di gravità del corpo, e questo non è possibile, perché il centro di gravità del corpo non è fisso, ma si sposta continuamente col movimento degli arti e del tronco: si stabilisce allora una coppia di forze, che tende a far ruotare il corpo alterandone profondamente la statica, e sollecitando delle reazioni posturali di tale entità da rendere inattendibili i risultati sperimentali. D'altra parte con questo sistema la forza viene applicata soltanto al tronco del soggetto e non agli arti, i quali, considerati indipendentemente, pesano come di norma;

c) un ultimo sistema per ovviare alle forze di accelerazione è quello suggerito alcuni anni or sono (1953, 1958) dell'immersione in acqua [9, 10, 11]. È noto a tutti come sia difficoltosa la progressione per mezzo della marcia sul fondo marino, tanto che è preferita, perché molto più redditizia, la locomozione a mezzo del nuoto. Nei tentativi di camminare in queste condizioni infatti, i movimenti risultano lentissimi, e la lentezza viene di solito attribuita alla viscosità del mezzo: in effetti la caduta del corpo in avanti, e dell'arto che avanza, avviene lentamente non tanto per la viscosità del mezzo, quanto perché è insufficiente la forza che promuove la caduta. Ed anche in questo caso, per aumentare la componente orizzontale del movimento, il soggetto cerca di assumere una posizione molto inclinata verso l'avanti: la stessa posizione il soggetto assumerebbe qualora si trovasse sul suolo lunare.

Anche l'immersione in acqua non può costituire un metodo di studio del tutto attendibile: non è possibile infatti graduare la riduzione della gravitazione, poiché per simulare le condizioni della gravitazione lunare bisognerebbe immergersi in un fluido che abbia una densità di circa 0,9: d'altra parte la viscosità del fluido non permetterebbe movimenti o spostamenti che hanno luogo ad una velocità elevata, quali quelli che si hanno nel salto o anche nella corsa quando sia raggiunta una condizione di equilibrio nella progressione.

Nella discussione che precede non si è tenuto conto di un fattore che è stato recentemente descritto [4] e che si è rivelato di grandissima importanza nel meccanismo della corsa. Correndo sulla superficie della terra, quando alla fine del passo il corpo cade sul suolo, i muscoli dell'arto che sopportano l'urto vengono stirati, essendo essi in stato di contrazione: l'energia potenziale e cinetica del corpo viene così parzialmente accumulata nel muscolo sotto forma di *energia elastica*, che viene restituita come energia cinetica immediatamente dopo, all'inizio del prossimo passo quando il muscolo, accorciandosi, esercita la spinta contro il suolo. L'energia per questa spinta proviene quindi non soltanto dalla contrazione muscolare attiva, ma per una buona parte, circa il 40%, dalla energia elastica accumulata. Non appare possibile che sulla Luna possa essere utilizzata questa forma di energia per la progressione, perché data la lentezza dei movimenti, intercorre troppo tempo tra la fase di allungamento e quella di accorciamento del muscolo, e l'energia elastica viene nel frattempo dissipata in calore [12]. Perciò l'energia richiesta per la locomozione sulla Luna sarà certamente maggiore di quella che può essere calcolata da semplici considerazioni sulle modificazioni indotte dalla ridotta gravità.

Si è preso in considerazione finora soltanto il problema del mantenimento della velocità. Un altro problema molto importante è quello della *accelerazione del corpo* nella fase iniziale della progressione. Alla partenza di una corsa veloce, la frequenza dei passi sulla superficie terrestre può essere di 300 ed oltre per minuto: essa sarà molto minore, sulla Luna per le ragioni dianzi dette, e l'accelerazione del corpo sarà quindi corrispondentemente minore. Nella corsa dei cento metri in gara, che vengono coperti in circa 10 secondi, la velocità massima di progressione viene raggiunta entro 4 secondi (30-40 metri). Se un ugual numero di passi è necessario sulla Luna per raggiungere la velocità limite, la distanza di cento metri non sarebbe neppure sufficiente per raggiungere la velocità massima.

I prossimi giochi olimpici avranno luogo a Città del Messico, che è a 2400 m sul livello del mare, e dove la densità dell'aria è sensibilmente meno di quella che è a livello del mare: per questa ragione, e cioè per la minor resistenza dell'aria, il record di 10 secondi per percorrere 100 metri sarà probabilmente abbassato. Ma se i giochi dovessero un giorno aver luogo sulla Luna, malgrado la mancanza assoluta di atmosfera, questo tempo sarà certamente aumentato molto sensibilmente per la diminuita forza gravitazionale!

Quanto è stato precedentemente esposto non considera la necessità da parte dell'astronauta che atterri sulla Luna di vestire uno scafandro a tenuta stagna, che necessariamente limita i movimenti e altera sostanzialmente la meccanica della progressione. Si tratta però di un aspetto tecnico del problema che interessa il fisiologo solo marginalmente.

Infine, a proposito della struttura del suolo lunare, si è partiti dal presupposto che esso sia compatto, consistente come sulla terra, e che lo strato di polvere di cui, con ogni verosimiglianza è rivestito, sia sottile soltanto quanto basta per diminuire il coefficiente di attrito del piede contro il suolo. In effetti non mi pare improbabile che il bombardamento di meteoriti sul suolo lunare protrattosi per miliardi di anni, o altri eventi intrinseci al satellite, quali eruzioni vulcaniche ecc., possano aver ricoperto la superficie della luna con uno strato di polvere di spessore molto maggiore, ad esempio di parecchi metri, nel quale l'astronauta eventualmente affonda completamente. Questo è reso tanto più possibile dalla mancanza sulla Luna di acqua allo stato liquido, che è quella che sulla terra scioglie e cementa le particelle di cui è costituito il terreno, trasformandolo in una massa compatta. Naturalmente in questa condizione sarebbero rese meccanicamente impossibili sia la marcia, che la corsa, che la progressione a salti, e bisognerà allora ricorrere ad altri sistemi di progressione, quali ad esempio quelli che sono stati escogitati sulla terra dalle popolazioni alpine per progredire nella neve morbida, (sci, racchette ecc.).

È comunque prematuro per il fisiologo interessarsi di problemi di questo genere prima che vengano forniti dati precisi sulle condizioni fisiche del suolo lunare.

BIBLIOGRAFIA.

- [1] R. MARGARIA, Sulla fisiologia e specialmente sul consumo energetico della marcia e della corsa a varie velocità ed inclinazioni del terreno, «Acc. Rend. Naz. Lincei», ser. VI, 7. (1938).
- [2] R. MARGARIA, P. CERRETELLI, P. AGHEMO and G. SASSI, Energy cost of running, «J. Appi. Physiol. », 18, 307 (1963).
- [3] G. CAVAGNA, F. SAIBENE and R. MARGARIA, External work in walking, « J. Appi. Physiol. », 18, i (1963).
- [4] G. CAVAGNA, F. SAIBENE and R. MARGARIA, Mechanical work in running, « J. Appi. Physiol. », 19, 249 (1964).
- [5] O. FISCHER, Methodik der speziellen Bewegungslehre, Tigerstedf s Handbuch der Physiol. Meth II 1, 188-208 (1911).
- [6] W. O. FENN, Work against gravity and work dtte to velocity changes in running, «Am. J. Physiol. », 93, 433, 462 (1930).
- [7] R. MARGARIA and G. CAVAGNA, Human Locomotion in subgravity, «Aerospace Medicine», 35, 1040 (1964).
- [8] G. CAVAGNA e R. MARGARIA, La meccanica della marcia e Vattività muscolare richiesta nelle singole fasi del passo, «Rend. Acc. Naz. Lincei», ser. Vili, 38 (1965).
- [9] R. MARGARIA, La condizione di subgravità e la sottrazione dell'effetto delle accelerazioni, «Riv. Med. Aeron.», 16, 469 (1953).
- [10]R. MARGARIA, T. GUALTIEROTTI and D. SPINELLI, Resistenza alle alte accelerazioni di animali immersi, in acqua, «Rend. Acc. Naz. Lincei >. ser. Vili, 22, fase. 6 (1957).
- [11]R. MARGARIA, Wide Range Investigations of acceleration in man and animals, 4th annual Bauer Lecture, « J. Av. Med. », 29, 855 (1958).
- [12]R. MARGARIA, G. A. CAVAGNA e F. P. SAIBENE, Possibilità di sfruttamento deWelasticità del muscolo contratto durante Vesercizio muscolare, «Boll. S.I.B.S.», 39, 1815 (1963).

PRESIDENTE SEGRE. - Mi compiaccio vivamente col Collega Margaria per la sua brillante interessantissima conferenza e domando se vi sono osservazioni o questioni da porre al conferenziere.

Intervento sulla relazione del prof. R. Margaria.

LEONARDI. - Mi sto occupando da qualche tempo della geologia lunare e credo di poter confermare l'impressione del prof. Margaria sull'esistenza di uno strato di materiali incoerenti almeno in qualche zona della superficie lunare. Ritengo quindi che effettivamente si determinino condizioni tutt'altro che favorevoli per poter camminare e soprattutto correre sulla Luna. L'osservazione delle stupende fotografie dei *Rangers* americani mostra caratteri morfologici tali da rendere estremamente probabile che la superficie lunare sia ricoperta in certe zone delle cosiddette «terre» da questo strato di materiali incoerenti, che dovrebbe rendere la locomozione alquanto difficile. Credo poi anche che la presenza di questo strato detritico non dipenda soltanto dalla caduta di bolidi ma anche e soprattutto dalla attività vulcanica, cui ritengo dovuta buona parte dei crateri lunari. La formazione di questo strato detritico è probabilmente dovuta anche alla notevolissima differenza di temperatura che c'è sulla superficie lunare tra le ore diurne e quelle notturne, la quale dà certamente origine a rilevanti fenomeni termoclastici. Non essendoci poi corsi d'acqua che trasportino i materiali detritici così derivati, questi dovrebbero restare sulla superficie lunare in condizioni analoghe a quelle dei deserti sabbiosi e ghiaiosi terrestri.