

Pietro Enrico di Prampero

*Professore di Fisiologia Umana, Facoltà di Medicina,
Università degli Studi di Udine*



I LIMITI DELL'UOMO NELLO SPORT. RUOLO DEI GRANDI SISTEMI ORGANICI

1. Introduzione

Uno dei metodi usati più di frequente quando si vogliono studiare i limiti della prestazione umana nello sport è l'analisi dell'evoluzione storica dei record (Fig. 1 e Tab. 1). Questo perché i record sono in effetti il limite della prestazione umana in un dato momento storico e inoltre in quanto essi costituiscono una serie di misure estremamente accurate, che si estendono su parecchi decenni. Non stupisce quindi che lo studio dei record abbia attirato da sempre l'attenzione dei fisiologi all'energetica del lavoro muscolare (6, 9). L'evoluzione storica dei record viene per lo più studiata interpolando i record stessi, posti in funzione della data in cui furono stabiliti, con una funzione continua. I coefficienti della funzione vengono determinati con metodi oggettivi (statistici), la scelta del tipo di funzione (lineare, esponenziale, ecc.) è, invece, entro certi limiti arbitraria e prescinde, in genere, da qualsiasi implicazione fisiologica. Ne segue che l'estrapolazione delle funzioni in questione nel passato, o nel futuro, conduce a previsioni prive di senso. Ad esempio, una funzione lineare, quale quella indicata in Fig. 1, implica un continuo costante aumento della velocità record sul miglio al passare degli anni. La stessa funzione, estrapolata nel passato, alla nascita di Cristo, indica una velocità (negativa) di ben -56.5 km/h.

Esempi paradossali di questo tipo si potrebbero moltiplicare ad abundantiam e non inficiano certo la validità dell'approccio statistico per la previsione, nel prossimo futuro, dell'andamento dei record. Questi esempi sono qui usati soltanto per sottolineare che un'analisi statistica, del tipo di quella qui presa brevemente in esame, nulla può dire sui meccanismi fisiologici che stanno alla base dei record e che quindi non può essere ragionevolmente utilizzata per inferirne i limiti della prestazione umana nello sport.

Nelle pagine che seguono cercherò di mettere in evidenza come esiste, invece, la possibilità di analizzare in termini fisiologicamente significanti le massime prestazioni atletiche in alcuni settori dello sport e come questa analisi, pur non potendo essere utilizzata

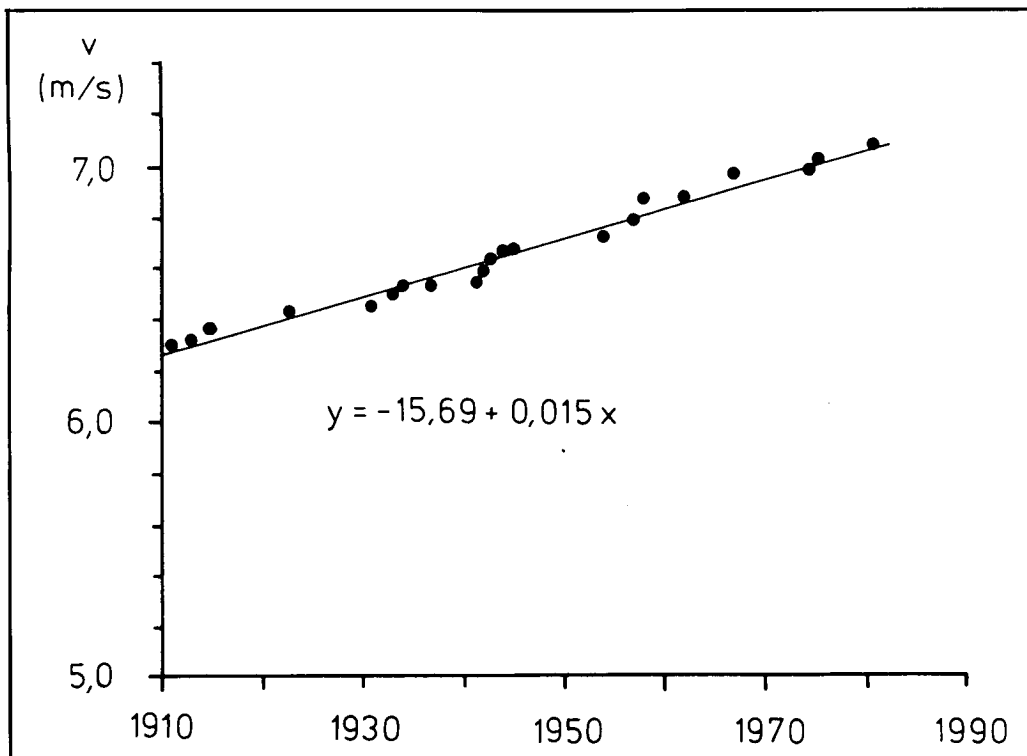


Fig. 1 – Velocità media (m/s) del record mondiale del miglio (1609.3 m) in funzione dell'anno in cui il record fu stabilito, per il periodo 1911-1981. La regressione lineare tra le due variabili ($y = -15.69 + 0.015x$; $r^2 = 0.966$; $n = 21$) è stata calcolata con il metodo dei minimi quadrati.

Tabella 1

Distanza (m)	Record 1986	Record "Definitivo"	Δ %
100	9"93	9"15	8.5
800	1'41"73	1'32"96	9.4
1.500	3'29"45	3'04"15	14.5
5.000	13'00"40	11'22"87	14.3

Record attuali, "definitivi", e loro differenze percentuali, secondo R.H. Morton (8). I record "definitivi" (R) sono stati calcolati interpolando i record effettivi (r) fino al 1983 secondo l'eq.:

$$r = R + a \cdot e^{-bt}$$

dove T è l'anno dell'era cristiana in cui il record è stato stabilito, a e b sono costanti ed e è la base dei logaritmi naturali. La barriera dell'1% dal "Record Definitivo" sarà raggiunta fra il 2187 e il 2254 della nostra era.

per predire l'evoluzione dei record, sia invece estremamente utile per tentare di identificare i potenziali fattori limitanti la prestazione umana.

2. Il costo energetico della locomozione

Ai fini della discussione che segue, mi limiterò a considerare sport come la corsa, o il nuoto in cui: a) unico criterio di valutazione della prestazione sia la velocità, b) le condizioni di gara siano standardizzate in alto grado e c) la progressione sia interamente frutto dell'attività metabolica dei muscoli.

È intuitivamente evidente, e altrove lo ho dimostrato in modo formalmente rigoroso (1, 3, 4), che, in attività come queste, la velocità massima è determinata dal rapporto fra la massima potenza muscolare sostenibile per tutta la durata della gara (E_{max}) e il costo energetico della locomozione (C):

$$v_{max} = E_{max}/C \quad (1)$$

dove C è il dispendio energetico necessario a coprire un km (o un metro) di percorso. [Ad esempio, se conformemente al Sistema Internazionale d'Unità, la potenza metabolica E_{max} è espressa in Watt (cioè in joule/secondo) e il costo energetico C in joule/metro, la velocità risulterà data in metri/s]. Le velocità massime calcolate a partire dall'eq. 1 sono in accordo molto soddisfacente con le attuali velocità dei record mondiali della corsa piana per distanze dagli 800 ai 10.000 metri (Fig. 2). Un accordo meno buono, ma comunque probante, si ottiene anche quando si trattino, secondo l'eq. 1, altri sport quali il nuoto (stile libero) o il pattinaggio di velocità su ghiaccio (Fig. 2). Senza entrare nei dettagli di un'analisi che andrebbe al di là degli scopi di questo scritto e che, d'altronde, ho già trattato in altre sedi (1, 3), le velocità massime teoriche sono ottenute mettendo al numeratore dell'eq. 1 la massima potenza muscolare che un atleta di élite può sviluppare per un tempo pari a quello della prova (eq. 2); al denominatore della stessa equazione si metterà il valore di costo energetico determinato, per lo sport in questione, su atleti di élite e alla velocità appropriata. E' quindi evidente che i dati numerici calcolati a partire dall'eq. 1 e riportati in Fig. 2: 1) sono penalizzati dalla variabilità delle misure di E_{max} e C e 2) rappresentano valori medi per gruppi d'atleti. Mentre è chiaro che quest'ultimo punto potrebbe venire a cadere qualora si disponesse dei valori di E_{max} e di C su un singolo atleta, la variabilità inerente alle misure biologiche preclude l'uso dell'eq. 1 per la previsione delle prestazioni individuali o medie in un dato evento sportivo. Tengo a sottolineare che quest'impos-

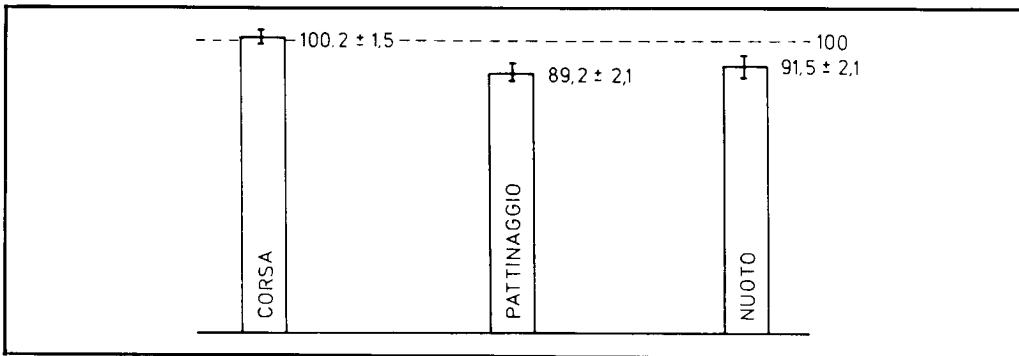


Fig. 2 – Velocità massima teorica, espressa in percentuale della effettiva velocità record, per la corsa piana (800; 1.000; 1.500; 5.000 e 10.000 metri), il pattinaggio di velocità su ghiaccio (1.000; 1.500; 3.000; 5.000 e 10.000 metri) e il nuoto stile libero (100; 200; 400 e 1.500 metri). Valori medi ± 1 deviazione standard. La linea orizzontale sottile (100) indica l'identità tra velocità teoriche ed effettive.

sibilità di previsione deriva dalla differenza di vari ordini di grandezza fra la precisione del cronometro del giudice di gara e l'accuratezza delle misure biologiche. Basti sottolineare, a questo proposito, che l'attuale primato dei 5000 m di corsa piana (13'00"40, S. Aouita, 29 luglio 1985) è di solo 1 centesimo di secondo inferiore al primato precedente appartenente all'inglese Moorcroft. Ciò rappresenta una differenza di 1 parte su 78'040, ossia dello 0,0013%. Chi scrive non è in grado di valutare se misure di questo livello di precisione, applicate alla corsa a piedi, abbiano un reale significato atletico: alla velocità media in questione ($6,41 \text{ m s}^{-1}$), la distanza percorsa in 1 centesimo di secondo è di 6,41 cm (!). È chiaro comunque che le misure fisiologiche in laboratorio, afflitte come sono, nel migliore dei casi, da un errore del $\pm 3\%$, almeno in un prevedibile futuro, non raggiungeranno il livello di precisione dei rilievi di tempi e distanze delle prestazioni sportive in gara. Un semplice calcolo dimostra infatti che, se l'errore di una singola misura cade entro il 3% dal "vero valore", per ridurre l'incertezza di misura allo 0,0013% come era il caso discusso in precedenza, è necessario eseguire circa 5 milioni di misure (!) e farne la media.

Indipendentemente da queste considerazioni, l'accordo osservato fra i record del mondo e le velocità massime teoriche calcolate sulla base dell'eq. 1 (Fig. 2) mi sembra garanzia sufficiente della validità di quest'ultima. I limiti della prestazione negli sport qui presi in considerazione dipenderanno quindi, da un lato dalla massima potenza muscolare dell'atleta, dall'altro dal costo energetico (e quindi dalla "tecnica") della locomozione. Passerò ora a discutere del primo dei due fattori considerati.

3. La massima potenza muscolare

La massima potenza metabolica che un atleta di élite può sostenere per tutta la durata della prova è funzione del tempo di esaurimento (t). Per esercizi al cicloergometro, la funzione che lega E_{\max} a t , indicata in Fig. 3, è descritta da (10):

$$E_{\max} = A + Bt^{-1} - At(1 - e^{-t/T})t^{-1} \quad (2)$$

dove A è la massima potenza aerobica (massimo consumo di O_2) e B la massima quantità di energia che può essere liberata dalla completa utilizzazione delle riserve anaerobiche (lattacide e alattacide). Il terzo termine deve essere introdotto per tener conto del fatto che il massimo consumo di O_2 non è raggiunto in modo istantaneo all'inizio della prova, ma secondo una cinetica esponenziale la cui costante di tempo (T), a livello muscolare, è dell'ordine di 10 s. L'importanza relativa dei tre termini che contribuiscono a determinare E_{\max} (eq. 2) dipende dal tempo di esaurimento; per $t > 8 \text{ min}$, il 90% o più di E_{\max} è determinato dal massimo consumo di O_2 (Fig. 3). Quindi, nonostante l'indubbio peso degli altri due termini dell'eq. 2 nelle prove di breve durata, sembra legittimo affermare che il massimo consumo di O_2 è uno dei fattori preponderanti che stabiliscono i limiti delle prestazioni umane nello sport. Ciò, ripeto, attraverso il suo contributo determinante al termine E_{\max} dell'eq. 1. Una delle ragioni del continuo miglioramento delle prestazioni sportive nel corso degli anni va quindi cercato nel progressivo aumento del massimo consumo di O_2 degli atleti che partecipavano alle competizioni. Ciò, a sua volta, può essere attribuito a diverse cause che non sono in grado di valutare in dettaglio quali: 1) la selezione degli sportivi su gruppi sempre più larghi della popolazione stessa, 2) il continuo progresso delle tecniche di allenamento e 3) il miglioramento delle condizioni economiche, e di conseguenza igienico sanitarie, della popolazione. Come vedremo oltre, alcuni di questi fattori intervengono anche per quel che riguarda l'altro fattore che determina la prestazione sportiva, il costo energetico.

4. I limiti

Se passiamo ora ad un altro livello di indagine possiamo chiederci quale sia (o quali siano) il (o i) meccanismo (i) fisiologico (i) da cui dipenda il massimo consumo di O_2 . Quest'ultimo ($VO_2\max$) è una misura globale ed integrata di tutti quei meccanismi che presiedono al trasporto dell' O_2 dall'ambiente esterno (aria atmosferica) fino alla sua utilizzazione all'interno degli organi (i mitocondri) a ciò deputati a livello muscolare. I meccanismi in questione sono: a) la ventilazione polmonare, b) la diffusione dell' O_2 dagli alveoli polmo-

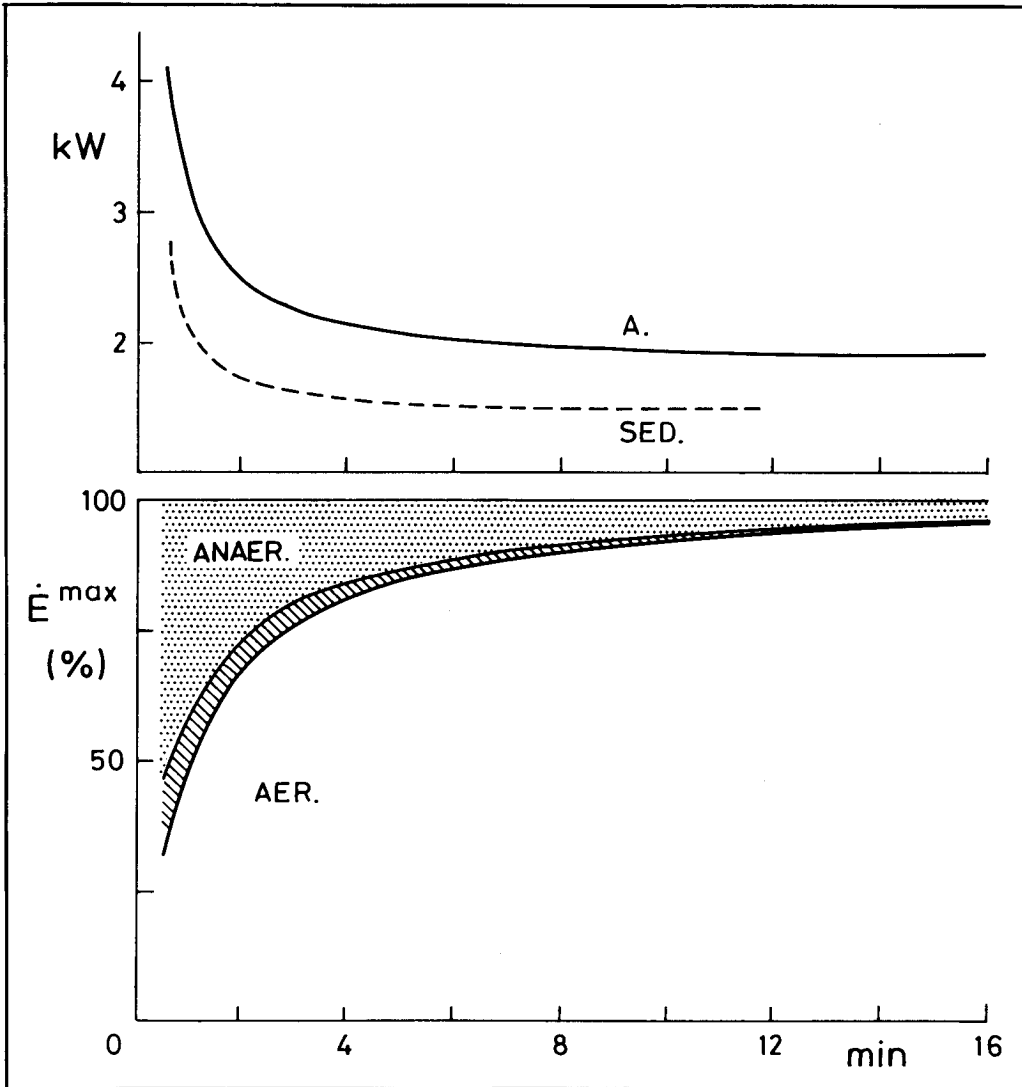


Fig. 3 – Potenza metabolica massima (kW) sostenibile per il tempo indicato sull'ascissa per un atleta di élite (A) e un soggetto sedentario (SED). Il pannello inferiore indica il contributo relativo delle fonti energetiche aerobiche (AER) e anaerobiche (ANAER). Se il consumo di O_2 all'inizio del lavoro si adattasse al fabbisogno energetico in modo istantaneo, il contributo delle fonti aerobiche sarebbe maggiore (curva superiore dell'area tratteggiata). (Da 3).

nari al sangue dei capillari polmonari, c) il legame dell'O₂ con il suo vettore (l'emoglobina), d) la concentrazione dell'emoglobina nel sangue, e) la capacità del cuore di pompare sangue ossigenato ai muscoli, f) la vascularizzazione dei muscoli, g) la diffusione dell'O₂, dei capillari muscolari ai mitocondri e, da ultimo, h) la capacità dei mitocondri d'utilizzare l'O₂. Numerosissimi sono gli studi dedicati a indagare quale dei meccanismi elencati sia il fattore limitante di VO₂max. La mia opinione personale, discussa in modo analitico altrove (2) è che, per esercizi come la corsa, il nuoto, o il ciclismo, ecc., che coinvolgono la quasi totalità delle masse muscolari, il VO₂max sia determinato all'80% circa dalla capacità del cuore di pompare sangue ossigenato alla periferia, che a sua volta risulta dal prodotto della massima gittata cardiaca per la concentrazione ematica di emoglobina. Il restante 20% è distribuito circa in parti eguali tra la perfusione dei muscoli e la capacità dei mitocondri di utilizzare l'O₂. In termini quantitativi, ciò significa che se fosse possibile raddoppiare la massima capacità del cuore di pompare sangue ossigenato alla periferia (ad es. raddoppiando la massima gittata cardiaca, mantenendo la concentrazione emoglobinica invariata, o viceversa), allora il VO₂max del soggetto aumenterebbe del 67%. Invece, se si raddoppiasse la capacità dei mitocondri di consumare O₂, mantenendo tutti gli altri fattori invariati, il VO₂max aumenterebbe solo del 5%.

Per esercizi con piccoli gruppi muscolari invece (un solo arto, ad esempio), il ruolo della massima capacità del cuore di pompare sangue ossigenato alla periferia, si riduce, in termini di fattori limitanti, al 50%, mentre i due fattori periferici summenzionati si spartiscono equamente il restante 50%.

Va infine sottolineato che l'analisi che precede si riferisce esclusivamente a soggetti sani, a livello del mare.

Ritornando all'eq. 1, è evidente che, a parità di potenza metabolica massima, l'atleta più economico, cioè dotato di un minore valore di C, otterrà una prestazione migliore. C è quindi l'altro fattore, che insieme alla massima potenza metabolica, condiziona il risultato sportivo, almeno in quelle forme di locomozione di cui ci stiamo occupando in questa sede. Nelle poche righe che seguono cercherò di riassumere le nostre conoscenze sulla variabilità interindividuale di C e sulle sue cause.

Nelle forme di locomozione naturali (marcia e corsa) o biomeccanicamente semplici come il ciclismo, la variabilità interindividuale di C, espressa come coefficiente di variazione rispetto alla media, è dell'ordine del $\pm 8\%$. Per quel che riguarda la corsa, le ragioni della variabilità interindividuale di C sono piuttosto oscure. Alcuni autori ritengono che alla base di questa differenza stia il diverso recupero di energia elastica, a sua volta dovuto alla diversa composizione del muscolo in fibre lente o rapide (C. Bosco, comunicazione personale, 1986). Anche cose così ovvie come l'effetto del tipo e del peso delle scarpe sul costo energetico della corsa sono a tutt'oggi ancora quasi completamente ignorate (P.E. di Prampero, Sport e Medicina, 1987 in corso di stampa). Altrettanto dicasi della spesso invocata e mai dimostrata riduzione del costo energetico della corsa con l'allenamento. Il costo energetico della corsa sembra, almeno attualmente, una caratteristica individuale innata difficilmente modificabile. Ciò è sostenuto anche dall'osservazione che il valore medio di C dei fondisti di élite è sostanzialmente lo stesso di quello dei "corridori della domenica" (4).

A differenza della corsa, nel nuoto l'effetto della tecnica è molto marcato, potendosi osservare differenze anche del 40% del valore di C fra nuotatori di élite e nuotatori di buono ma non eccellente livello (Fig. 4). Anche se non esistono studi specifici sull'argomento, è ipotizzabile che il pattinaggio di velocità sia, da questo punto di vista, più simile al nuoto che alla corsa.

L'intervento tecnico sugli strumenti usati dall'atleta durante la locomozione ha in alcuni casi, effetti clamorosi sul costo energetico e quindi sul risultato sportivo. Basti men-

ciali ha determinato nelle prestazioni ciclistiche. Tale miglioramento è dovuto alla riduzione della spesa energetica contro la resistenza dell'aria che, nel ciclismo in piano alla alte velocità, rappresenta il 90% del dispendio totale (5). Altri esempi in questa direzione, anche se meno eclatanti, sono l'uso di materiali speciali per le piste d'atletica o di tessuti che riducono al minimo la resistenza del mezzo (aria e acqua).

Mi sembra inutile moltiplicare gli esempi in questo senso dato che tutti quelli che si potrebbero ancora invocare condurrebbero alle stesse conclusioni: aumento della prestazione grazie alla riduzione del termine C dell'eq. (1).

Per concludere questo paragrafo, possiamo chiederci quali siano le strategie da seguire per ottenere la minimizzazione del termine C e quindi la massimizzazione della prestazione. Possiamo indicarne alcune:

- 1) Indagini conoscitive al fine di identificare i parametri biomeccanici che influenzano C nelle varie forme di locomozione qui considerate.
- 2) A seguito di queste indagini, se conclusive, si potranno impostare programmi di allenamento adeguati, tendenti a minimizzare C nel singolo atleta.

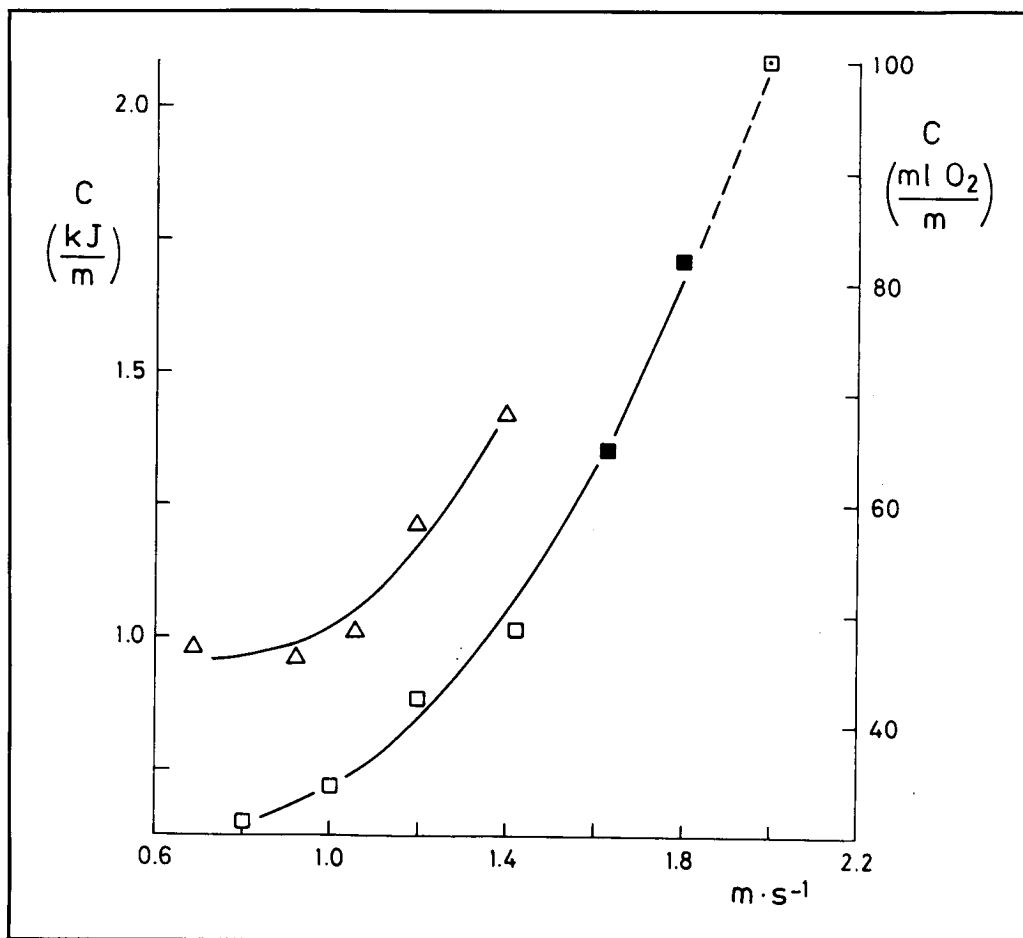


Fig. 4 – Costo energetico del nuoto a crawl (kJ m^{-1} o $\text{ml O}_2 \text{m}^{-1}$) per un soggetto di 70 kg e 175 cm in atleti di élite (quadrati) e "college swimmers" (triangoli). (Da 1).

Oltre a questi programmi specifici si potranno impostare studi epidemiologici su vasti strati della popolazione giovanile al fine:

- 3) di identificare gli individui (se esistono) spontaneamente dotati di caratteristiche tecniche innate particolarmente favorevoli (nella corsa ad esempio) o di capacità di apprendimento del gesto atletico particolarmente buone.

Oltre a queste strategie va naturalmente potenziata la ricerca tecnica sui materiali, come indicato in questo stesso volume dal gruppo di Dal Monte.

5. Conclusioni

In molte forme di locomozione umana (marcia, corsa, nuoto, ciclismo, pattinaggio di velocità) la prestazione massima è determinata dalla potenza metabolica massima dell'atleta, divisa per il costo energetico della locomozione alla velocità in questione (eq. 1). L'estremo limite della prestazione sportiva sarà quindi raggiunto quando il massimo possibile valore di questo rapporto sarà stato ottenuto. Previsioni temporali e quantitative in questo senso sono attualmente al di fuori della nostra portata, o poco convincenti. È comunque possibile affermare che la potenza muscolare massima (E_{max}) dell'atleta dipende in larga misura, per prove di durata superiore a 8 minuti, dal suo massimo consumo di O_2 , a sua volta limitato essenzialmente dalla capacità del cuore di pompare sangue ossigenato ai muscoli in attività. Dal canto suo, il costo energetico della locomozione (C) dipende da fattori puramente tecnici in alcuni sport (essenzialmente il ciclismo), o di tipo più direttamente legato alla biomeccanica del gesto atletico in altri. Questi fattori sono a tutt'oggi mal conosciuti. Strategie possibili per spingere ancora più in là il limite sono: 1) indagini conoscitive volte a determinare quantitativamente gli aspetti biomeccanici che determinano il costo energetico; 2) applicazione di queste indagini all'allenamento, al fine di minimizzare, nel singolo atleta il valore di C , massimizzando al contempo E_{max} ; infine, 3) studi epidemiologici tendenti ad identificare i soggetti naturalmente dotati su ambedue i piatti della bilancia (potenza metabolica massima e costo energetico).

Bibliografia

- 1) DI PRAMPERO P.E., La locomozione umana su terra, in acqua, in aria. Fatti e teorie. Edi-Ermes, Milano, 1985.
- 2) DI PRAMPERO P.E., Metabolic and circulatory limitations to VO_{2max} at the whole animal level, *J. Exp. Biol.* 115: 319-331, 1985.
- 3) DI PRAMPERO P.E., The energy cost of human locomotion on land and in water, *Int. J. Sports Med.* 7: 55-72, 1986.
- 4) DI PRAMPERO P.E., ATCHOU G., BRÜCKNER J-C., MOIA C., The energetics of endurance running, *Eur. J. Appl. Physiol.* 55: 259-266, 1986.
- 5) DI PRAMPERO P.E., CORTILI G., MOGNONI P., SAIBENE F., Equation of motion of a cyclist, *J. Appl. Physiol.* 47: 201-206, 1979.
- 6) LLOYD B.B., Energetics of running: an analysis of the records, *Adv. Sci. (Lond.)* 22: 515-530, 1966.
- 7) MOGNONI P., LAFORTUNA C., RUSSO G., MINETTI A., An analysis of world records in three types of locomotion, *Eur. J. Appl. Physiol.* 49: 287-299, 1982.
- 8) MORTON R.H., The supreme runner. What evidence now? *Aust. J. Sports Sci.* 3: 7-10, 1983.
- 9) RYDER H.W., CARR H.J., HERGET P., Future performance in Footracing, *Sci. Am.* 234: 108-119, 1976.
- 10) WILKIE D.R., Equations describing power input by humans as a function of duration of exercise, in Cerretelli P., Whipp B.J. (a cura di): *Exercise Bioenergetics and Gas Exchange*, Amsterdam, Elsevier/North Holland, 1980, pp. 75-80.