

Bilanci energetici dell'esercizio fisico

Pietro Enrico di Prampero

Dipartimento di Scienze e Tecnologie Biomediche,
Università degli Studi di Udine

Le fonti energetiche della contrazione muscolare

In prima approssimazione, il muscolo può essere considerato una macchina che trasforma energia chimica in lavoro meccanico. Questa trasformazione ha luogo durante la contrazione muscolare, ed è iniziata e mantenuta dagli impulsi nervosi che arrivano al muscolo attraverso il suo nervo motore.

La sorgente energetica immediata per la contrazione muscolare è l'idrolisi dell'ATP. Tuttavia, la concentrazione dell'ATP nel muscolo è piuttosto limitata (5-6 mmoli/kg), sufficiente al massimo per poche contrazioni. Ne segue che, per un'attività muscolare di qualche durata, l'ATP deve essere ricostituito alla stessa velocità con cui può esso essere utilizzato. Ciò può avvenire attraverso vari percorsi biochimico anaerobici (idrolisi della fosfocreatina (PCr), trasformazione del glicogeno, o del glucosio, in lattato) o aerobici (ossidazione completa di glicogeno, glucosio, acidi grassi liberi, corpi chetonici, etc).

Ne segue che il termine "fonti energetiche della contrazione muscolare" designa un gruppo abbastanza eterogeneo di sostanze, al cui interno si possono facilmente identificare almeno tre sottogruppi.

- 1) Sostanze che possono essere utilizzate direttamente per la contrazione.
- 2) Sostanze che possono essere utilizzate solo indirettamente, tramite sostanze del gruppo 1.
- 3) Sostanze che, oltre ad essere utilizzate solo indirettamente, hanno bisogno della presenza di ossigeno. Mentre l'ATP appartiene senza ambiguità al gruppo 1 ed i lipidi al gruppo 3, il glicogeno sarà assegnato al gruppo 2 o 3 a seconda se venga trasformato anaerobicamente in lattato od ossidato completamente a CO_2 ed acqua. In senso stretto la PCr dovrebbe essere assegnata al gruppo 2, in quanto la sua utilizzazione non può prescindere dalla presenza dell'ATP; tuttavia, dato che la PCr tiene il passo con l'utilizzazione dell'ATP, e data la somiglianza termodinamica tra le due sostanze, è conveniente assegnarla al gruppo 1.

Il vantaggio essenziale di questa classificazione un pò schematica (in realtà, in qualsiasi tipo di esercizio, le fonti energetiche appartengono a più di uno dei gruppi suindicati) è che la massima potenza diminuisce dal gruppo 1 al gruppo 3, mentre la massima capacità (massima quantità di energia disponibile) aumenta dal gruppo 1 al gruppo 3. (Per una trattazione più approfondita di questo tipo di argomenti, si veda di Prampero, 2000⁷).

Il bilancio energetico

In qualsiasi processo chimico, si definisce variazione di energia chimica (ΔU) la differenza fra il contenuto energetico dei prodotti ed il contenuto energetico dei reagenti:

$$\Delta U = \text{Energia Prodotti} - \text{Energia Reagenti}$$

Di conseguenza ΔU ha segno negativo se nel corso della reazione si ha liberazione di energia, nel qual caso, ovviamente, il contenuto energetico dei prodotti sarà minore di quello dei reagenti.

La presenza di una "macchina" adeguata (il muscolo nel nostro caso) permette di trasformare una parte di ΔU in lavoro, mentre la parte restante è degradata in calore. Si noti anche che un'azione dell'energia liberata, trascurabile nel caso della contrazione muscolare, può essere assorbita dalla macchina stessa (ad esempio per variazioni di volume o pressione all'interno del sistema).

Tralasciando i dettagli termodinamici, per cui si rimanda, ancora una volta, a di Prampero, 2000⁷, quanto riassunto sopra ci dice che, per potere redigere un bilancio di un

qualsivoglia esercizio fisico è necessario, da un lato conoscere l'energia metabolica spesa dal soggetto, dall'altro il lavoro meccanico prodotto e il calore liberato nel corso dell'esercizio. La misura di queste due variabili (calore e lavoro) è spesso indaginosa sul piano pratico, e complessa su quello concettuale. Questi problemi possono essere evitati quando si conosca il costo energetico che un dato esercizio fisico richiede. In questo caso la somma di lavoro e calore, potrà essere sostituita, ai fini del bilancio energetico, dal costo energetico dell'esercizio che andrà quindi paragonato all'energia totale spesa dal soggetto. Scopo di quanto segue è di dimostrare come questo tipo di argomentazioni possa essere applicato alla corsa piana e quali ne siano le considerazioni teorico pratiche che se ne possono dedurre.

Il costo energetico della corsa

Il costo energetico della corsa è la quantità di energia che il soggetto deve spendere per compiere un percorso



Tabella 1

Costante k, costo non aerodinamico \pm 1 deviazione standard e costo totale per un soggetto di 70 kg e 175 cm di statura.

k [J s ² /m ³ per m ²]	C _{na} \pm D.S [J/(kg m)]	C [per 70 kg; 175 cm]
0,40	3,80 \pm 0,30	265 + 0,72 v ²

La costante k è espressa per m² di superficie corporea, a 760 mm Hg di pressione barometrica e 20 °C di temperatura; v è la velocità rispetto all'aria in m/s.

unitario. Il costo energetico è quindi una misura dell'economia della progressione: esso è tanto minore quanto più economico il soggetto ed è del tutto analogo a quello che, per un'automobile, è il consumo di benzina per 100 km. In genere il costo energetico (C) è espresso al netto del consumo di riposo e per unità di massa trasportata: nel Sistema Internazionale di unità, in J/(kg m) o in kJ/(kg km). In fisiologia o in medicina, il dispendio energetico è calcolato a partire da misure di consumo di O₂ per cui è spesso pratico esprimere C in ml O₂/(kg m). Quando si tenga conto che il consumo di 1 litro di O₂ nell'organismo umano sviluppa circa 5 kcal (4,19 kJ) è possibile trasformare tutte queste unità le une nelle altre, la scelta essendo dettata unicamente da motivi di praticità.

Il costo energetico totale è la somma del dispendio contro la resistenza dell'aria (Costo aerodinamico, Ca) e di quello contro le forze non aerodinamiche (Costo non aerodinamico, C_{na}): sollevamento/abbassamento ed accelerazione/decelerazione del centro di massa ad ogni passo, lavoro interno, consumo dei muscoli respiratori e del cuore. Ca aumenta con il quadrato della velocità rispetto all'aria (v), per cui:

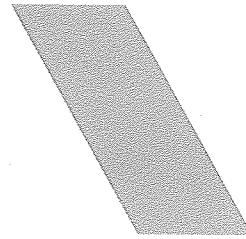
$$C = Ca + C_{na} = k v^2 + C_{na1}$$

dove tutti i termini sono espressi per unità di distanza e dove k è una costante di proporzionalità che dipende dalla superficie proiettata sul piano frontale, dalla densità dell'aria e dalla forma del corpo in movimento. (Per i valori numerici e le dimensioni delle grandezze che appaiono nell'equazione 1, si veda la Tabella 1.) A velocità di corsa = 20 km/h, Ca è = 7% del costo totale, a velocità superiori Ca aumenta fino ad

un massimo del 30% circa per velocità dell'ordine di 35-38 km/h. Poiché C_{na} è praticamente indipendente dalla velocità, il costo totale (C) può essere considerato costante, almeno in prima approssimazione fino a velocità di circa 20 km/h, ossia su tutto l'ambito delle velocità aerobiche.

Nel soggetto adulto, C, espresso per kg di massa corporea, è indipendente dall'età, dal sesso e dalla massa corporea (anche se alcuni dati recenti sembrano suggerire che esso sia leggermente inferiore nei soggetti di grandi dimensioni): nella corsa in piano, a velocità costante e su terreno compatto, esso ammonta, in media a 3,8 kJ/(kg km), al netto del consumo di riposo (v. Tabella 1). Nei bambini, C è più elevato che nell'adulto e tende a diminuire progressivamente, fino a raggiungere il valore dell'adulto all'età puberale; questo valore è quindi mantenuto fino a tarda età. L'effetto dell'allenamento su C è tuttora alquanto discusso: alcuni autori hanno riportato valori inferiori negli atleti dediti a corse di fondo rispetto a soggetti sedentari o ad atleti dediti ad altre attività. Tuttavia nessuno studio longitudinale ha mai dimostrato una significativa riduzione di C con l'allenamento, così che non è possibile escludere fattori naturali preesistenti in quegli atleti in cui si è trovato un valore particolarmente favorevole.

Nei primi 15 km di corsa il costo energetico è sostanzialmente identico al valore osservato nei primi minuti. A partire da questa distanza, C aumenta in modo significativo, anche se molto moderato con la distanza (0,12% per km di percorso)¹. Alla fine di una maratona (42,195 km) quindi, l'aumento di C sarà straordinariamente ridotto, il 5% circa. Ciò significa che i



meccanismi di coordinazione neuromotoria della corsa sono così stabili che neanche la fatica accumulata nel corso della maratona riesce a modificarli in modo sostanziale.

Nei soggetti adulti, indipendentemente dalle loro caratteristiche atletiche, la variabilità interindividuale del costo energetico è piuttosto ridotta, del 8% circa (v. tabella 1). Tale variabilità non è affatto trascurabile dal punto di vista atletico: sulle lunghe distanze, ad esempio la maratona, essa può rendere ragione di differenze dell'ordine di una diecina di minuti tra due soggetti ipoteticamente eguali per tutte le altre caratteristiche.

Il bilancio energetico della corsa

Il prodotto del costo energetico per la velocità di progressione (v) è la potenza metabolica (l'energia metabolica per unità di tempo, E) che il soggetto deve sviluppare per procedere alla velocità considerata:

$$C \cdot v = E_2$$

dove, se C è in J/(kg m) e v in m/s, la potenza metabolica risulta in W/kg. Riarrangiando l'equazione 2, ed applicandola alle condizioni massimali:

$$v_{\max} = E_{\max} / C_3$$

è evidente che la velocità massima è data dal rapporto tra la potenza metabolica massima che il soggetto è in grado di sostenere ed il costo energetico a quella velocità.

Nelle corse di fondo: i) la potenza massima è funzione del massimo consumo di O₂ del soggetto e ii) il costo energetico è di fatto indipendente dalla velocità. L'equazione 3 diviene quindi:

$$v_{\max} = F \cdot VO_{2\max} / C_4$$

in cui v_{\max} indica appunto la massima velocità "di fondo" (dal termine inglese "endurance"), VO_{2max} è il massimo consumo di O₂ del soggetto, F (= 1) è la massima frazione di esso che può essere sostenuta durante tutta la durata della prova.

L'attendibilità dell'equazione 4 è stata valutata calcolando v_{\max} a partire da misure sperimentali individuali di VO_{2max}, C ed F su un gruppo di soggetti che avevano partecipato ad una competizione di maratona (42,195 km) o semimaratona (21,0 km). Si è così potuto paragonare v_{\max} con la velocità effettiva mantenuta durante la competizione. I risultati hanno dimostrato che: i) le

tre variabili F, VO_{2max} e C, combinate come nell'equazione 4, rendono ragione di oltre il 70% della variabilità interindividuale della massima velocità nelle prove di lunga durata e ii) velocità teorica e velocità effettiva non sono significativamente diverse⁵.

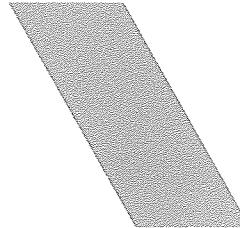
L'analisi illustrata sopra è stata estesa anche alle distanze di mezzo fondo (0,8-5,0 km)^{4,6}. In queste condizioni, data la breve durata della prova, le fonti energetiche anaerobiche contribuiscono in modo sostanziale al dispendio energetico. Inoltre, per tempi di gara tra 50 s e 15 min circa, la quantità di energia che può essere ottenuta dalle sorgenti anaerobiche è costante e massima. Di conseguenza, nelle prove brevi, il pacchetto di energia reso disponibile dalla completa utilizzazione delle fonti anaerobiche è utilizzato con una potenza elevata; nelle prove più lunghe invece l'energia di provenienza anaerobica è diluita su tempi lunghi e quindi il suo contributo alla potenza metabolica è ridotto in proporzione. Ne segue che la potenza metabolica massima effettiva che il soggetto è in grado di sviluppare durante la prova è tanto più elevata di VO_{2max}, quanto più il tempo di gara è breve; per tempi molto lunghi essa tende a VO_{2max}.

L'andamento della massima potenza metabolica (E_{max}) all'aumentare del tempo di esaurimento (te), per esercizi di durata compresa tra 50 secondi e 10 minuti circa può essere descritto dall'equazione seguente⁸:

$$E_{\max} = A_{\max} \cdot t e^{-1} + VO_{2\max} - VO_{2\max} \cdot k^{-1} (1 - e^{-k \cdot t e}) \cdot t e^{-15}$$

dove k è la costante di velocità con cui il consumo di O₂ raggiunge il valore massimo all'inizio della prova e A_{max} è la massima capacità anaerobica (espressa in consumo di O₂) data dalla somma della (massima) quantità di energia liberata dalla scissione dei fosfati altamente energetici più la (massima) produzione di acido lattico. Il terzo termine è dovuto al fatto che, all'inizio della prova, VO_{2max} non viene raggiunto istantaneamente: il suo peso, piuttosto ridotto, in percentuale di E_{max} varia da ~10 % per te ~45 s a ~1% per te ~15 min. Poiché A_{max} e k sono costanti e note (per soggetti giovani in buone condizioni di allenamento: 68 ml O₂/kg e 0.04 s⁻¹), quando si conosca VO_{2max}, l'equazione 5 permette di calcolare la relazione che lega E_{max} al tempo di esaurimento.

La potenza metabolica richiesta (Er) per coprire una determinata distanza (d) può essere espressa in funzione



del tempo di gara (t), sostituendo v , nell'equazione 2, con il rapporto tra la distanza e il tempo di gara ($v=d/t$):

$$Er = C \frac{d}{t_0}$$

dove C deve essere corretto sia per gli effetti della resistenza dell'aria (v. Tabella 1) che per l'energia spesa nella fase iniziale di accelerazione⁵.

Su una distanza data il soggetto non potrà, ovviamente, sviluppare una potenza (richiesta dalla velocità di corsa, Er) superiore alla massima potenza assoluta che il soggetto stesso è in grado di sviluppare (E_{max}). Quindi il tempo che, per una distanza data, rende eguali i due membri di sinistra delle equazioni 5 e 6 rappresenta il tempo record per il soggetto in questione sulla distanza data.

Da quanto finora esposto, appare evidente che la redazione del bilancio energetico della corsa consiste proprio nell'eguagliare l'equazione 6 (che rappresenta il costo della corsa, cioè l'output) con l'equazione 5 (che rappresenta l'effettiva disponibilità metabolica del soggetto, cioè l'input).

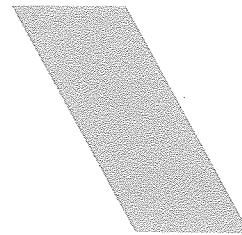
Le argomentazioni che precedono dimostrano anche che, quando si conosca il massimo consumo di O_2 , la massima capacità anaerobica ed il costo energetico della corsa del soggetto, le due equazioni 5 e 6 consentono di calcolare il suo tempo record su ogni distanza purché il tempo di gara sia compreso tra 50 secondi e 15 minuti. Solo in questa gamma di tempi infatti è possibile assumere con sufficiente approssimazione che l'utilizzazione delle riserve di energia anaerobica sia completa, da un lato, e dall'altro, che il consumo di O_2 sia mantenuto al valore massimo. I valori di t che risolvono l'eguaglianza $E_{max} f(t_e) = Er f(t)$ possono essere ottenuti per mezzo di procedure grafiche, o per mezzo di procedure computerizzate. I tempi record teorici, così ottenuti possono infine essere paragonati ai record individuali sulla distanza in oggetto.

I calcoli di cui sopra sono stati eseguiti su mezzofondisti di medio o alto livello^{4,6}. Si sono determinati i valori individuali di VO_{2max} e C , mentre la capacità anaerobica massima è stata assunta eguale ai valori riportati in letteratura. I migliori tempi teorici sono stati quindi paragonati alle migliori prestazioni ottenute dai soggetti nel corso della stessa stagione. Le due classi di tempi sono risultate molto simili. Per distanze tra 1 e 5 km, i tempi teorici erano in media più brevi, del 4.1% (\pm

6.8%; $n = 29$) e del 1.6% ($\pm 2.5%$; $n = 60$) negli atleti di medio o alto livello, ma non significativamente diversi, dai migliori tempi effettivi sulle stesse distanze. Inoltre, l'approccio brevemente descritto è stato recentemente applicato anche al ciclismo su pista ed al nuoto, con risultati egualmente soddisfacenti^{2,3}.

Questioni aperte

Il modello descritto, da un lato costituisce una descrizione appropriata dell'energetica della corsa piana, dall'altro permette di predire con sufficiente accuratezza le prestazioni individuali, quando si conoscano alcune caratteristiche fisiologiche del soggetto. A questo proposito vorrei sottolineare come il margine di errore in-sito nelle misure fisiologiche faccia sì che l'accuratezza di previsione delle prestazioni individuali sia ancora lontana dall'essere soddisfacente sul piano atletico. In effetti, l'utilità del modello sta più nel fornire una descrizione analitica coerente dell'energetica della corsa che nella possibilità, che pure esso offre, di predire le prestazioni individuali. Va inoltre sottolineato che, verosimilmente, l'accordo tra record teorici ed effettivi potrebbe migliorare ulteriormente se tutte le variabili fisiologiche che appaiono nelle equazioni in questione fossero misurate individualmente. Negli studi citati infatti ci si era limitati a determinare i valori individuali di VO_{2max} e di costo energetico, assumendo un valore medio di capacità anaerobica massima (An_{max}), nel caso della corsa veloce, o della frazione di VO_{2max} che il soggetto è in grado di sostenere per tutta la durata della gara (F), nel caso della corsa di fondo. Come discusso in maggior dettaglio nei lavori citati, questo modo di procedere, pur inficiando solo minimamente, l'accordo medio tra record teorici ed effettivi, ne aumenta la dispersione, riducendo quindi inevitabilmente l'accuratezza delle previsioni individuali. Le misure sperimentali dirette di An_{max} e di F , tecnicamente abbastanza semplici, sono tuttavia indagini e tediose, sia per lo sperimentatore che per il soggetto. È auspicabile che lo sviluppo, nel prossimo futuro di metodi semplici e accurati di misura di queste grandezze ne renda meno ostico l'uso dei valori individuali nelle equazioni 5 e 6. Infine, in questa sede mi sono limitato a considerare



l'energetica della corsa dagli 800 m piani alla maratona. Le distanze più brevi infatti pongono altri due difficili problemi. Infatti, per tempi inferiori a 50 s circa, l'utilizzazione delle riserve anaerobiche non è completa. La misura di questa variabile diviene quindi estremamente critica, anche perché il suo peso sulla potenza metabolica totale (espresso dal primo termine dell'equazione 5) è tanto maggiore quanto più breve è la gara. Inoltre il costo energetico della corsa veloce è di difficile misura diretta, nè è facilmente estrapolabile

dalle velocità più basse, perché sia la resistenza dell'aria che il costo della fase di accelerazione vi giocano un ruolo sempre maggiore al diminuire della distanza ed all'aumentare della velocità.

Nonostante questi limiti, mi sembra di poter affermare che il modello dell'energetica della corsa discusso sopra consente di predire con sufficiente accuratezza le prestazioni individuali e che possa di conseguenza costituire un utile strumento nelle mani dell'atleta, allenatore, o del medico sportivo.

Bibliografia

1. Brueckner J.-C. et al., (1991) *Eur. J. Appl. Physiol.* 62: 385.
2. Capelli C., (1999) *Eur. J. Appl. Physiol.* 80: 298.
3. Capelli C., et al., (1998) *Med. Sci. Sports Exerc.* 30: 614.
4. di Prampero P.E., (1997) *Med. Sport* 50: 1-8.
5. di Prampero P.E. et al., (1986) *Eur. J. Appl. Physiol.* 55: 259.
6. di Prampero P.E. et al., (1993) *J. Appl. Physiol.* 74: 2318.
7. di Prampero P.E., (2000) in "Fisiologia e Biofisiologia medica", a cura di F. Baldissera, Poletto, Milano, p. 993.
8. Wilkie D., (1980) in "Exercise Bioenergetics and Gas Exchange", a cura di P. Cerretelli e B.J. Whipp, Elsevier, Amsterdam, p. 75.

L'articolo è tratto dalla relazione al convegno "Allenamento della forza e transfer tecnico" (Gemona del Friuli, 20-21 ottobre 2001).