

ALCUNI ASPETTI FISIOLGICI DELL'ESERCIZIO MUSCOLARE

P. Mogroni

Io sono un po' confuso a dover parlare di fisiologia per questo Centro Studi, per due motivi: primo, perché il Prof. di Prampero che sostituisco ha già parlato a lungo dei problemi della fisiologia nella riunione precedente, e secondo, perché mi tocca parlare dopo il Prof. Benzi il quale ha riferito di esperienze che sono durate due anni e mezzo, io riferisco di esperienze che sono durate una settimana più tre giorni di lavoro a tavolino.

I contatti tra i fisiologi e gli allenatori ed atleti sono assai frequenti perché entrambe le due parti pensano di avere qualcosa da guadagnarci. Il fisiologo del lavoro ritiene che l'atleta sia un soggetto ideale per studiare gli adattamenti dell'organismo al lavoro muscolare. Questi studi permettono di arrecare contributi anche in campi diversi da quello tradizionale della Medicina dello Sport; ad esempio, nuove conoscenze vengono aggiunte alla medicina del lavoro industriale, alla medicina preventiva, alla medicina riabilitativa e alla fisiopatologia cardiorespiratoria e muscolare.

Da parte loro atleti ed allenatori richiedono in primo luogo ricette per migliorare le prestazioni sportive. Queste ricette possono riguardare argomenti assai diversi. Al fisiologo vengono frequentemente posti quesiti sui ritmi e le tecniche di allenamento, sulle diete, sulla biomeccanica dell'esercizio muscolare e sulla selezione degli atleti.

Ho pensato di limitare il mio intervento soprattutto all'illustrazione della tecnica, del significato e dei possibili sviluppi della valutazione fisiologica dell'atleta in relazione alle prestazioni che richiedono uno sforzo massimale e continuo per una durata superiore ai 10 min. In tale genere di attività il 90% o più dell'energia necessaria viene derivato da reazioni chimiche che richiedono immediato consumo di ossigeno mentre la scissione dell'ATP e del CP e la produzione di acido lattico forniscono meno del 10% dell'energia totale.

Tratterò quasi unicamente questo argomento per vari motivi. In primo luogo mi sembra costituisca un utile paradigma del modo di procedere del fisiologo. In secondo luogo, proprio in questo campo il centro al quale appartengo ha dato particolari contributi. In terzo luogo, infine, parte della mia attività attuale e un progetto di ricerca futura riguardano più o meno direttamente tale problema.

E' accettato da tutti che la determinazione del massimo consumo di ossigeno ($\dot{V}_{O_2}^{max}$) è il metodo più valido di valutazione nel fondista.

La figura 1 mostra i dati sperimentali ottenuti in un soggetto durante la determinazione del $\dot{V}_{O_2}^{max}$. Il soggetto compie sul rullo trasportatore

una serie di corse della durata di 4-5' a diversa velocità. Durante l'ultimo minuto si misura la frequenza cardiaca (punti pieni) e il consumo di ossigeno (punti vuoti). Come si vede, sia l'una che l'altro crescono più o meno regolarmente con la velocità sino a circa 14.5 km/h; in seguito

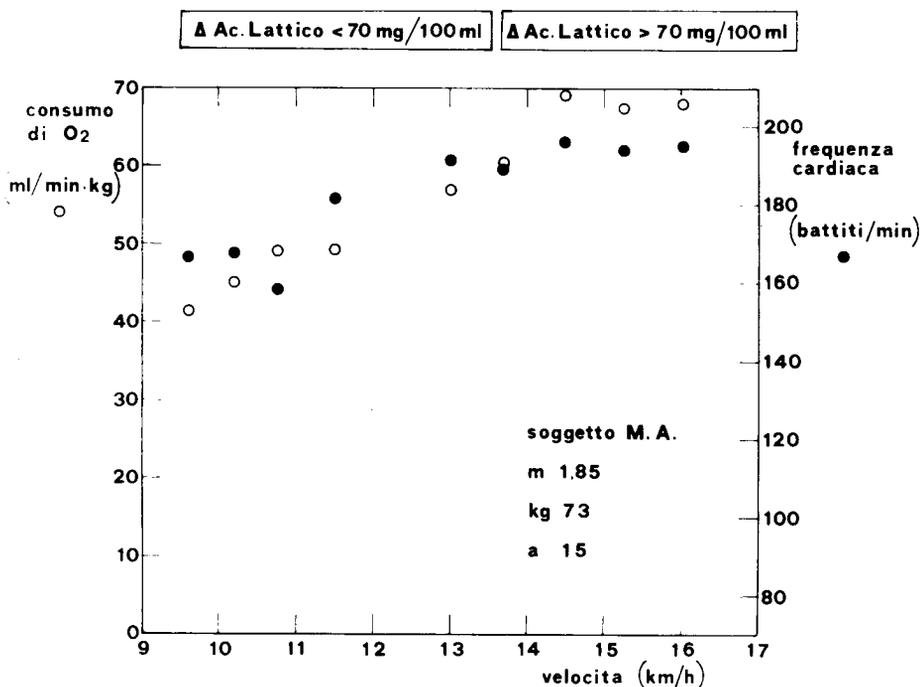


Fig. 1

restano costanti. In soggetti eccezionali questa velocità critica può essere anche superiore ai 20 km/h. Il consumo di ossigeno viene definito massimo quando i seguenti tre criteri si verificano:

- 1) ulteriori incrementi di velocità non provocano aumenti di consumo di ossigeno;
- 2) la frequenza cardiaca è massima;
- 3) le variazioni della concentrazione di acido lattico nel sangue sono superiori a 70 mg/100 ml in 4 min.

Vi è una relazione significativa tra $\dot{V}_{O_2}^{\max}$ e tempo minimo necessario a percorrere una certa distanza, come dimostra la figura 2 dove il $\dot{V}_{O_2}^{\max}$ è posto in funzione del tempo necessario per percorrere 10 miglia. I dati si riferiscono a 16 soggetti tutti in buono stato di allenamento. E' evidente che tanto maggiore è il $\dot{V}_{O_2}^{\max}$ tanto minore è il tempo necessario per percorrere 10 miglia ovvero tanto maggiore è la velocità.

Partendo dal $\dot{V}_{O_2}^{max}$ è possibile predire la massima velocità che può essere mantenuta per tempi prolungati o alternativamente il miglior tempo ottenibile su varie distanze.

E' noto infatti che in media occorre consumare circa 200 ml di O_2 per trasportare di corsa un kg del proprio peso corporeo per un km. Questo valore è detto costo per km e può essere considerato in prima approssimazione indipendente dalla velocità della corsa. Al contrario il costo per km cresce con la velocità di progressione nella marcia, nel nuoto e nel ciclismo. In altre parole il primo e l'ultimo arrivato della maratona consumano durante la corsa la stessa quantità di O_2 e

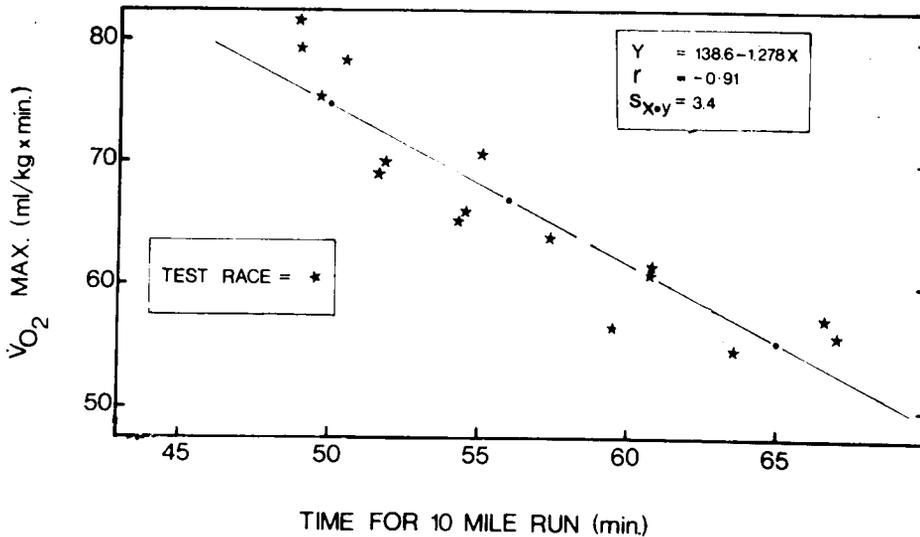


Fig. 2

bruciano la stessa quantità di glucidi e di lipidi. Al contrario se si percorrono 50 km in bicicletta a 50 km all'ora si consuma 3 o 4 volte più ossigeno che percorrendo la stessa distanza a 20 km/h.

Un individuo con 70 ml/min kg di $\dot{V}_{O_2}^{max}$ consuma 4200 ml/h kg. Se ogni km costa 200 ml egli dovrebbe essere in grado di correre a $4200/200 = 21$ km/h.

E' tuttavia opportuno porsi il problema di quanto accurata sia una tale predizione. Per prima cosa consideriamo l'accuratezza della misura del massimo consumo di O_2 . Secondo i vari autori, il coefficiente di variazione è compreso fra 3 e 5%. Secondo la mia esperienza è in media del 5% ma in qualche caso è sicuramente superiore. In termini statistici questo significa che il $\dot{V}_{O_2}^{max}$ e, di conseguenza la velocità da noi predetta sono in un caso su tre una sovrastima o una sottostima maggiore del 3 o 5% a seconda degli Autori. In un caso su 20 l'errore sarà maggiore del 6 o del 10%. I metodi indiretti di misura del $\dot{V}_{O_2}^{max}$ basati sulla misura della frequenza cardiaca durante la salita del gradino hanno un margine di errore più che doppio.

Se per fortunata ipotesi il $\dot{V}_{O_2}^{max}$ da noi misurato è uguale a quello reale, dobbiamo ora chiederci quale percento della massima potenza aerobica è utilizzabile durante corse prolungate. Anche la persona più allenata non può sfruttare completamente il proprio $\dot{V}_{O_2}^{max}$ per più di 10 min. Durante la corsa della maratona si sfrutta sempre meno del 90% del massimo consumo di O_2 secondo stime indirette. In altri tipi di esercizi prolungati come il ciclismo questo per cento è stato misurato direttamente ed è compreso tra 80 e 85%.

Le cause del deterioramento della prestazione con la durata della gara sono mal conosciute. E' incerto inoltre se l'allenamento aumenti la capacità di mantenere più a lungo il consumo di O_2 al livello massimo e se vi siano differenze intra e interindividuali di comportamento. Ovviamente anche questo elemento di incertezza deve essere tenuto presente quando si voglia trarre conclusioni pratiche dalla misura del $\dot{V}_{O_2}^{max}$.

Si è visto all'inizio che la massima velocità di corsa prolungata dipende essenzialmente dal rapporto tra $\dot{V}_{O_2}^{max}$ e il costo per km e kg. Si è parlato finora della variabilità della determinazione della massima potenza aerobica; passiamo ora a quella del costo per km.

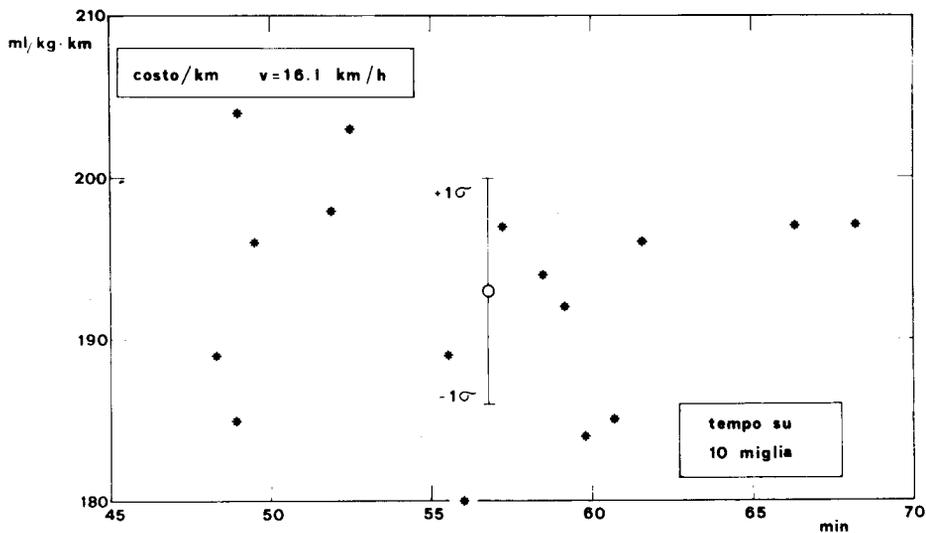


Fig. 3

La figura 3 riporta il costo per km, misurato alla velocità costante di 16.1 km/h, negli stessi soggetti riportati nella figura precedente. A sinistra i soggetti migliori con i tempi più bassi sulle 10 miglia. In termini di velocità anziché di tempo i soggetti migliori correvano a 20 km/h e i peggiori a 14.1. Due importanti considerazioni possono essere fatte su questi dati. In primo luogo, non sembra che i soggetti migliori spendano mediamente meno dei peggiori per percorrere un km. Non

sembra cioè che in questo gruppo di soggetti ben allenati alla corsa lo stile sia un elemento preponderante nel determinare la prestazione. Il secondo dato importante è la notevole variabilità del costo di un esercizio semplice come la corsa. Il coefficiente di variazione intorno al valore medio di 193 ml/kg km è del 3,6%. E' quindi ovvio che è molto pericoloso assumere un valore costante di costo per tutti i soggetti. Consideriamo il caso estremo dei due soggetti che hanno il secondo e il terzo tempo sulle 10 miglia. La differenza di costo fra questi due soggetti è dell'ordine del 10%: questo significa che se il soggetto che spende di più potesse imparare in qualche modo a spendere come il suo collega riuscirebbe a percorrere la distanza in un tempo inferiore del 10%.

La variabilità della misura del $\dot{V}_{O_2}^{max}$ e del costo per km collaborano nel rendere di dubbio valore una previsione della prestazione atletica sulla base di misure di laboratorio. Sono convinto che un cronometro e una pista siano il mezzo migliore per valutare un fondista e il suo grado di allenamento. La determinazione del $\dot{V}_{O_2}^{max}$ resta tuttavia importante per la selezione di soggetti giovani da avviare all'atletica.

Le informazioni contenute nell'ultima diapositiva, ampiamente confermate nel mio laboratorio, indicano una linea di ricerca che può avere notevoli applicazioni pratiche, come si cercherà ora di dimostrare.

Si è visto che trasportare di corsa un kg del proprio peso corporeo per un km costa circa 200 ml di O_2 . Circa il 50% dell'energia prodotta viene trasformata immediatamente in calore. A 20 km/h un uomo di 70 kg produce tanto calore quanto una lampadina di 600 Watt; questa considerazione rende conto dei notevolissimi problemi di dispersione del calore che si hanno durante la maratona.

Il restante 50% dell'energia prodotta viene utilizzata per compiere lavoro meccanico. Il lavoro meccanico viene diviso in esterno ed interno. Per lavoro meccanico esterno si intende il lavoro che si compie per sollevare ad ogni passo il proprio centro di gravità e quello che si compie per accelerare verso l'avanti il centro di gravità nella fase di spinta. Ad ogni passo noi spostiamo verso l'alto il centro di gravità di 6 cm. Compiamo un lavoro di 70 kg x 0,6 m ovvero di 4.2 kgm: lo stesso lavoro che si compie sollevando di un metro un peso di 4.2 kg. A 20 km/h tale lavoro viene ripetuto circa 200 volte in un minuto: solleviamo in un minuto 800 kg di un metro.

Meno facile è esemplificare il lavoro compiuto in senso antero-posteriore per accelerare il centro di gravità; conviene pensare al consumo e al relativo lavoro di una macchina che proceda a velocità costante e a quello di un'altra macchina che diminuisca la propria velocità media di circa l'8% per 200 volte in un minuto. Infatti durante la corsa la velocità non è costante ma ha un valore minimo immediatamente prima la fase di volo e massimo nel momento dello stacco. Questo lavoro nella corsa è superiore di circa il 70% rispetto al lavoro in senso verticale. Ogni minuto solleviamo di 1 metro più di 2 tonnellate.

Per quanto riguarda il lavoro interno, esso è dovuto in larga parte alle accelerazioni che gli arti subiscono rispetto al centro di gravità: immaginiamo un uomo seduto su un sellino da bicicletta che oscilli in

avanti e indietro gli arti alla stessa frequenza e con la stessa escursione come durante la corsa. Sorprendentemente il lavoro meccanico compiuto in questo modo è notevolissimo e fa raddoppiare il lavoro meccanico della corsa ad alta velocità. Dobbiamo infine ricordare il lavoro necessario per penetrare nell'aria che è tuttavia non superiore al 5-6% del totale nei fondisti. Complessivamente si compie quindi un lavoro di 4000 kgm/min.

A questo punto ritorniamo al costo di 200 ml di O_2 /km.kg; come abbiamo visto c'è qualcuno che consuma assai meno. Vediamo quali possono essere i motivi. E' possibile che venga compiuto lo stesso lavoro ma che il calore prodotto sia minore ovvero in termini fisici che il rendimento sia più alto. E' anche possibile che una delle due componenti del lavoro esterno o il lavoro interno possano essere minori. E' innegabile ad esempio che accelerare polpacci ipertrofici debba essere particolarmente costoso. Per chiarire questi punti è necessario misurare contemporaneamente il costo e il lavoro meccanico nei corridori. L'unica soluzione tecnicamente valida di questo problema è la misura di tutte le variabili necessarie durante corsa sul rullo trasportatore. Infatti, di norma il lavoro meccanico esterno viene misurato facendo passare l'atleta su piattaforme sensibili alle forze verticali, laterali e antero-posteriori; grazie ad una elaborazione matematica per mezzo di calcolatori si risale al lavoro esterno. Tutto ciò è stato fatto per la prima volta e, per quel che ne so io, non è stato rifatto altrove, dal prof. Cavagna e dai suoi collaboratori che lavorano presso il Centro del CNR al quale io appartengo.

Per fare tale genere di esperimenti occorre molta pazienza per raccogliere dati validi soprattutto perché è molto difficile ottenere velocità costanti durante il passaggio sulla zona sensibile e un corretto appoggio del piede su un'unica piattaforma. E' inoltre tecnicamente impossibile la misura contemporanea del consumo.

Lavorando su rullo trasportatore appoggiato su tre elementi sensibili alle forze, trasformando cioè il rullo in una piattaforma, i problemi tecnici sembrerebbero risolvibili. Un ulteriore passo sarebbe poi lo studio delle tecniche per diminuire il lavoro meccanico possibili solo se tale lavoro non è legato a fattori strutturali immodificabili.

Un progetto del genere è attualmente allo studio presso il mio laboratorio ma il costo minaccia di essere proibitivo.

Accennerò ora brevemente alle fonti anaerobiche di energia e alla possibilità della loro valutazione. Tali fonti sono la scissione del glicogeno sino ad acido lattico e la defosforilazione del CP e dell'ATP. La velocità di scissione del glicogeno è stata studiata osservando le variazioni di acido lattico durante esercizi di intensità superiore al $\dot{V}_{O_2}^{max}$ (vedi anche la relazione di di Prampero al precedente stage del centro studi).

In questo modo si è visto che la velocità di produzione di acido lattico ha un massimo e oltre a una certa intensità metabolica si mantiene costante. E' evidente l'analogia con il consumo di ossigeno. Dalle variazioni di concentrazione ematica nell'acido lattico è possibile risalire ai grammi di acido lattico prodotti dall'intero organismo e da questi all'interna energia prodotta. La massima quantità di energia che può essere prodotta nell'unità di tempo o potenza lattacida è nei soggetti

non atletici superiore a quella ottenibile coi processi aerobi. Tuttavia questa energia si esaurisce rapidamente ovvero ha una bassa capacità.

La potenza lattacida negli atleti non è stata ancora studiata, tuttavia a causa del notevole incremento di peso dei muscoli degli arti inferiori è da aspettarsi un aumento del 10-20%; al contrario il tempo di utilizzazione al regime massimo dovrebbe diminuire, perché dovrebbe essere raggiunto più rapidamente il livello massimo di acido lattico. L'acidificazione endocellulare dovuta alla produzione di acido lattico oltre un certo livello sembra inibire la scissione nell'acido lattico.

Per quanto riguarda i processi anaerobi alattacidi la loro potenza è ancora superiore a quella lattacida e il loro tempo di utilizzazione è ancora inferiore. La quantità di energia che si può trarre da questi processi è variabile essendo massima se lo sforzo sovramassimale inizia partendo da riposo. La potenza anaerobica dovrebbe aumentare negli atleti per gli stessi motivi per i quali aumenta la potenza lattacida, a causa cioè dell'aumento di peso dei muscoli degli arti. Non sembra infatti che, al contrario di quanto osservato negli animali, la concentrazione di CP e ATP nel muscolo aumenti con l'allenamento.

La massima potenza anaerobica è stata valutata con un metodo ingegnoso da Margaria e collaboratori, misurando la massima velocità di salita su una rampa di scale. Durante tale tipo di esercizio la potenza meccanica può essere calcolata moltiplicando il peso del soggetto per i metri saliti. L'energia totale impiegata viene ottenuta assumendo un rendimento del 25% ovvero assumendo che la quantità di calore prodotto sia pari a tre volte l'energia consumata. L'esercizio è tanto breve (meno di 6 secondi) da rendere trascurabile l'energia tratta nel metabolismo ossidativo e nella produzione di acido lattico. Il metodo non è privo di obiezioni sia perché trascura il lavoro interno che è notevole (come abbiamo visto), e sia perché la velocità di salita di una scala dipende non solo dalla potenza disponibile ma anche dalla destrezza dei movimenti.

Con questo metodo la potenza anaerobica degli scattisti è stata valutata essere superiore del 50% rispetto agli individui di pari età. Il tempo di utilizzo è probabilmente uguale negli atleti e nei soggetti normali mentre la capacità è maggiore negli atleti.

Per finire vi racconterò un esempio di ottima previsione di una prestazione atletica sulla base di determinazioni fisiologiche rigorosamente eseguite in laboratorio. Qualche anno fa Merckx, prima di partire per Città del Messico per battere il record dell'ora, venne nel laboratorio di Fisiologia di Milano per sapere se sarebbe riuscito nella sua impresa. In teoria i dati necessari per questa previsione erano i seguenti:

- 1) $\dot{V}_{O_2}^{max}$;
- 2) per cento del $\dot{V}_{O_2}^{max}$ utilizzabile per un'ora;
- 3) diminuzione del $\dot{V}_{O_2}^{max}$ provocato dall'alta quota;
- 4) lavoro meccanico necessario per vincere gli attriti sia tra le parti rotanti della bicicletta sia tra pneumatico e terreno;
- 5) lavoro meccanico necessario per vincere la resistenza dell'aria; tale lavoro è importantissimo nel ciclismo e diminuisce nettamente

con la quota. Tale lavoro è calcolabile solo conoscendo: a) la proiezione della sagoma del ciclista sul piano perpendicolare alla direzione di marcia, b) il coefficiente di aerodinamicità del ciclista, quel valore che la Citroen reclamizza per le sue vetture come C_x ;

- 6) la densità dell'aria a Città del Messico;
- 7) il lavoro meccanico interno nel ciclismo;
- 8) il rendimento con il quale possono essere prodotte le diverse componenti del lavoro meccanico totale.

Nei due pomeriggi concessi dagli organizzatori per le misure necessarie per predire il successo dell'atleta fu possibile determinare solo il $V_{O_2}^{max}$ al livello del mare e in condizioni di quota simulata in modo acuto, senza cioè poter prevedere l'effetto di una probabile acclimatazione. Tutti gli altri parametri furono tratti dalla letteratura o inventati grazie a considerazioni basate più sul buon senso che su dati scientifici. Nonostante questa incredibile sequenza di approssimazioni l'errore tra la velocità predetta e quella misurata 10 giorni più tardi a Città del Messico fu inferiore a 0,5%.

Con un po' di fortuna si può vincere al totocalcio o predire in laboratorio quello che succederà in pista.