

## GLI ADATTAMENTI CARDIO-EMATO-POLMONARI NEL LAVORO MUSCOLARE

di L. DONNO

Sembra oggi accertato che le manifestazioni vitali intese quali espressioni energetiche, e quindi anche quelle legate più propriamente al lavoro muscolare, derivino direttamente dalla trasformazione dell'energia chimica presente in composti organici contenenti fosfato altamente energetico, quale è l'adenosintrifosfato (ATP), attraverso una scissione di questo in adenosindisfosfato (ADP), adenosinmonofosfato (AMP) e fosfato. Sarebbe questa l'unica fonte di energia utilizzabile da tutti gli organismi viventi ai fini di produrre energia non solo meccanica (contrazione muscolare), ma anche di altra natura e comunque necessaria alla esplicazione dei fenomeni vitali.

L'energia proveniente da altre fonti non può essere utilizzata direttamente dal muscolo in attività e viene impiegata unicamente per la resintesi dell'ATP, la cui quantità contenuta nell'organismo è relativamente scar-

sa e costituisce una specie di corredo preconstituito e difficilmente aumentabile. La capacità di produrre energia, e di conseguenza lavoro, sarebbe pertanto assai scarsa se l'ATP non venisse continuamente e rapidamente resintetizzato.

Questa resintesi in realtà avviene, ed avviene a spese di reazioni esergoniche, cioè di reazioni chimiche che si compiono liberando energia, rappresentate dalla scissione del glicogeno in acido lattico e dalla ossidazione degli alimenti.

Mentre la prima di queste reazioni è anaerobica (ossia non necessita della presenza di ossigeno) e reversibile (ossia il glicogeno può essere ricostituito dall'acido lattico), la seconda è viceversa aerobica in quanto si accompagna a consumo di ossigeno ed è ovviamente irreversibile, fornendo in ultima analisi l'energia necessaria ai vari processi di resintesi citati (Fig. 1).

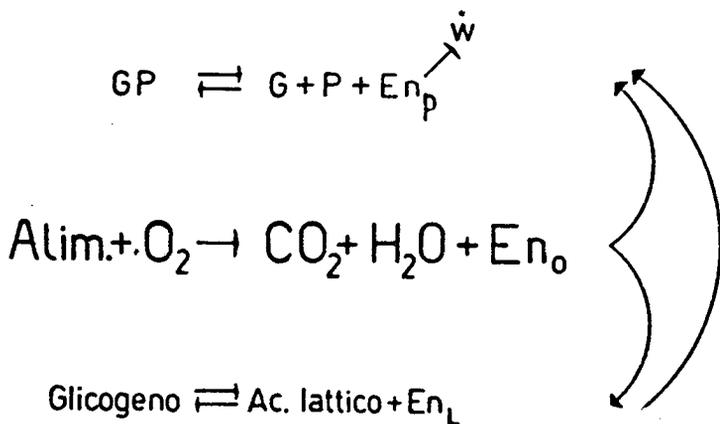


fig. 1

L'utilizzazione dell'ossigeno, dunque, pur non inserendosi direttamente, è in definitiva quella che fornisce l'energia necessaria all'espletamento dell'attività vitale in genere e dell'attività muscolare, e pertanto atletica, in particolare.

Il trasporto dell'ossigeno dal punto di riferimento, cioè l'ambiente atmosferico, al punto di utilizzazione, cioè i tessuti organici, insieme con il trasporto in senso contrario dell'anidride carbonica (che costituisce il metabolita ultimo delle ossidazioni energetiche) configurano la funzione respiratoria, la quale è una funzione abbastanza semplice nei suoi concetti essenziali ma straordinariamente complessa nelle sue intime modalità di estrinsecazione.

La funzione respiratoria non si esaurisce, come comunemente si intende, alla funzione del polmone, che è solo l'organo deputato alla ventilazione dell'aria, e quindi dell'ossigeno, dall'esterno all'alveolo; detta funzione respiratoria coinvolge evidentemente la funzione del sangue, che veicola l'ossigeno con l'ausilio di un particolare e favorevole legame chimico con

esso, e quella del cuore, che fornisce la spinta necessaria a che il sangue arrivi ai tessuti, ne depositi l'ossigeno necessario e ne prelevi l'anidride carbonica per trasportarla ai polmoni ed eliminarla all'esterno.

Vediamo ora di analizzare brevemente i vari momenti implicati nel processo respiratorio, i contributi ad esso portati dagli organi preposti, le modalità infine attraverso cui questi momenti e questi contributi si affermano.

Nella figura 2 la funzione, o meglio il ciclo respiratorio, è stato schematizzato nella sua più estrema semplicità proprio per metterne in evidenza a scopo didattico i punti essenziali.

Come si vede, l'alveolo rappresenta il punto di convergenza dei due sistemi, aereo ed ematico, dalla cui intima connessione anatomica e funzionale scaturisce l'essenza del fenomeno respiratorio a livello polmonare, ossia lo scambio gassoso tra la camera alveolare ed il sangue capillare che ne perfonde il setto: in altri termini, è giusto nell'alveolo che avviene l'assunzione di ossigeno e la ces-

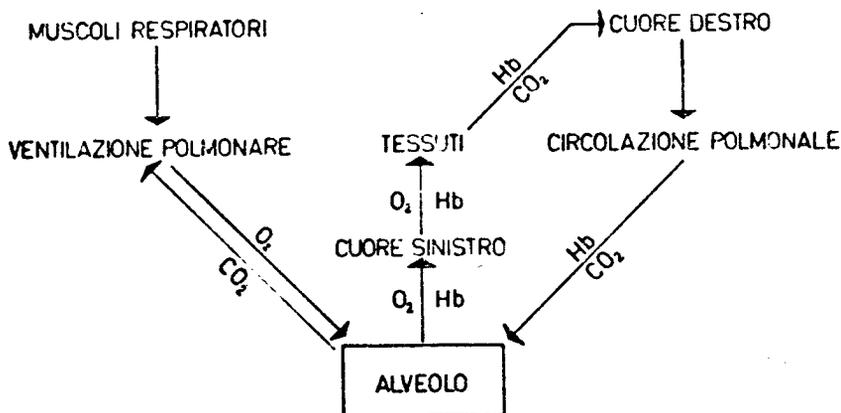


fig. 2

sione di anidride carbonica da parte del sangue. A livello dei tessuti si attua ancora uno scambio gassoso ma, naturalmente, in termini inversi: il sangue cede ossigeno ed assume anidride carbonica.

In termini fisici, i fattori che stanno alla base dei due sistemi, quello aereo e quello ematico, sono qualitativamente e fondamentalmente identici. In entrambi i casi, una forza muscolare (muscolatura respiratoria o muscolatura cardiaca) determina una differenza di pressione mediante la quale una massa fluida (gassosa o liquida) viene spinta attraverso un sistema di tubi (bronchi o vasi) vincendo determinate resistenze (elastiche e di attrito). L'unica differenza sotto questo punto di vista sta nel fatto che il movimento del sangue è unidirezionale e si svolge in circuito chiuso, mentre il movimento dell'aria è bidirezionale e comunicante con lo esterno.

I due sistemi, aereo ed ematico, sono separati nel loro punto di convergenza da una membrana, detta alveolo-capillare, che le molecole gassose

devono attraversare per raggiungere l'equilibrio; anche questa membrana costituisce naturalmente un ostacolo al passaggio delle molecole gassose. In conclusione possiamo dire che i meccanismi implicati nel trasporto dei gas dall'aria ambiente ai tessuti o viceversa devono superare una « serie di resistenze » che possiamo così individuare:

- A) Una resistenza di *ventilazione* interposta fra ambienti ed alveoli.
- B) Una resistenza di *diffusione* interposta tra aria alveolare e sangue capillare polmonare.
- C) Una resistenza di *circolazione* interposta tra ventricolo destro ed atrio sinistro e tra ventricolo sinistro ed atrio destro.

Diciamo subito che tali resistenze tendono ad aumentare nel lavoro muscolare perché, come vedremo, aumentano i flussi aereo ed ematico; fa eccezione fino ad un certo limite la resistenza di circolazione e soprattutto la resistenza di diffusione, la quale non solo non aumenta nel la-

voro muscolare ma sembra anche essere negli atleti sensibilmente inferiore a quella dei comuni soggetti.

Le esigenze di vita, intesa questa quale espressione energetica, sono quanto mai variabili potendo spaziare, com'è noto, dalle condizioni di metabolismo basale (o vita minima) alle condizioni di massimo impegno muscolare attraverso tutta una gamma di situazioni energetiche intermedie. E' evidente, da quanto abbiamo detto in precedenza, che il passaggio dalle condizioni di metabolismo basale alle condizioni di metabolismo energetico è condizionato da una richiesta muscolare maggiore di ossigeno e questa, a sua volta, può essere soddisfatta da un apporto maggiore di ossigeno reso possibile da una più intensa attività dei vari componenti del complesso sistema respiratorio. Entriamo dunque nel concetto di riserva respiratoria, esprimibile nelle sue tre componenti essenziali che sono, lo ripetiamo, quella ventilatoria, quella circolatoria, quella ematica.

Prima di addentrarci nella rapida illustrazione di queste tre componenti, diciamo subito che il passaggio dalle condizioni di riposo a quelle di lavoro muscolare comporta una serie di variazioni delle funzioni polmonare e cardio-vascolare. L'adeguamento di questi fattori alle nuove condizioni metaboliche non avviene in maniera immediata, ma il nuovo equilibrio viene raggiunto con un certo ritardo rispetto all'inizio del lavoro (contrazione del debito di ossigeno); analogamente, quando si passa dalle condizioni di lavoro a quelle di riposo il ritorno dei fattori suddetti ai valori iniziali avviene ancora con una certa latenza (pagamento del debito d'ossigeno).

Per soddisfare le maggiori esigenze di ossigeno da parte dei muscoli in attività, i tre fattori respiratori dian-

zi illustrati devono necessariamente aumentare il loro contributo funzionale.

L'aumento di ventilazione ha lo scopo di aumentare la quantità di ossigeno presente negli alveoli nell'unità di tempo, in modo da assicurare un rifornimento continuo e massimale al sangue che vi scorre, e contemporaneamente di accelerare l'eliminazione di anidride carbonica la cui produzione aumenta per effetto del lavoro muscolare. Questo incremento di ventilazione avviene per un aumento sia della frequenza che della profondità del respiro e si dimostra che un aumento di ventilazione ottenuto soprattutto a spese di un aumento di profondità è più favorevole di un aumento di ventilazione ottenuto soprattutto a spese di un aumento di frequenza. I condotti aerei (laringe, trachea, bronchi), infatti, non sono strutturati in modo da consentire scambi gassosi col sangue e pertanto il volume di aria che in essi è presente alla fine dell'inspirazione ritorna all'esterno immutato nella propria composizione gassosa e costituisce il cosiddetto « Spazio Morto Respiratorio ». Si intuisce facilmente che a parità di ventilazione/minuto e di volume dello spazio morto, arriverà agli alveoli aria fresca (ossigeno) in quantità tanto maggiore quanto maggiore è la profondità e minore è la frequenza del respiro, perché un numero minore di volte viene ad essere ventilato lo spazio morto respiratorio inutile, come abbiamo visto, ai fini dello scambio gassoso col sangue, e viceversa. Gli atleti, specialmente i fondisti, si caratterizzano anche perché ottengono l'iperventilazione più con l'aumento della profondità che della frequenza del respiro.

L'aumento di ventilazione ha come conseguenza un aumento del flusso e quindi delle resistenze nelle vie ae-

ree; per vincere tali resistenze occorre un impegno maggiore, e quindi un maggior consumo di ossigeno, da parte dei muscoli respiratori. In condizioni di riposo il « costo in ossigeno » dei muscoli respiratori rappresenta circa il 3% del consumo totale di ossigeno; ma nell'esercizio muscolare intenso questa percentuale aumenta notevolmente, finché ad un certo limite tutto l'ossigeno apportato in più agli alveoli dall'aumento di ventilazione va a soddisfare soltanto il fabbisogno di ossigeno dei muscoli respiratori, impedendo ulteriori aumenti di lavoro da parte, per esempio, dei muscoli delle gambe impegnati in una gara di mezzofondo. Si è calcolato che il limite critico della ventilazione, oltre il quale ogni ulteriore aumento si traduce in un aggravio della situazione dei muscoli respiratori, è di circa 140 litri al minuto.

*L'aumento di circolazione* ha il duplice scopo di aumentare il « carico » di ossigeno a livello alveolare e lo « scarico » di esso a livello dei muscoli in attività, con contemporaneo procedimento inverso per quanto riguarda l'anidride carbonica. Questo incremento di circolazione o, più esattamente, di « portata cardiaca » (litri di sangue al minuto) avviene per un aumento della frequenza cardiaca e del volume pulsatorio (volume di sangue spinto nel sistema arterioso per ogni battito cardiaco).

Il volume pulsatorio, tuttavia, non può aumentare di molto, e si è calcolato che il suo aumento contribuisce per circa 1/3 alla massima portata cardiaca; il contributo più importante è dato pertanto dall'aumento di frequenza cardiaca, ossia di volumi pulsatori al minuto. E' noto, a questo proposito, che i grandi atleti dello sforzo prolungato (ciclisti, fondisti, ecc.) si caratterizzano proprio per essere dei bradicardici, cioè per avere

una bassa frequenza cardiaca a riposo; questo fatto assume un preciso significato funzionale quando si pensi che il valore massimo di frequenza cardiaca è piuttosto costante negli esseri umani, variando solo entro limiti modesti con il sesso e con l'età. Orbene, supponendo che due soggetti di egual sesso ed età abbiamo a riposo un egual consumo di ossigeno (diciamo 30 ml/min) ed ovviamente un egual valore di massima frequenza cardiaca (diciamo 200 battiti/min) e differiscano solo per la frequenza cardiaca a riposo (diciamo rispettivamente 40 ed 80 battiti al minuto), ne deriva che nel massimo impegno muscolare il primo soggetto riesce ad apportare ai muscoli una quantità doppia di ossigeno rispetto al secondo e può quindi compiere un lavoro doppio. Il soggetto a bassa frequenza iniziale può infatti aumentare di 5 volte ( $200 : 40 = 5$ ) la propria portata cardiaca, mentre il soggetto ad alta frequenza iniziale la può aumentare solo di 2,5 volte ( $200 : 80 = 2,5$ ).

Malgrado che la portata cardiaca nel lavoro muscolare intenso aumenti solo di 4-5 volte rispetto al riposo, il flusso ematico nel muscolo in attività può superare anche di 20 volte quello a riposo; questo perché l'aumento di portata cardiaca non si distribuisce egualmente in tutti i distretti organici ma si dirige elettivamente verso tre distretti che sono di fondamentale importanza nel sostenere l'impegno energetico: i muscoli in attività, per soddisfarne gli esaltati bisogni; l'encefalo, per mantenere un'attenta vigilanza sulla regolazione funzionale; la cute, per consentire la dissipazione della grande quantità di calore formatosi nell'organismo per effetto del lavoro muscolare. Per compensare l'iperafflusso ematico a questi territori, si riduce adeguatamente il flusso

nel territorio dello splancnico (appari digerente, renale, ecc.).

*L'aumento di globuli rossi* circolanti ha lo scopo di aumentare i veicolatori dell'ossigeno e quindi di favorire le necessità ipermetaboliche del lavoro muscolare. Per questo vengono mobilizzati i globuli rossi dai loro serbatoi naturali (soprattutto la milza). Il sangue, inoltre, interviene in questo processo di rifornimento di ossigeno cedendo per unità volumetrica più ossigeno che nel riposo. Infatti la differenza artero-venosa di ossigeno (ossia fra contenuto in ossigeno del sangue che arriva ai muscoli e contenuto in ossigeno del sangue che lascia i muscoli) è nel riposo di circa 5 ml ogni 100 ml di sangue e può salire fino a 16 nel lavoro intenso.

E' evidente che tutti questi adattamenti dei fattori respiratori, che nel loro complesso possiamo definire come « potenziale di riserva respiratoria », avvengono sempre nell'individuo che passi dalle condizioni di riposo a quelle di lavoro; ma essi si attuano con maggior rapidità e soprattutto con maggior efficacia nel soggetto allenato. L'allenamento, infatti, oltre a rinforzare i muscoli sollecitati, potenzia i muscoli respiratori, aumenta il volume pulsatorio e diminuisce

la frequenza cardiaca rispetto ad una eguale entità di lavoro, aumenta il numero di capillari nel muscolo e facilita l'apertura di capillari nel polmone (elevando così la superficie degli scambi gassosi), aumenta infine la concentrazione di emoglobina, realizzando in ultima analisi un miglioramento ed un più efficace intervento del potenziale di riserva.

In conclusione ed alla luce di quanto brevemente esposto possiamo affermare che il lavoro muscolare è reso possibile da un equilibrato meccanismo di adeguamenti delle funzioni ventilatoria, circolatoria ed ematica, adeguamenti che sono particolarmente vasti e perfetti nell'atleta. La sollecitazione abituale di tali meccanismi, nei comuni soggetti, perlomeno entro i limiti di un buon esercizio fisico purtroppo desueto ai giorni nostri, è di grandissima utilità all'organismo umano perché si intuisce e si dimostra facilmente il suo notevole valore profilattico, ed anche terapeutico, per esempio nelle affezioni cardiovascolari, che rappresentano oggi in tutto il mondo la principale causa di morte. L'attività fisica, dunque, trascende il puro interesse agonistico della medicina sportiva per affermarsi quale elemento essenziale della medicina sociale e preventiva.