

LE BASI FISIOLOGICHE DELLA VALUTAZIONE FUNZIONALE

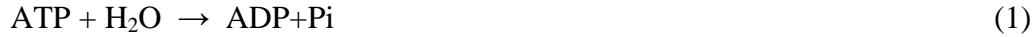
Prof. Carlo Capelli

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

Scuola di Specializzazione in Medicina dello Sport, Facoltà di Medicina e Chirurgia, Università degli Studi di Udine

1. LA CONTRAZIONE MUSCOLARE

Per la contrazione muscolare, le fibre utilizzano l'energia derivante dall'idrolisi dell'adenosintrifosfato (ATP) in adenosindifosfato (ADP) e fosfato inorganico (Pi), descritta dalla reazione:



L'esigua concentrazione intramuscolare di ATP (circa 5mM/Kg di muscolo fresco) permette solo un numero limitato di contrazioni. Questo significa che per esercizi prolungati l'ATP deve essere risintetizzato alla stessa velocità con cui viene consumato. Ciò avviene per mezzo di vari processi biochimici elencati nella Tabella 1. A parte importanti differenze, i processi biochimici in questione sono tutti caratterizzati da una velocità piuttosto lenta rispetto alla velocità di scissione dell'ATP. Essi, quindi, non possono che intervenire con un certo ritardo rispetto all'inizio degli eventi meccanici della contrazione che dettano le richieste energetiche del muscolo.

Il primo meccanismo che consente di mantenere la contrazione muscolare e quindi ovviare all'esigua concentrazione di ATP, è quello rappresentante la scissione della fosfocreatina (PC), sostanza simile all'ATP dal punto di vista termodinamico, che, cedendo il suo gruppo fosfato a favore dell'ADP, lo ritrasforma in ATP attraverso la seguente reazione:



Questo processo è noto sotto il nome di “*reazione di Lohmann*”, dal nome del fisiologo tedesco che nel 1928 descrisse per la prima volta tali processi.

La concentrazione intramuscolare di PC non è però elevata (circa 20-25 mM/Kg di muscolo fresco), per questo motivo non può supportare la contrazione muscolare per più di 6 secondi. Tuttavia, consente la resintesi di ATP sino al momento in cui gli altri processi biochimici elencati in Tabella 1. non abbiano raggiunto una velocità sufficiente a garantire una velocità di sintesi dell'ATP identica alla sua velocità di utilizzo. In esercizi molto intensi questi processi, però, non sono sufficienti alla resintesi di tutto l'ATP necessario per compiere lavoro meccanico. In questi casi, l'idrolisi della PCr continua, sebbene a velocità progressivamente più lenta, sino a quando la concentrazione muscolare di PCr raggiunge un valore minimo. In queste condizioni, anche la concentrazione di ATP diminuisce e diventa impossibile compiere lavoro meccanico: si instaura il cosiddetto *esaurimento muscolare*.

I concetti appena delineati e l'analisi della Tabella 1 indicano che la categoria delle “fonti energetiche della contrazione muscolare” comprende un gruppo di sostanze che può essere schematicamente suddiviso in:

Gruppo – 1: sostanze che possono essere utilizzate direttamente per la contrazione muscolare;

Gruppo – 2: sostanze che possono essere utilizzate solo indirettamente per il tramite di sostanze del gruppo – 1;

Gruppo – 3: sostanze che, oltre ad essere utilizzate solo indirettamente, hanno bisogno della presenza di ossigeno.

Mentre l'ATP appartiene senza alcun dubbio al Gruppo – 1 ed i lipidi appartengono al Gruppo – 3, il glicogeno sarà assegnato al Gruppo - 2 se trasformato anaerobicamente in lattato e al Gruppo – 3 quando ossidato completamente in CO₂ e H₂O. La PCr dovrebbe essere assegnata al Gruppo – 2. Tuttavia, i) dato che la scissione della PCr tiene il passo dell'utilizzazione dell'ATP e; ii) data la analogia dal punto di vista termodinamico tra le due sostanze, si conviene di elencarla tra le sostanze del Gruppo – 1. Il vantaggio di questa suddivisione schematica risiede nel fatto che la massima **potenza metabolica** prodotta grazie all'utilizzazione delle varie sostanze *diminuisce* da Gruppo – 1 al Gruppo – 3, mentre la **capacità**, ovvero la massima quantità di energia utilizzabile, *aumenta* dal Gruppo 1 al 3.

2. LO STUDIO IN VIVO DELL'ENERGETICA MUSCOLARE

Nel corso di esercizio muscolare, la concentrazione di ATP del muscolo rimane pressochè costante. Ciò indica che la *velocità di scissione dell'ATP* ($\dot{A}TP$) è uguale, ma di verso opposto, alla *velocità di resintesi* ($\dot{A}TP$). La resintesi dell'ATP è assicurata dalle vie metaboliche introdotte nel Capitolo 2.1. Quindi, in ogni istante nel corso di lavoro muscolare, la produzione d'energia nell'unità di tempo da parte del muscolo, o *potenza metabolica* (\dot{E}), può essere descritta con l'aiuto di quest'equazione:

$$\dot{E} = \dot{A}TP = \dot{A}TP = \dot{P}Cr + c\dot{V}O_2 + bLa \quad (3)$$

dove $\dot{P}Cr$ e $\dot{V}O_2$ indicano la velocità di scissione della fosfocreatina ed il consumo di ossigeno, rispettivamente, e c e b rappresentano le moli di ATP resintetizzate per mole di ossigeno consumato e di lattato prodotto.

Lo studio in vivo dei processi di resintesi dell'ATP si prefigge essenzialmente tre scopi. In primo luogo si tratta di quantificare la massima potenza metabolica e la massima quantità d'energia (capacità) ottenute utilizzando le varie vie metaboliche. Infine, la bioenergetica del lavoro muscolare studia i fattori fisiologici che regolano e limitano in vivo i processi bioenergetici. Ai fini della presente tesi sarà posta particolare attenzione ai processi complici di produzione energetica, inquadrati da un punto di vista fisiologico.

3. I PROCESSI OSSIDATIVI

I processi ossidativi costituiscono la fonte energetica quantitativamente più importante per la sintesi dell'ATP. In tutti gli esercizi che esprimono potenze inferiori alla massima potenza aerobica, è prevalentemente usato il meccanismo ossidativo che è l'unico che consente di eseguire lavoro muscolare prolungato.

I processi ossidativi avvengono nei mitocondri, a differenza di quelli anaerobici che si situano nel citoplasma della cellula; infatti l'ossidazione mitocondriale di intermedi a tre o a due atomi di carbonio (rispettivamente piruvato e acetato), derivanti prevalentemente dagli acidi grassi e dagli zuccheri, consente di ottenere energia metabolica sottoforma di resintesi di ATP attraverso le tappe della fosforilazione ossidativa, con relativo consumo di O_2 ($\dot{V}O_2$).

All'inizio di un lavoro muscolare di intensità non eccessiva, sottomassimale, in cui la potenza meccanica richiesta W aumenta istantaneamente, il consumo di ossigeno (O_2) aumenta gradualmente fino a raggiungere un valore stabile, definito **stato stazionario** ($\dot{V}O_{2ss}$). La fase di adeguamento si completa nell'arco di 3-4 minuti e il consumo di ossigeno raggiunge un livello stabile che può essere mantenuto per prolungati periodi di attività.

In queste condizioni, tradizionalmente aerobiche, il $\dot{V}O_{2ss}$ è proporzionale all'intensità del lavoro fino ad un massimo. Il $\dot{V}'O_2$ corrispondente a questo massimo è definito massimo consumo di ossigeno ($\dot{V}'O_{2max}$).

Il consumo di O_2 allo stato stazionario è proporzionale alla potenza meccanica W richiesta dall'esercizio, quindi se W aumenta, aumenta anche il $\dot{V}O_{2ss}$.

Questo si verifica fino a quando il $\dot{V}O_{2ss}$ raggiunge il massimo consumo di O_2 ($\dot{V}O_{2max}$). Al di sopra di questo livello, l'esercizio richiede un continuo intervento di meccanismi anaerobici lattacidi indicati

dalla distanza tra la linea continua orizzontale e quella tratteggiata. Nel Figura 1, il massimo consumo di O_2 è raggiunto ad una potenza di 350 watt e ammonta a $4,05 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$.

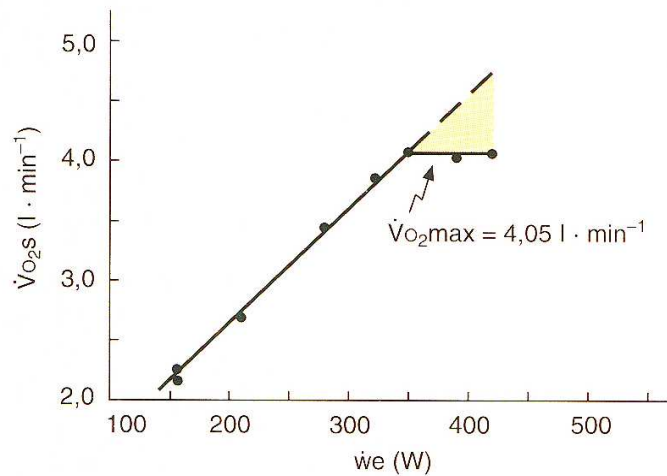


Figura 1: Consumo di ossigeno allo stato stazionario ($V'O_{2SS}$) in funzione della potenza meccanica (w) in un soggetto sano e ben allenato. Il massimo consumo di ossigeno ($V'O_{2max}$) viene raggiunto ad una potenza di 350 W e risulta essere uguale a 4.05 lmin^{-1} . Al di sopra di questo livello, l'esercizio richiede l'intervento di meccanismi energetici anaerobici (area tratteggiata). Tratta da *La locomozione umana su terra, in acqua, in aria – Fatti e Teorie, PE di Prampero, edi-ermes.*

In condizioni aerobiche allo stato stazionario, definito come una condizione in cui i più rilevanti parametri cardiocircolatori e ventilatori non variano significativamente dopo il primo periodo di esercizio, la totalità dell'ATP utilizzato dal muscolo per compiere lavoro meccanico è resintetizzata a spese dei processi ossidativi.

$$\dot{E} = \dot{A}TP = c \dot{V}O_2 \quad (4)$$

dove \dot{E} rappresenta la potenza metabolica, $\dot{A}TP$ è la velocità di risintesi di ATP e c è il numero di moli di ATP ricostituite per mole di O_2 consumata (c varia tra 5,6 e 6,2 a seconda del substrato che viene ossidato).

La fase precedente al raggiungimento dello stato stazionario, è caratterizzata dalla contrazione del cosiddetto debito di O_2 (Figura 2), che è la differenza tra il volume di O_2 utilizzato e un ipotetico volume di O_2 consumato nello stesso tempo, ma allo stato stazionario.

In questa fase, il muscolo per risintetizzare ATP utilizza:

- a) la scissione della PC
- b) le riserve di ossigeno che sono presenti nel sangue e nei tessuti
- c) il metabolismo lattacido per potenze sopra il 60-70% del $\dot{V}O_{2max}$, con conseguente produzione del lattato precoce.

Il debito di O_2 è quindi una misura della quantità di energia che, anche in un esercizio aerobico prima del raggiungimento dello stato stazionario, è presa in prestito da fonti

energetiche diverse , dal consumo di O_2 , per resintetizzare una parte dell' ATP necessario al lavoro muscolare.

Alla fine del lavoro, mentre l'utilizzazione di ATP da parte dei muscoli si riduce ai valori di riposo in modo pressoché istantaneo , il consumo di O_2 ritorna a valori di riposo in maniera più graduale. In questa fase, la cinetica dell' O_2 è rappresentata da una curva che è la somma di quattro componenti:

- a) una componente costante che dipende dal metabolismo di riposo;
- b) una componente rapida con un $t_{1/2}$ di 30 s che descrive il reintegro della PC e delle riserve di O_2 quindi il pagamento del debito alattacido;
- c) una componente lenta con un $t_{1/2}$ di 15-18 minuti che descrive il pagamento del debito lattacido ovvero l'eliminazione del lattato mediante ossidazione o trasformazione in glicogeno;
- d) una componente decrescente di lunga durata attribuita ad una azione di stimolo da parte dell'esercizio sul metabolismo di riposo (aumento della temperatura corporea, modificazioni umorali ecc.).

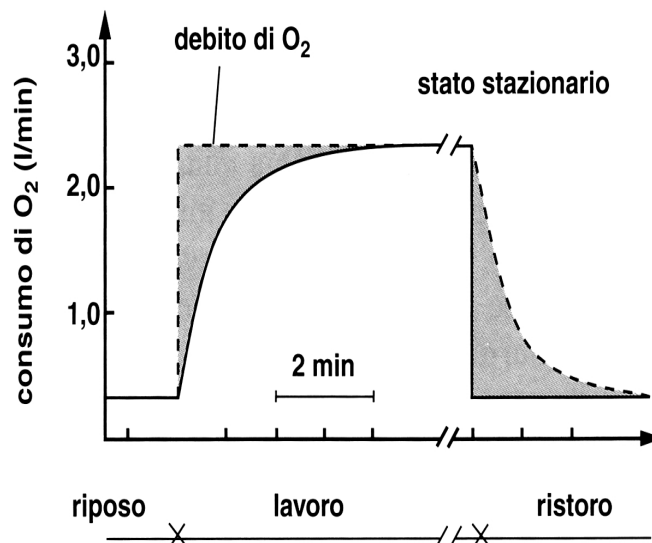


Figura 2: Consumo di O_2 in funzione del tempo all'inizio di un esercizio muscolare ad onda quadra nell'uomo. La richiesta energetica per la resintesi di ATP, in equivalenti di energia ossidativa nell'unità di tempo, è indicata dalla linea tratteggiata. All'inizio del lavoro muscolare, l'apporto di O_2 è inferiore alla richiesta: si instaura un deficit di O_2 , o viene contratto un debito di O_2 . Alla fine è superiore: il debito di O_2 viene pagato. Nella fase di stato stazionario, richiesta ed apporto di O_2 coincidono
 Tratto da: La locomozione umana su terra, in acqua, in aria – Fatti e Teorie, PE di Prampero, edi-ermes.

All'inizio del lavoro, la concentrazione della PC nei muscoli che si contraggono diminuisce per portarsi ad un livello costante in circa 3 – 4 minuti. Tale livello è una funzione lineare con pendenza negativa del $\dot{V}O_{2ss}$ (Figura 3). L'aliquota di PC scomparsa all'inizio del lavoro muscolare durante il transiente è utilizzata per la resintesi dell'ATP scisso.

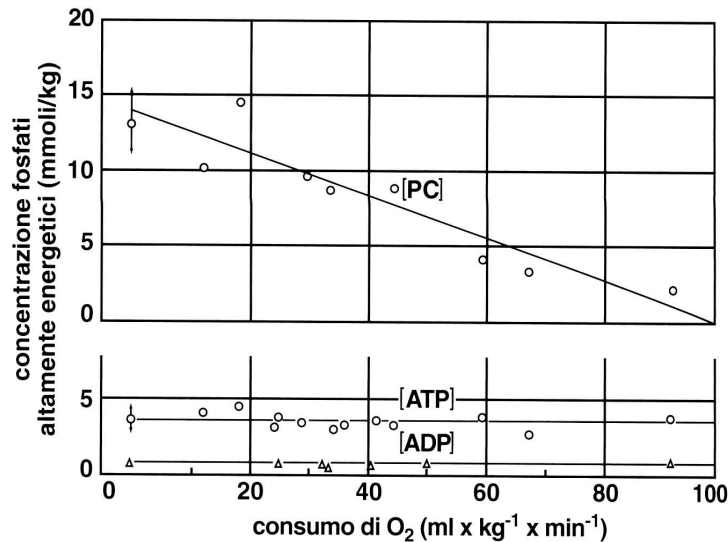


Figura 3: Concentrazione dei fosfati altamente energetici (~P) nel muscolo gastrocnemio di cane durante lavoro aerobico allo stato stazionario

($\dot{V}O_{2ss}$). ATP e ADP rimangono invariati, mentre PC diminuisce

proporzionalmente a $\dot{V}O_{2ss}$.

Tratto da: *La locomozione umana su terra, in acqua, in aria – Fatti e Teorie*, PE di Prampero, edi-ermes.

All'inizio del lavoro, inoltre, anche la diminuzione del volume di O_2 presente nelle riserve di ossigeno dell'organismo ($resO_2$), costituite dall' O_2 legato all'emoglobina del sangue venoso misto, da quello legato alla mioglobina muscolare e da quello presente nei polmoni all'inizio dell'esercizio, contribuisce alle necessità energetiche del metabolismo muscolare ossidativo. Questa diminuzione del volume di O_2 presente nelle riserve all'inizio del lavoro non compare nelle misure di $\dot{V}O_2$ effettuate alla bocca, poiché esso è già presente all'interno dell'organismo, mentre il $\dot{V}O_2$ misurato alla bocca ci fornisce l'entità del flusso di O_2 dall'ambiente esterno all'interno del nostro corpo.

Infine, se il lavoro muscolare supera una certa soglia d'intensità, si assiste anche alla produzione di lattato che a sua volta contribuisce alla resintesi di ATP e, quindi, alle necessità energetiche durante il transiente.

Ne consegue che $defO_2$ può essere analiticamente descritto dalla somma di tre termini:

$$defO_2 = \dot{V}O_2 PCr + \dot{V}O_2 eLa + \Delta \dot{V}O_2 Ris \quad (5)$$

dove $\dot{V}O_2 PCr$, $\dot{V}O_2 eLa$ e $\Delta \dot{V}O_2 Ris$ sono gli equivalenti in volume di O_2 della PCr scissa, del lattato precoce prodotto e del volume di ossigeno proveniente dalla diminuzione delle riserve di O_2 .

Durante il lavoro aerobico, il primo fattore $\dot{V}O_2 PCr$ è una funzione lineare crescente di $\dot{V}O_{2ss}$ allo stato stazionario:

$$\dot{V}O_2 PCr = \tau^{-1} \cdot \dot{V}O_{2ss} \quad (6)$$

dove τ rappresenta la *costante di tempo* della *funzione mono-esponenziale* che descrive l'aumento di $\dot{V}O_2$ nel muscolo all'inizio dell'esercizio. Questa equazione, quindi, esprime la relazione tra la diminuzione della concentrazione di PCr, espressa in equivalenti di O_2 , e l'intensità dell'esercizio.

Il contributo delle riserve di O_2 è, in proporzione, maggiore alle basse intensità di esercizio che a quelle più alte. Il contributo di $\dot{V}O_2 eLa$ è nullo alle basse intensità di esercizio, ma diventa progressivamente maggiore alle intensità più alte con la comparsa di *lattato precoce*. Va detto anche che la produzione di questa aliquota di lattato nella fase transiente dipende molto dallo stato di allenamento individuale, essendo minore nei soggetti ben allenati. Il contributo relativo di $\dot{V}O_2 eLa$ e $\Delta \dot{V}O_2 Ris$ dipende quindi, a parità di intensità di esercizio, da svariati fattori: allenamento, gruppi muscolari coinvolti, postura del soggetto durante l'esercizio, stato di riempimento delle riserve di O_2

prima della transizione.

Tutto ciò riveste notevole importanza se si utilizza la determinazione del $\dot{V}O_{2ss}$ alla bocca per descrivere la cinetica del consumo di ossigeno all'inizio del lavoro muscolare, esame clinico sempre più diffuso nella pratica medica e che prende il nome di *test cardiopolmonare da sforzo*.

A scopo esplicativo, si riportano di seguito alcuni esempi. Come abbiamo già accennato, la cinetica del consumo d'ossigeno misurata alla bocca all'inizio dell'esercizio muscolare può essere descritta, all'interno di una gamma abbastanza ampia di esercizi aerobici, per mezzo di una funzione mono-esponenziale:

$$\dot{V}O_2(t) = \dot{V}O_{2ss} (1 - e^{-(t/\tau)}) \quad (7)$$

dove $\dot{V}O_2(t)$ è il consumo istantaneo di O_2 , $\dot{V}O_{2ss}$ è il consumo di ossigeno allo stato stazionario al quale il sistema tende asintoticamente, τ rappresenta la costante di tempo in secondi del processo e t è il tempo intercorso dall'inizio istantaneo del lavoro muscolare¹.

La τ misurata in queste condizioni, in un soggetto che pedala al cicloergometro, è di circa 40-50 secondi nel caso in cui non vi sia alcuna produzione di eLa. Se l'intensità dell'esercizio imposto è tale da innescare la produzione di lattato precoce e, quindi, la comparsa o l'aumento della componente $\dot{V}O_2$ eLa, la cinetica, dopo un avvio simile a quello descritto sopra, diventa molto più lenta. In questo caso, infatti, una frazione dell'ATP totale ricostituito nel corso del transiente viene resintetizzato grazie alla via anaerobica lattacida. Ciò si riflette in una diminuzione del consumo di ossigeno a livello muscolare e, quindi, dell'organismo in toto. Di conseguenza, l'aumento di $\dot{V}O_2$ eLa si riflette in un aumento del deficit di O_2 con conseguente rallentamento della cinetica del consumo di ossigeno alla bocca.

Al contrario, se le riserve di O_2 sono ridotte prima della transizione (per esempio, facendo respirare per alcuni minuti al soggetto una miscela povera in ossigeno), la cinetica del $\dot{V}O_2$ misurata alla bocca risulterà significativamente più veloce rispetto alla condizione in cui le riserve sono intatte. In questo caso, la diminuzione delle riserve corporee di ossigeno porta alla riduzione

del deficit e causa una risposta più veloce della cinetica del $\dot{V}O_2$ misurato alla bocca: un volume maggiore di ossigeno deve essere introdotto nel nostro organismo dall'ambiente esterno per sopperire al volume di ossigeno solitamente presente nelle nostre riserve all'inizio del lavoro muscolare che era stato depauperato sottoponendo il soggetto ad ipossia.

Al termine del lavoro, il $\dot{V}O_2$ ritorna ai valori di riposo seguendo una funzione complessa in cui è possibile identificare vari componenti in funzione anche dell'intensità dell'esercizio che precede il periodo di recupero.

Dopo esercizio di intensità moderata, è evidente la comparsa di una prima componente rappresentata da una funzione mono-esponenziale (tempo di semireazione di 30 secondi), che corrisponde alla resintesi della PCr ed alla ricostituzione delle riserve di O_2 . Il volume di O_2 consumato in questa fase corrisponde al cosiddetto pagamento del debito di O_2 ($debO_2$):

$$debO_2 = \dot{V}O_2 \text{ Ris PCr} + \Delta \dot{V}O_2 \text{ Ris} \quad (8)$$

L'ATP necessario alla resintesi della PCr è fornito dalla *fosforilazione ossidativa* e la ricostituzione delle scorte di PCr è resa possibile dal fatto che la reazione catalizzata dalla creatin chinasi (Equazione 2) sia una reazione all'equilibrio. Grazie a questa caratteristica, la direzione della reazione è facilmente invertita anche in conseguenza di piccole variazioni delle concentrazioni dei substrati e dei prodotti. Nella fase di recupero al termine dell'esercizio, la concentrazione di creatina libera è alta ed, in ossequio alla legge di azione di massa, il verso della reazione illustrata dall'Equazione (2) è prevalentemente da destra verso sinistra. Il consumo di ossigeno nella fase di recupero, quindi, è un fenomeno del tutto speculare alla velocità di resintesi della PCr che si attua durante il pagamento del

¹ **Nota!** La costante di tempo (τ) ed il tempo di semi reazione ($t_{1/2}$) di una mono-esponenziale sono legati dalla seguente relazione matematica: $t_{1/2} = \ln 2 \times \tau = 0.6931 \times \tau$, dove \ln rappresenta il logaritmo in base e.

debito di ossigeno alattacido.

Dopo lavoro muscolare intenso con relativo accumulo di lattato e di *idrogenioni* H^+ nelle cellule muscolari, la cinetica del consumo di ossigeno è resa più complessa dalla comparsa di ulteriori componenti lente. Una corrisponde all'eliminazione dell'acido lattico dal sangue, o al pagamento del cosiddetto "*debito di ossigeno lattacido*" ed è caratterizzata da un tempo di semireazione di circa 15 minuti. Al termine del lavoro, infatti, una parte dell'acido lattico accumulato nell'organismo è ossidata e l'energia corrispondente è utilizzata per la resintesi a glicogene della parte rimanente dell'*acido lattico*.

4. Il $\dot{V}O_{2max}$:

E' la quantità massima di O_2 espressa in litri di O_2 , che può essere trasportata, captata, e utilizzata dall'organismo, e rappresenta quantitativamente la capacità massima di un individuo di produrre ed utilizzarenell'unità di tempo l'energia generata dal sistema ossidativo aerobico a livello muscolare. Il tempo durante il quale un esercizio aerobico di intensità costante può essere sostenuto, diminuisce all'aumentare della frazione di $\dot{V}O_{2max}$ effettivamente utilizzata durante il lavoro: in soggetti allenati esso è di circa 5 ore per un'intensità corrispondente al 60% di VO_{2max} , mentre è di soli 20-25 min per un'intensità corrispondente al 100% di $\dot{V}O_{2max}$.

La relazione fra durata del lavoro ad esaurimento ed intensità del lavoro in percentuale del $\dot{V}O_{2max}$, è stata descritta da diversi autori, i quali hanno elaborato le seguenti equazioni (vedi Tabella 2).

Il massimo consumo di ossigeno, viene espresso in valori assoluti, litri o millilitri al minuto ($l \text{ min}^{-1}$ o $ml \text{ min}^{-1}$), ma tale unità di misura è valida solo nel caso in cui il peso corporeo non sia un fattore limitante la prestazione, quindi nelle discipline sportive nelle quali il corpo viene sostenuto da un mezzo meccanico o dallo stesso ambiente di gara (ciclismo, nuoto, canottaggio). Negli altri casi, invece, quando il lavoro meccanico che il soggetto deve svolgere è di tipo antigravitario, come appunto nello sci di fondo, il $\dot{V}O_{2max}$ deve essere misurato in rapporto al peso corporeo ($ml \text{ kg}^{-1} \text{ min}^{-1}$) proprio per rendere omogenei soggetti di taglia corporea diversa.

Il $\dot{V}O_{2max}$ è una misura integrata di tutti quei meccanismi che presiedono al trasporto dell'ossigeno fino alla sua utilizzazione all'interno dei mitocondri della cellula muscolare. Il principale fattore che determina il $\dot{V}O_{2max}$ è la massima capacità di trasporto convettivo di ossigeno da parte del sistema cardiocircolatorio ai muscoli che svolgono lavoro. La massima capacità di trasporto di O_2 alla periferia è indicata come $\dot{Q}O_{2max}$ ed è uguale al prodotto della massima gettata cardiaca (\dot{Q}_{max}) per la concentrazione di ossigeno del sangue arterioso (C_{aO_2}):

$$\dot{Q}O_{2max} = \dot{Q}_{max} \cdot C_{aO_2} \quad (9.)$$

A sua volta, C_{aO_2} è calcolata dal prodotto della concentrazione di Hb per il *coefficiente di trasporto dell'emoglobina* per l'ossigeno entrambi moltiplicati per la *percentuale di saturazione* (in frazione) dell'*ossioglobina* ($\%Sat_{HbO_2}$)

$$C_{aO_2} = [Hb] \cdot 1.34 \cdot \%Sat_{HbO_2} / 100 \quad (10.)$$

In condizioni fisiologiche, a livello del mare e nel corso di esercizi effettuati con grandi gruppi muscolari (corsa, nuoto, ciclismo), il 70 – 75 per cento dei fattori limitanti è dovuto al trasporto convettivo di O_2 da parte del sistema cardiocircolatorio. Il restante 25-30 per cento è rappresentato da un secondo gruppo di fattori che comprende la perfusione muscolare e la capacità ossidativa dei mitocondri.

E' opportuno ora definire che cosa significhi il termine *fattore limitante il massimo consumo* di ossigeno e che cosa comporti il fatto di attribuire ad uno di essi un peso espresso in percentuale. Quando si afferma che $\dot{Q}O_{2max}$ ha un peso del 75 per cento, si intende che, qualora fosse possibile aumentare del 100 per cento il trasporto convettivo dell'ossigeno del sistema cardiovascolare, $\dot{V}O_{2max}$ aumenterebbe del 75 %. E' evidente che tanto più alta è la percentuale attribuita a una singola grandezza fisiologica ($\dot{Q}O_{2max}$, ventilazione polmonare, diffusione alveolo-capillare etc. etc.), tanto più critico è quel fattore nel determinare il valore di $\dot{V}O_{2max}$. Se questo dipendesse da una sola grandezza, il peso di quest'ultima corrisponderebbe, ovviamente, al 100 per cento.

L'andamento del $\dot{V}O_{2max}$ è inoltre altamente influenzato dall'età, infatti aumenta in modo progressivo dalla nascita in poi fino a raggiungere i valori assoluti più elevati tra i 15 e i 20 anni, sia nei maschi che nelle femmine e tende successivamente a diminuire oltre i 50 anni. C'è da sottolineare anche il fatto che il $\dot{V}O_{2max}$ assume valori diversi a seconda del sesso del soggetto, infatti nel sesso femminile risulta essere del 30% inferiore rispetto ai maschi di pari età.

Si nota, inoltre, che la massima potenza aerobica aumenta nel corso della pubertà per raggiungere un massimo attorno ai vent'anni per poi decadere in modo pressochè monotono.

Le differenze tra i due sessi non possono essere ricondotte ad una diversa percentuale di grasso corporeo tra maschi e femmine poiché permangono anche dopo normalizzazione per unità di massa corporea magra. Esse sono essenzialmente dovute alla minore concentrazione media di Hb riscontrata nelle femmine e riconducibile al diverso assetto ormonale del sesso femminile.

I valori medi normali di $\dot{V}O_{2max}$, sono per i maschi adulti in salute, $44 \text{ ml kg}^{-1}\text{min}^{-1}$ e per le femmine $35 \text{ ml kg}^{-1}\text{min}^{-1}$. Valori più elevati si riscontrano in soggetti che praticano regolarmente attività fisica aerobica, e ancor più elevati in atleti agonisti di alto livello, per i quali infatti, si sono registrati valori attorno ai $75/80 \text{ ml kg}^{-1}\text{min}^{-1}$.

Indipendentemente dai fattori limitanti il $\dot{V}O_{2max}$, quali la resistenza circolatoria (capacità di trasportare sangue ossigenato alla periferia), e le resistenze periferiche, il massimo consumo di ossigeno, dipende in larga misura dalle caratteristiche genetiche. Tale affermazione è basata sul fatto che l'aumento del $\dot{V}O_{2max}$ per effetto dell'allenamento di lunga durata, è al massimo del 15-20%, mentre la differenza di $\dot{V}O_{2max}$ tra un non atleta, anche allenato e un atleta di fondo, è del 50-70%. Da ciò si deduce che "ATLETA" e "ALLENATO" non sono sinonimi, infatti un atleta può essere non allenato, così come un non atleta può essere alleatissimo. Ciò naturalmente non significa che l'allenamento sia inutile, anzi solo un adeguato allenamento permette di esprimere a pieno il proprio potenziale atletico e di ottimizzare il gesto sportivo. E' ovvio, quindi, che gli atleti specializzati in attività di gran fondo posseggano valori di $\dot{V}O_{2max}$ molto elevati. (Tabella 3)

In definitiva, il $\dot{V}O_{2max}$ rappresenta sì il fattore limitante per le discipline sportive che necessitano di una preponderante produzione di energia attraverso il metabolismo aerobico, ma allo stesso tempo, esso assume un ruolo controverso. Infatti se il $\dot{V}O_{2max}$ viene misurato in gruppi omogenei di soggetti (fondisti o ciclisti), la misura di tale parametro non è più in grado di fornire previsione sulle capacità di prestazione. In tali gruppi è evidente che tutti i soggetti possiedono un elevato livello di $\dot{V}O_{2max}$. Risulta chiaro quindi, che in questi casi è necessario misurare altri parametri, quali per esempio, la *Soglia Anaerobica*, il *Costo energetico*, il *rendimento*. Tra tutti questi parametri mi limiterò a descrivere quello di SA, e quello di MLSS (massimo lattato allo stato stazionario).

5. IL TEMPO DI ESAURIMENTO

A questo, è strettamente connesso il concetto di endurance. La percentuale di $\dot{V}O_{2max}$ ($\% \dot{V}O_{2max}$) che può essere mantenuta ad un livello costante per tutta la durata del lavoro muscolare è una funzione decrescente dell'intensità dell'esercizio aerobico. Il tempo durante il quale può essere mantenuta una $\% \dot{V}O_{2max}$ costante viene definito *tempo di esaurimento* (t_{lim}) e sarà tanto più breve quanto maggiore l'intensità dell'esercizio. Superato questo limite, il soggetto è obbligato a diminuire la potenza muscolare e l'intensità dell'esercizio. Da ciò deriva la definizione assegnata a questo limite temporale di "tempo di esaurimento". Inoltre, anche il tempo durante il quale può essere mantenuta un'intensità pari a $\dot{V}O_{2max}$ ($t_{lim} \dot{V}O_{2max}$) non è infinito, ma ammonta solo a pochi minuti. $\% \dot{V}O_{2max}$ e $t_{lim} \dot{V}O_{2max}$ sono, ovviamente caratterizzati da una notevole variabilità interindividuale. Ciò non di meno, studi sperimentali hanno tentato di descrivere in modo quantitativo le relazioni tra $\% \dot{V}O_{2max}$ e t_{lim} .

Il valore medio di $t_{lim} \dot{V}O_{2max}$ si attesta attorno ad un valore di circa 6 minuti con una deviazione standard di 1 minuto, anche se l'intervallo di variazione è piuttosto ampio (3.8–8.4 min) dipendendo dal tipo di atleti e di esercizio presi in esame.

Altri studi hanno fornito semplici modelli matematici empirici, sotto forma di equazioni di regressioni lineari o non lineari riportate in Tabella 2, in grado di calcolare la percentuale di $\dot{V}O_{2max}$ che è possibile mantenere ad un livello costante per tutta la durata dell'esercizio in funzione della durata del lavoro muscolare.

Nel corso di esercizio muscolare di intensità elevata ($> 80 \% \dot{V}O_{2max}$), si assiste ad un progressivo declino del contenuto di glicogeno muscolare che può diminuire in 45 minuti dell'85 per cento rispetto ai valori pre esercizio (Figura 5). Il tempo di esaurimento coincide con il punto in cui si raggiunge la deplezione delle scorte di glicogeno muscolare. Non c'è da meravigliarsi, quindi, che sia possibile dimostrare una relazione all'incirca proporzionale tra il tempo di esaurimento e la concentrazione di glicogeno muscolare all'inizio del lavoro muscolare.

Per esempio, in un classico studio degli anni sessanta, è stato possibile dimostrare che il tempo di esaurimento aumenta da un'ora circa a più di due ore quando si passa da una concentrazione di glicogeno nel quadricipite di 6.3 g per kg di muscolo ad una di 35.1 g per kg. Quindi, nel corso dell'esercizio, soprattutto se di intensità moderata, il fabbisogno energetico dei muscoli viene soddisfatto in misura sempre maggiore per mezzo dell'ossidazione dei lipidi con conseguente diminuzione delle moli di ATP resintetizzate per mole di ossigeno consumato.

Il tempo di esaurimento può essere esteso per mezzo di manipolazioni dietetiche che siano in grado di aumentare la concentrazione di glicogeno nel muscolo (la concentrazione normale di glicogeno muscolare per soggetti a dieta mista è di circa 14 g per kg di muscolo). Si può giungere a quintuplicare il tempo di esaurimento nel corso di esercizio aerobico di alta intensità se si è provveduto ad aumentare in modo opportuno le scorte di glicogeno muscolare (Figura 6).

E' anche generalmente accettato il fatto che l'ingestione di carboidrati durante esercizio ritardi il sopraggiungere della fatica muscolare poiché contribuisce al mantenimento della glicemia normale anche quando il glicogeno muscolare ed epatico sono prossimi all'esaurimento. Ciò non di meno, non è possibile individuare un livello di potenza metabolica costante che possa essere mantenuta per un tempo praticamente infinito. In quest'occasione, infatti, altri fattori di ordine psicologico, nervoso (fatica centrale), elettrolitico e termoregolatorio intervengono nello stabilire il limite di durata dell'esercizio.

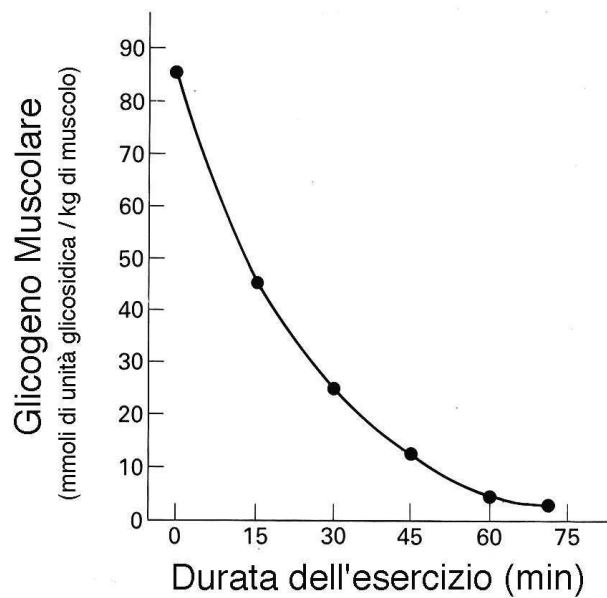


Figura 5: Diminuzione media del contenuto di glicogeno nella quadricipite femorale di dieci soggetti nel corso di esercizio muscolare al cicloergometro eseguito ad una potenza equivalente

all'80 per cento di $\dot{V}O_{2max}$. L'esercizio fu interrotto al momento del raggiungimento del tempo di esaurimento coincidente con il punto di deplezione delle riserve di glicogeno muscolare.

Tratto da: Food stores and energy reserves, Hultman E e Greenhaff PL in Endurance in Sport, Shephard RJ e Åstrand PO Blackwell Scientific Publication.

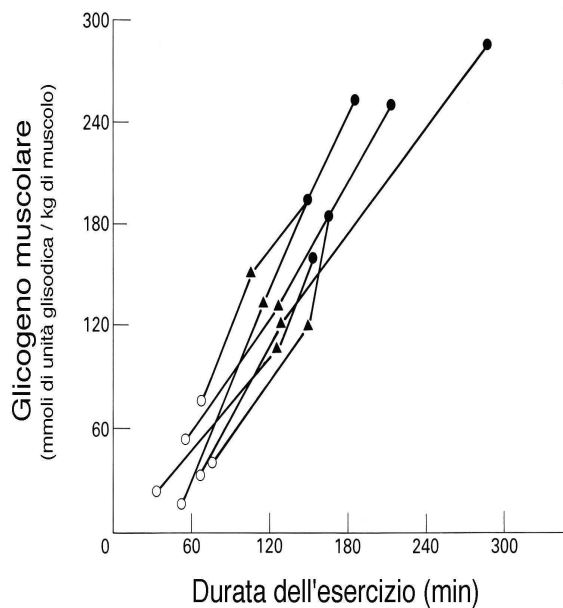


Figura 6: Relazione tra la concentrazione di glicogeno nel muscolo quadricipite presente prima dell'esercizio e tempo di esaurimento nel corso di esercizio al ciclo ergometro eseguito

ad una potenza metabolica equivalente al 75% di $\dot{V}O_{2max}$. Ogni soggetto fu studiato in tre occasioni nell'arco di dieci giorni: la prima volta dopo tre giorni di dieta mista (▲); quindi dopo tre giorni di dieta ipoglicidica (○); infine dopo tre giorni di dieta iperglicidica (●).

Tratto da: *Food stores and energy reserves*, Hultman E e Greenhaff PL in *Endurance in Sport*, Shephard RJ e Åstrand PO Blackwell Scientific Publication.

6. IL METABOLISMO LATTACIDO

Quando la richiesta energetica dell'esercizio supera il $\dot{V}O_{2max}$, avviene un accumulo continuo di lattato nel sangue. In queste condizioni il soggetto arriva all'esaurimento quando il lattato ematico raggiunge concentrazioni variabili tra 10 e 20 mmol/L. D'altra parte, nel corso d'esercizi muscolari svolti ad intensità inferiori a $\dot{V}O_{2max}$ la concentrazione di lattato può attestarsi su valori significativamente superiori ai valori basali oppure continuare ad aumentare in modo continuo portando nel giro di qualche minuto il soggetto ad interrompere lo sforzo. Il tempo di affaticamento dipende dall'intensità dell'esercizio, dal grado di allenamento e dalle caratteristiche fisiologiche del soggetto. Alla luce di quanto appena affermato, è chiaro che, nello studio dei meccanismi lattacidi di produzione di energia metabolica dobbiamo distinguere tre situazioni:

- una corrispondente ad esercizio di intensità molto alta e superiore alla massima potenza aerobica del soggetto.

In questo caso la produzione di ATP per via ossidativi è insufficiente a soddisfare il fabbisogno di ATP. E' il caso, per esempio, di esercizio molto intenso eseguito da parte di piccoli gruppi muscolari o di esercizi in cui la disponibilità di O_2 ai muscoli diventa insufficiente per sostenere la fosforilazione ossidativi.

- un'altra riferita ad esercizi eseguiti per alcuni minuti ad intensità inferiori al $\dot{V}O_{2max}$ individuale, ma caratterizzati dalla presenza di concentrazioni di lattato ematiche superiori a quelle presenti a riposo. Da ciò si deduce che la glicolisi è un meccanismo fondamentale per garantire la disponibilità di substrati necessari alla fosforilazione ossidativa mitocondriale.
- Infine, data la notevole velocità con la quale la glicolisi si attiva, essa diventa particolarmente importante nel caso s'instaurino repentine variazioni delle richieste energetiche. In questo caso, l'aumento pressoché immediato della richiesta di ATP può essere soddisfatto solo dal rapido aumento dell'attività della via glicolitica.

Partendo dalle condizioni sopraccitate, nei successivi paragrafi si tenterà di illustrare i concetti di Soglia Anaerobica ed l'MLSS (Maximal lactate steady state).

7. LA SOGLIA ANAEROBICA

La soglia anaerobica (*Lactate Threshold*) è un indice largamente impiegato per lo studio dell'esercizio di lunga durata in condizioni sia fisiologiche che patologiche. Da quanto appena affermato, è un indice più realistico della “capacità di endurance” di quanto non sia $\dot{V}O_{2max}$, poichè quantifica la predisposizione individuale a compiere esercizio prolungato mantenendo elevate frazioni di $\dot{V}O_{2max}$. Da qui si è vista la necessità di introdurre il concetto di Soglia Anaerobica, intesa come **l'intensità soglia, di ampiezza più o meno ristretta, oltre la quale si verifica, non necessariamente per carenza di ossigeno, un accumulo progressivo di lattato nel sangue.** Tuttavia, anche ad intensità di lavoro uguale alla soglia anaerobica, la concentrazione del lattato ematico ($[La]_s$), dopo un iniziale aumento nei primi 15-20 minuti di esercizio, può raggiungere un livello costante che viene mantenuto fino alla fine del lavoro. A questo punto è lecito domandarsi quali siano i meccanismi alla base dell'accumulo della concentrazione di La nel corso di esercizio sottomassimale.

Il lattato liberato dai muscoli in cui esso è prodotto subisce il seguente destino. In larga parte è ossidato dalle fibre muscolari di unità motorie dei muscoli coinvolti nell'esercizio, il resto viene trasportato attraverso il torrente circolatorio ad altri distretti muscolari ed organi dove viene ossidato o, in misura minore, utilizzato come substrato per la glicogenosintesi. È stato dimostrato, infatti, che all'aumentare dell'intensità dell'esercizio muscolare, un muscolo che libera lattato nel sangue refluo, inizia gradualmente a captarlo. Questo meccanismo prende il nome di spoletta del lattato (lactate shuttle). È evidente, infatti, che il graduale aumento della concentrazione di lattato che si registra all'aumentare dell'intensità dell'esercizio è dovuta semplicemente al fatto che la velocità di produzione del lattato aumenta misura maggiore rispetto a quella di smaltimento. Lo squilibrio che si viene a stabilire una volta superata una determinata intensità si evidenzia con la comparsa della soglia. In realtà, quindi, l'accumulo di lattato nel sangue non sarebbe dovuto all'insorgenza di ipossia tissutale, ma ad un graduale squilibrio tra velocità di smaltimento e di produzione. (Figura 7).

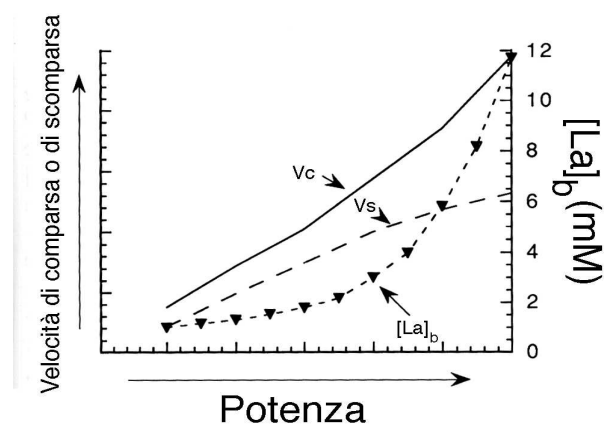


Figura 7: Illustrazione schematica della relazione tra velocità di scomparsa e di comparsa del lattato nel sangue e la conseguente concentrazione di lattato ematico nel corso di esercizio incrementale.

Tratto da: Brooks G.A.: Anaerobic threshold: review of the concept and directions for future research. *Med Sci Sports Exerc.* 17: 22- 31, 1985.

L'individuazione della SA determina, quindi l'intensità di lavoro ancora compatibile con la massima concentrazione di lattato che può essere mantenuta costante nel sangue di un soggetto che compia esercizio prolungato. Superata questa intensità, il lattato aumenta in funzione del tempo di esercizio. La SA in definitiva, indica la percentuale (o il valore assoluto) della massima potenza meccanica o metabolica esprimibile da un individuo e che può essere sostenuta per tempi prolungati. Per intensità di lavoro tra SA e $\dot{V}O_{2max}$ il (La_s) aumenta continuamente nel tempo fino ad arrivare all'esaurimento del soggetto.

Diversi metodi sono stati proposti per la determinazione di SA. Qui di seguito ne sono indicati, a titolo esemplificativo, alcuni tra i più diffusi.

- Alcuni identificano la SA come il livello di intensità di lavoro immediatamente precedente il rapido incremento della lattatemia al di sopra dei valori di riposo;
- altri la identificano come la zona di transizione aerobica – anaerobica, compresa tra i valori ematici di lattato di 2 e 4 mM, considerando il primo valore, il limite superiore del metabolismo aerobico (soglia aerobica), il secondo come il reale valore di SA;
- Mader et al. (1976), pone la SA in corrispondenza di valori di lattatemia di 4 mmol/L, pari a circa il 75% del $\dot{V}O_{2max}$. L'intensità di esercizio corrispondente a questa concentrazione di lattato ed espressa in percentuale del massimo consumo di ossigeno, è calcolata interpolando linearmente nell'intervallo opportuno una relazione lattato-intensità o lattato-potenza (Figura 8).

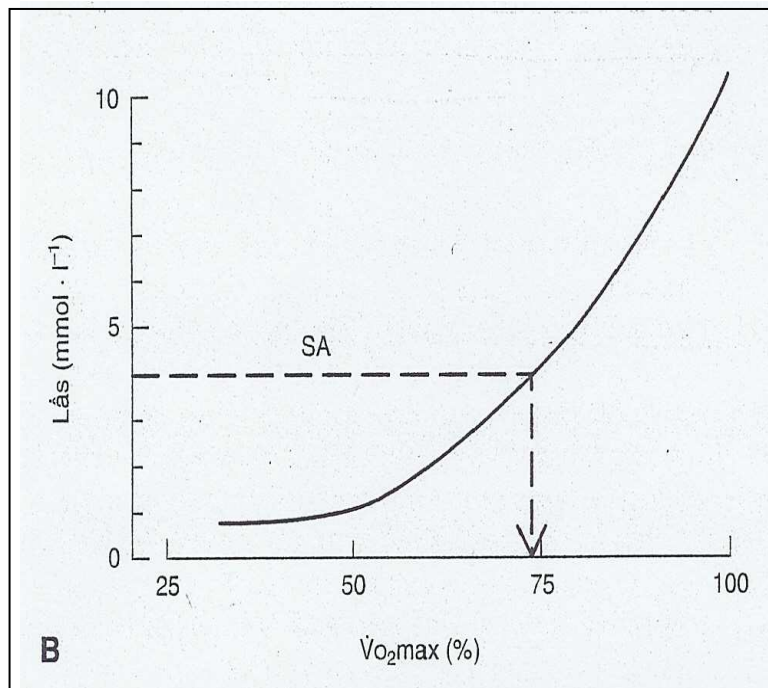


Figura 8: La soglia anaerobica espressa in percentuale di $\dot{V}O_{2max}$, a cui La_s raggiunge una concentrazione di 4 mmol/l.

- altri ancora non indicano un valore preciso di SA, ma considerano l'incremento della lattatemia, che si verifica durante un esercizio di tipo incrementale, come una funzione continua.

Da tali considerazioni si evince che non esiste un'uniforme identità di vedute circa il livello di intensità metabolica corrispondente alla soglia stessa. Il valore di SA può essere espresso, oltre che in percentuale di $\dot{V}O_{2max}$, utilizzando le variabili direttamente ($\dot{V}O_2$, potenza meccanica) od indirettamente (velocità, frequenza cardiaca) relate intensità dell'esercizio.

Particolarmente utilizzato e diffuso è il criterio proposto da Mader. Il valore delle 4 mmol/L, fu scelto per motivi puramente statistici: circa nel 75% dei casi studiati, infatti esso corrispondeva alla intensità più alta di esercizio ancora compatibile con una concentrazione di lattato stabile, ovvero con la condizione nota sotto il nome di MLSS (*maximal lactate steady state*). Il metodo di Mader, come proposto in origine, si tratta di un test a carichi crescenti composto da quattro prove della durata di circa 5-6 minuti durante le quali il soggetto deve sostenere una potenza costante e crescente. Tra ciascun carico e il successivo vi è una breve pausa (30 secondi) sufficiente ad effettuare il prelievo di sangue. Grazie ai dati ottenuti, è possibile costruire la curva con in ordinata i valori di La ed in ascissa la potenza, per poi individuare il carico al quale il lattato ematico raggiunge le 4 mM. L'intensità corrispondente alla concentrazione di lattato alle 4 mM, può essere facilmente individuata tramite metodi grafici di interpolazione lineare.

Tornando invece al concetto di soglia anaerobica, recentemente di Prampero e Antonutto (2001) hanno illustrato in maniera formale e quantitativa, quanto la definizione usuale di soglia anaerobica possa condurre ad errate conclusioni.

Si è accennato precedentemente al fatto che un esercizio prolungato compiuto mantenendo la concentrazione di lattato costante nel sangue corrisponda per l'organismo ad una situazione di completa aerobiosi dal punto di vista del bilancio energetico. Questo concetto può essere illustrato in maniera formale e quantitativa. A questo scopo si deve innanzi tutto ammettere che: 1) una concentrazione di lattato nel sangue superiore a quella di riposo, ma costante nel tempo, è il risultato di un identico incremento delle velocità di sintesi e di rimozione del lattato; 2) la scomparsa del lattato avviene solo per opera della sua ossidazione a CO_2 ed acqua oppure attraverso i processi della resintesi

del glicogeno; 3) la resintesi epatica del glicogeno è di entità trascurabile durante l'esercizio; 4) la scomparsa del lattato avviene, quindi, quasi esclusivamente ad opera della sua ossidazione; 5) la concentrazione ematica di lattato ($[La]_b$) è proporzionale alla quantità totale di La presente nell'organismo nel corso dell'esercizio. Ne consegue che, in ossequio alle assunzioni sopraccitate, ogni qualvolta $[La]_b$ sia superiore al valore di riposo, ma costante nel tempo, l'aliquota di lattato prodotta in una determinata popolazione di fibre ed eccedente le loro capacità ossidative può essere ossidata in altre fibrocellule e/o altri organi. Inoltre, la quantità di O_2 consumata e la conseguente quantità di energia liberata dal glicogeno, sono identiche sia che il piruvato (Py) entri direttamente nel ciclo di Krebs oppure subisca la "diversione" $Py \rightarrow La \rightarrow Py$. Quindi, dal punto di vista dell'organismo *in toto*, la produzione e la rimozione (per ossidazione) di uguali quantità di La nell'unità di tempo corrispondono obbligatoriamente ad una situazione di completa aerobiosi. In queste condizioni, quindi, la determinazione del $\dot{V}O_2$ rimane una misura quantitativamente corretta dell'energia impiegata. Le considerazioni sopra riportate possono anche essere esemplificate sotto forma grafica (Figura 9).

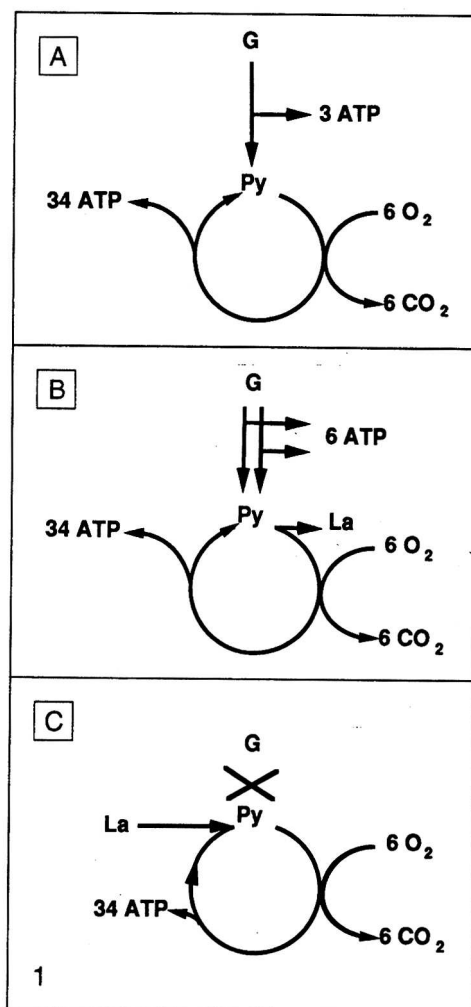


Figura 9: A) Fibra in condizioni aerobiche. La quantità di Py formato a partire dal glicogeno è completamente ossidato a CO_2 e H_2O . Un'unità glicosidica (162 g di glicogeno) fornisce l'energia sufficiente per la resintesi di 3 moli di ATP nelle fasi iniziali del processo e 34 moli di ATP nel ciclo di Krebs. Il rapporto ATP/O_2 è uguale a $(34+3)/6 = 6.17$. B) Fibra muscolare in condizioni "ipoaerobiche". La quantità di Py prodotta eccede quella che può essere ossidata nel ciclo di Krebs. L'eccesso di Py è convertito anaerobicamente a lattato (La). Il rapporto ATP/O_2 è maggiore di quello presente in condizioni aerobiche normali: $(34+6)/6 = 6.67$. C) Fibra muscolare in condizioni "iperaerobiche". La fibra capta La dallo spazio extra-cellulare, lo riconverte

a Py che entra nel ciclo di Krebs. Non è utilizzato glicogeno. Il rapporto ATP/O₂ è inferiore a quello delle condizioni aerobiche normali: $34/6 = 5.67$ in questo caso particolare.

Tratto da: G Antonutto e PE di Prampero: *The concept of lactate threshold*, *J Sport Med Phys Fitness* 35: 6 – 12, 1995.

Nel caso di una fibra muscolare *aerobica* l'intero ammontare del piruvato prodotto è ossidato. In questo caso il rapporto ATP/O₂ sarà uguale a $(34 + 3)/6 = 6.17$, provenendo le 3 moli di ATP dalla demolizione glicolitica del glicogeno (Figura 9A). Se il piruvato è formato in quantità maggiore di quella che la cellula riesce ad ossidare, la cellula si trova in una condizione che gli autori hanno definito *ipoaerobica* (Fig. 9B). In questo caso, il rapporto ATP/O₂ sarà $(34 + 6)/6 = 6.67$. Dal momento che vari tessuti, compreso il muscolo, sono in grado di ossidare lattato, è data anche una terza possibilità: le cellule possono captare il lattato extracellulare proveniente dalle cellule *ipoaerobiche* ed ossidarlo. In queste cellule, definite *iperaerobiche*, il rapporto ATP/O₂ è uguale a $34/6 = 5.67$ e le cellule consumano più ossigeno per fornire una data quantità di ATP (Figura 9C).

E' ovvio che la coesistenza di cellule iperaerobiche ed ipoaerobiche può condurre ad una situazione di completa aerobiosi nell'organismo in toto. Ciò è dimostrato nella Fig. 10 ove il rapporto ATP/O₂ complessivo è di nuovo uguale a 6.17. Vi è da osservare che le cellule iperaerobiche risparmiano glicogeno, mentre le cellule ipoaerobiche ne consumano in maggiore quantità rispetto alla situazione di perfetta aerobiosi. L'aumento della concentrazione ematica di lattato favorisce inoltre il suo ingresso, in ossequio allo stabilirsi di un gradiente di concentrazione favorevole, all'interno delle cosiddette iperaerobiche. La discussione riportata nei precedenti paragrafi porterebbe a definire la tradizionale *soglia aerobica* ($[La]_b < 2 \text{ mM}$) come il livello di esercizio al di sotto della quale la quasi totalità delle cellule è in una condizione di completa aerobiosi. Ad intensità superiori, l'organismo in toto sarebbe ancora in una situazione di aerobiosi complessiva. La frazione di cellule in condizioni ipoaerobiche è aumentata, ma è controbilanciata dall'aumento della frazione di cellule iperaerobiche. Se l'intensità dell'esercizio aumenta ulteriormente, la frazione di cellule ipoaerobiche prevale e $[La]_b$ continua ad aumentare. Questa soglia corrisponderebbe alla cosiddetta *soglia anaerobica situata* tradizionalmente in corrispondenza delle 4 mM di La. D'altro canto, il concetto di soglia anaerobica continuerebbe ad avere un importante significato pratico. In corrispondenza di intensità di esercizio caratterizzate dal continuo accumulo di Lattato, infatti, la percentuale di cellule ipoaerobiche prevale: ciò porta all'esaurimento delle loro scorte di glicogeno cellulari in tempi più brevi di quanto sarebbe possibile se esse rimanessero aerobiche. Queste cellule, quindi, saranno costrette ad avvalersi in proporzione sempre maggiore dei substrati energetici lipidici, con conseguente riduzione della quantità di moli di ATP resintetizzate per mole di O₂ consumato. Ciò porterà, in tempi più o meno lunghi, alla diminuzione della potenza globale sviluppata, quindi all'affaticamento.

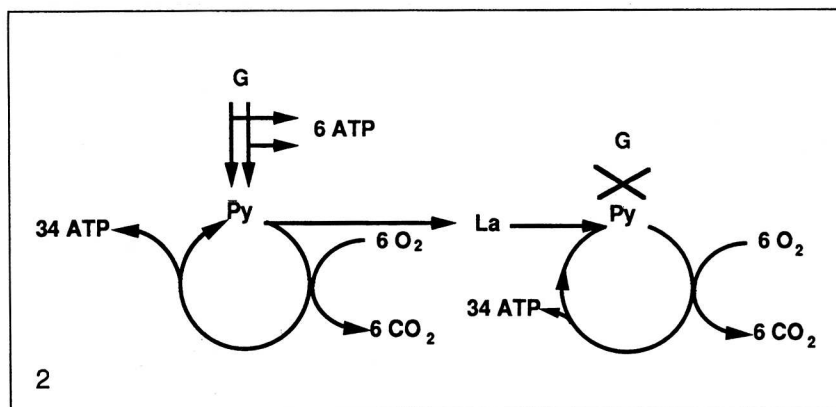


Figura 10: Accoppiamento di una fibrocellula muscolare ipoaerobica con un'iperaerobica. Situazione che equivale, nel suo complesso, ad un sistema totalmente aerobico.

Tratto da: G Antonutto e PE di Prampero: *The concept of lactate threshold*, *J Sport Med Phys Fitness* 35: 6 – 12, 1995.

I metodi di determinazione di SA ai quali abbiamo sino ad ora accennato sono metodi diretti: contemplano la misurazione mini invasiva della concentrazione del lattato nel sangue capillare del soggetto. Altri metodi, di tipo indiretto, sono stati proposti e si basano sull'analisi dei cambiamenti di diversi parametri (cardiaci, ventilatori, ecc.) che si modificano in corrispondenza di accumulo di La.

I test possono essere effettuati al cicloergometro e sul treadmill a seconda della disciplina di provenienza del soggetto.

Ne riportiamo due a titolo di esempio:

- **Metodo di Wasserman:** questo metodo consiste nell'analizzare il rapporto $V'E/V'O_2$ (ventilazione/ consumo di O_2) durante una prova a carichi crescenti. La $V'E$ ha una relazione lineare con il $\dot{V}O_2$ fino a un determinato carico oltre il quale (*ventilation breaking point*) essa aumenta più di quanto non aumenti il $\dot{V}O_2$, diventando addirittura sproporzionata rispetto alle richieste organiche di O_2 poiché riflette il meccanismo di compensazione ventilatoria dell'acidosi metabolica indotta dall'accumulo di acido lattico. Il punto di flesso corrisponderebbe al valore di SA.

- **Metodo Conconi:** questo test mette in relazione l'intensità del carico con la frequenza cardiaca (Fc). E' stato visto che la Fc aumenta linearmente con l'aumentare dell'intensità fino a raggiungere un punto di flesso dopo il quale, ad un aumento del carico non corrisponde più un

aumento di Fc e si registra una diminuzione del polso di ossigeno ($\dot{V}O_2/Fc$). Il soggetto parte con una velocità che determini una Fc di 120-130 battiti al minuto. La prova dura in genere 10-20 minuti. Anche in questo caso la SA viene individuata sulla base del flesso della relazione intensità-Fc.. Con questa metodica si tende a sovrastimare la soglia calcolata con il metodo diretto. Inoltre la Fc varia molto meno rispetto alla concentrazione del lattato in funzione di un aumento identico di potenza. E' estremamente operatore-dipendente e non è esente da critiche teoriche, ma il vantaggio di questa metodica è il fatto che non richiede strumenti particolari (se non il cardiofrequenzimetro), e di essere di facile e rapida esecuzione.

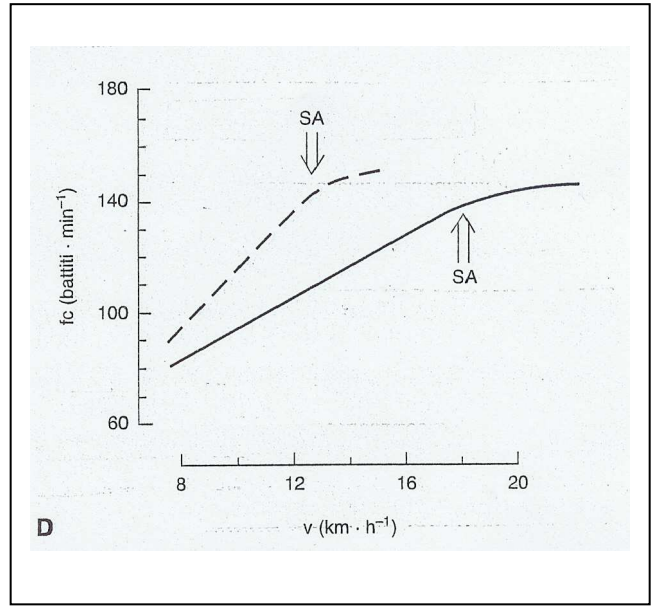
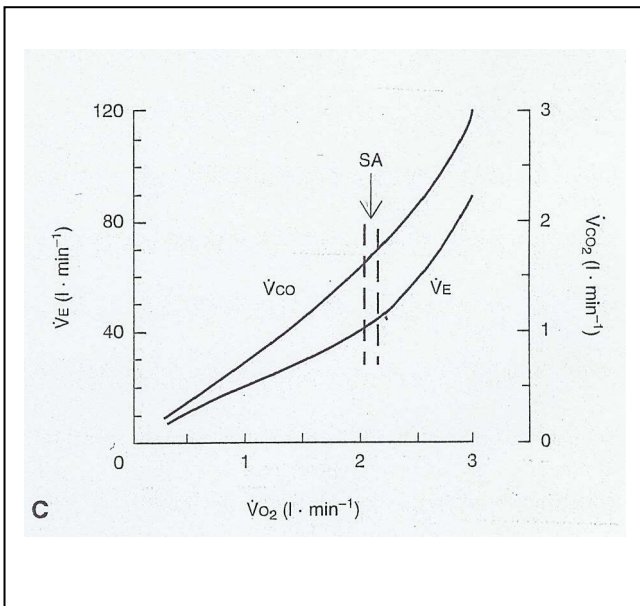


Figura 11 C). La soglia anaerobica può essere determinata a partire dall'intensità metabolica a cui la ventilazione polmonare (V_E) o l'eliminazione di CO_2 (V_{CO_2}) aumentano in eccesso rispetto al corrispondente aumento del consumo di ossigeno o dalla velocità di corsa a cui la relazione lineare frequenza cardiaca – velocità cambia pendenza (D) (test di Conconi).

Tabella 1.1 Produzione di ATP per mole di substrato, o di O₂, consumato in diverse vie metaboliche. E' anche indicato il quoziente respiratorio, QR.

<i>ATP/mol</i>				
<i>Reazione</i>				
		<i>Substrato</i>	<i>O₂</i>	<i>QR</i>
<i>Glicogene^a</i>	-----> <i>Lattato</i>	3	--	--
Glucosio	-----> Lattato	2	--	--
Lattato	-----> CO ₂ + H ₂ O	17	5.7	1.00
Glicogene ^a	-----> CO ₂ + H ₂ O	37	6.2	1.00
Glucosio	-----> CO ₂ + H ₂ O	36	6.0	1.00
AGL ^b	-----> CO ₂ + H ₂ O	138	5.6	0.71
Acetoacetato	-----> CO ₂ + H ₂ O	23	5.7	0.73
b-idossibutirrato	-----> CO ₂ + H ₂ O	26	5.8	0.80

a) per unità glicidica; b) AGL = acidi grassi liberi, composizione simile al tessuto adiposo umano.

Tratta da: La locomozione umana su terra, in acqua, in aria – Fatti e Teorie, PE di Prampero, edi-ermes.

Tabella 2. Equazioni predittive dell'utilizzazione percentuale del massimo consumo di ossigeno ($\% \dot{V}O_{2\max}$) in funzione del tempo di esercizio (t).

Modello A (Saltin, 1973)	$\% \dot{V}O_{2\max} = 94 - 0.1 \bullet t$	
Modello B (Davies e Thompson, 1979)	$\% \dot{V}O_{2\max} = 91.24 - 3.79 \bullet t - 0.08 \bullet t^2$	(t in ore)
Modello C (Leger et al, 1986)	$\ln \% \dot{V}O_{2\max} = 4.93 - 0.186 \bullet \ln t$	(se $t < 4.6$ min)
	$\ln \% \dot{V}O_{2\max} = 4.79 - 0.096 \bullet \ln t$	(se $4.6 < t < 70.4$ min)
	$\ln \% \dot{V}O_{2\max} = 4.90 - 0.121 \bullet \ln t$	(se $70.4 < t < 173.7$ min)
	$\ln \% \dot{V}O_{2\max} = 5.80 - 0.1156 \bullet \ln t$	(se $t > 173.7$ min)
Modello D (Péronnet e Thibau, 1989 Di Prampero et al, 1993)	$\% \dot{V}O_{2\max} = 100$	(se $45 < t < 420$ s)
	$\% \dot{V}O_{2\max} = 100 - 5.68 \bullet \ln t$	(se $t > 420$ s)

Tabella 3. Valori tipici di massimo consumo di ossigeno in vari sport

tratta da: Maximal oxygen intake, Shephard RJ in *Endurance in Sport*, Shephard RJ e Astrand PO ed, Blackwell Scientific Publication).

Tipo di attività sportiva	Massimo consumo di ossigeno (ml kg ⁻¹ min ⁻¹)	
	Maschi	Femmine
Sport di resistenza		
Corsa su lunghe distanze	75-80	65-70
Sci di fondo	75-78	65-70
Biathlon	75-78	-
Ciclismo su strada	70-75	60-65
Corsa-Mezzo fondo	70-75	65-68
Pattinaggio	65-72	55-60
Orienteering	65-72	60-65
Nuoto	60-70	55-60
Canottaggio	65-69	60-64
Kajak	60-68	50-55
Marcia	60-65	55-60
Giochi di squadra		
Calcio	50-57	-
Pallamano	55-60	48-52
Hockey su ghiaccio	55-60	-
Pallavolo	55-60	48-52
Pallacanestro	50-55	40-45
Tennis	48-52	40-45
Tennis da tavolo	40-45	38-42
Sport di combattimento		
Boxe	60-65	-
Lotta	60-65	-
Judo	55-60	50-55
Scherma	45-50	40-45
Sport di potenza		
Sprint (200 m)	55-60	45-50
Sprint su pista (100-200 m)	48-52	43-47
Salto in alto	50-55	45-50
Decathlon, eptathlon	60-65	50-55
Combinata nordica	60-65	-
Sollevamento pesi	40-50	-
Disco, lancio del peso	40-50	35-40
Giavellotto	45-50	42-47
Salto con l'asta	45-50	-
Salto con gli sci	40-45	-
Sport tecnico-acrobatici		
Sci (discesa)	60-65	48-53
Pattinaggio artistico	50-55	45-50
Ginnastica	45-50	40-45
Ginnastica ritmica	-	45-50
Vela	50-55	45-50
Tiro	40-45	35-