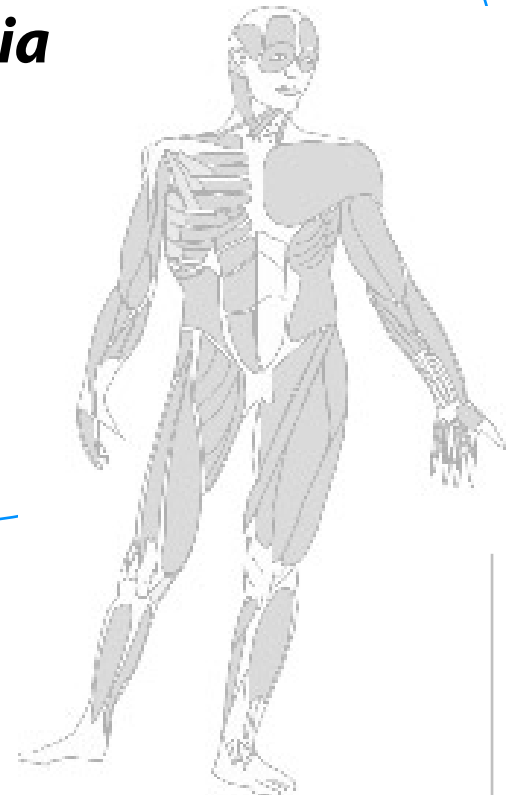


Federico Schena

Protocolli di valutazione cardio respiratoria negli atleti



La determinazione dei protocolli valutativi, da applicare nelle prove da sforzo finalizzate alla misura della capacità di prestazione nell'atleta, rappresenta da sempre un argomento al centro di dibattito e di studio nella medicina dello sport. Infatti, su questo campo della fisiologia dell'esercizio si contrappongono due opposte esigenze:

- a) *la necessità di stabilire protocolli accurati e riproducibili che consentano di individuare con la migliore precisione le risposte fisiologiche all'esercizio,*
- b) *la continua ricerca di modalità di valutazione specifiche che presentino la massima adesione allo sforzo compiuto dall'atleta nel momento della competizione.*

E' evidente che queste due finalità sono, almeno in parte, antitetiche poiché la necessità di standardizzazione e di adesione ai fenomeni fisiologici noti molto spesso mal si combina con una riproduzione fedele dei tempi e dei modi dell'esercizio sportivo, per sua natura soggetto ad elevata variabilità.

Forse è proprio il continuo tentativo di superare questa antitesi strutturale che rende la valutazione funzionale un tema sempre presente negli appuntamenti congressuali e che garantisce l'interesse vivace da parte di fisiologi, medici dello sport ed allenatori, spesso in acceso contrasto sulla migliore strada da seguire, per raggiungere il risultato di una valutazione che coniughi precisione scientifica ed utilità sportiva. Giova ricordare a questo punto la conclusione cui era giunto qualche anno fa un grande esperto del settore, dopo aver eseguito un'ampia rassegna degli studi sull'argomento, " ...sfortunatamente esistono altrettante procedure del test da sforzo quanti sono i fisiologi che le eseguono...." (Jones, N.L., 1988).

In tale contesto, risulta arduo delineare un quadro, per quanto sintetico e certamente lacunoso, dello stato delle conoscenze in questo settore, anche alla luce delle continue evoluzioni che la tecnologia propone, in grado di presentare in modo bilanciato i due punti di vista e di indirizzare il medico nella scelta valutativa più opportuna.

In questa sede si è preferito quindi richiamare i principi ed i meccanismi fondamentali alla base dei vari tipi di protocollo, arricchiti da alcune esemplificazioni che sono sembrate maggiormente significative, dai quali ognuno sarà in grado di trarre le linee guida personali da applicare e da sperimentare nella specificità delle proprie condizioni di lavoro.

Criteri generali dei protocolli di valutazione

Finalità della valutazione

Prima di iniziare ad approfondire il tema della valutazione funzionale dell'atleta è importante sottolineare che l'esatta definizione della finalità che s'intende raggiungere con la prova valutativa è alla base di ogni scelta che dovrà essere eseguita in ordine al tipo di test, al protocollo da usare, agli ergometri ed ai sistemi di misura. E' certamente impossibile indicare a priori un tipo di valutazione, per quanto precisa e tecnologicamente avanzata, che sia in grado di essere lo standard ideale per l'atleta, anche se la scelta è ristretta solo ad una certa tipologia di sportivo. Il compito del medico è principalmente quello di essere a conoscenza delle indicazioni e dei limiti (e dei costi in attrezzatura ed in tempo di esecuzione) dei vari protocolli così da poter effettuare la migliore scelta possibile che risulterà nella maggior parte dei casi un compromesso tra le richieste fisiologiche e quelle sportive.



Inserto 1 Principi generali di metodologia

In termini generali la valutazione funzionale ha lo scopo di individuare le risposte dei diversi apparati dell'organismo allo sforzo fisico per determinarne l'adeguatezza e per esplorare i valori limite sia in termini qualitativi che quantitativi. Nel caso dell'atleta queste misure sono quasi sempre finalizzate anche a comprendere i limiti funzionali del soggetto valutato, cercando di individuare i parametri fisiologici indicativi dei meccanismi coinvolti nello sport praticato, sia in termini assoluti (confronto con altri atleti) che in relazione a diversi periodi di allenamento (valutazione della risposta a stimoli specifici).

Pertanto, un protocollo di valutazione funzionale deve essere in grado di scomporre la prestazione sportiva in un certo numero di singoli fattori il cui ruolo nel determinare la prestazione stessa dovrebbe essere ben conosciuto.

Ergometri

Le attrezzature usate in laboratorio per simulare l'esercizio fisico sono genericamente definite ergometri, caratteristica generale degli ergometri è di permettere la quantificazione del lavoro meccanico svolto dall'atleta e di riprodurre, in modo più o meno fedele, la biomeccanica del gesto sportivo. Questi due requisiti sono senza dubbio alla base di una corretta progettazione di una prova valutativa e condizionano pesantemente l'utilizzazione dei risultati, ma non sempre sono rispettati. Molti studi hanno dimostrato che il risultato dell'atleta in un test è condizionato dal tipo di ergometro usato e che i migliori risultati si ottengono con gli ergometri più specifici (Dal Monte A., 1983, Dal Monte et al., 1992; Rundell, 1995).

Esistono tuttavia notevoli problemi pratici legati alla disponibilità su larga scala di questo tipo di attrezzature così nella maggior parte dei casi i centri di valutazione devono fare riferimento a tre tipologie principali di ergometri che hanno la maggiore diffusione:

- a) ergometri che simulano la locomozione sulla bicicletta: **cicloergometri**
- b) ergometri che simulano la corsa e il cammino: **nastri trasportatori o treadmill**
- c) ergometri che simulano il lavoro con le braccia: **armoergometri**

Cicloergometro

E' in assoluto l'ergometro più diffuso perché consente un'esatta quantificazione del carico, è di facile utilizzazione e, quindi, adatto con qualsiasi tipo di soggetto, ha un costo abbastanza contenuto ed un ingombro limitato. La forza esercitata sui pedali mette in movimento un volano che può essere frenato meccanicamente o con un sistema elettromagnetico. Questo secondo sistema, ormai diffuso in quasi tutti i modelli, consente di regolare elettronicamente il carico di lavoro e di mantenerlo costante, anche in presenza di variazioni della frequenza di pedalata. Inoltre, è possibile programmare la durata e l'intensità del carico di lavoro, le loro eventuali variazioni e costruire in questo modo protocolli di diversa complessità senza richiedere all'atleta una partecipazione attiva per modificare i livelli di lavoro. I carichi di lavoro massimali, generabili dal sistema elettromagnetico, e l'intervallo (o "range") entro il quale l'ergometro presenta un buon funzionamento (definito range di linearità) sono diversi in funzione del modello e spesso ne condizionano il costo.

I cicloergometri di prevalente uso clinico non superano i 400 watts, che rappresentano un livello di carico di lavoro insufficiente per lo studio degli atleti per i quali è opportuno poter disporre di un livello massimo di almeno 500-600 watts. La linearità di risposta, ovvero il mantenimento del carico impostato anche in presenza di significative variazioni della frequenza di pedalata, è un secondo aspetto cruciale da tenere sempre in considerazione, tenuto conto che molti ciclisti pedalano abitualmente sopra le 100 pedalate al minuto; in genere, la linearità è buona tra le 40 e le 100 pedalate al minuto (o rpm). Anche la frazione minima d'incremento programmabile deve essere valutata, soprattutto per poter eseguire test incrementali a rampa o simulazioni in laboratorio del test di Conconi.



Inserto 2

Il Test Conconi: confronto tra laboratorio e campo

Il lavoro meccanico esterno corrisponde al prodotto tra numero di pedalate e resistenza media offerta durante un ciclo di rotazione. Anche la pedalata a resistenza nulla (unload cycling) corrisponde ad un certo incremento del metabolismo rispetto ai valori di riposo dovuto all'energia necessaria per mettere in movimento gli arti inferiori (lavoro interno); questo lavoro, essendo modesto in rapporto al lavoro esterno, non è valutato nelle misurazioni della potenza meccanica. Tuttavia alcuni autori suggeriscono di far iniziare il test con 3 minuti di pedalata senza carico esterno e sottrarre il consumo di ossigeno relativo dalle curve $V'O_2$ /carico (Wasserman et al., 1994).

La massa muscolare implicata è principalmente quella degli arti inferiori con una partecipazione minore dei muscoli del tronco e degli arti superiori. E' importante ricordare che soggetti non abituati a pedalare o con scarsa muscolatura delle gambe e della coscia possono raggiungere precocemente l'affaticamento muscolare nel corso di un protocollo su cicloergometro.

Per ridurre tale rischio è importante curare la posizione del soggetto sull'ergometro, la comodità della sella (nel punto più basso del pedale la gamba deve essere quasi completamente estesa) e sollecitare l'atleta a mantenere frequenze di pedalata elevate poiché una riduzione della cadenza (in un cicloergometro elettromagnetico) provocherà un incremento immediato e proporzionale del carico per singolo ciclo con conseguente incremento della fase anaerobica nella spinta del pedale. L'aiuto che può essere offerto da una ferma impugnatura del manubrio dovrà essere sfruttato solo nelle fasi finali del test e sarà da evitare nel caso s'intenda misurare anche la pressione arteriosa al braccio.

Treadmill o nastro trasportatore

Storicamente è l'ergometro per eccellenza perché riproduce un gesto naturale, il cammino o la corsa, che tutti le persone conoscono e sono in grado di eseguire. In realtà la locomozione sul treadmill, in particolare la corsa, non è così facile e richiede anche per il podista esperto un certo periodo di ambientamento. E' quindi opportuno che un test sul treadmill preveda almeno 10' di prova libera, iniziando a velocità basse con una modesta pendenza (3-5%), che rende più agevole per l'atleta capire come modificare l'appoggio del piede rispetto alla corsa sul terreno. Tuttavia anche un atleta ben adattato potrà presentare delle difficoltà a velocità superiori ai 18-19 km h⁻¹, per le quali sarà necessario sempre un'attenta assistenza, per evitare cadute o per prevenire il distacco delle connessioni tra l'atleta e la strumentazione per le misure metaboliche. La crescente diffusione dei treadmill nelle palestre e nei centri fitness ha aumentato il numero degli atleti che hanno una buona esperienza nell'uso di questo ergometro.

Le prestazioni richieste ad un nastro trasportatore idoneo alla valutazione funzionale di atleti sono una velocità massima di 22-25 km h⁻¹ ed una pendenza non inferiore al 25%. Il controllo dell'uniformità della velocità è un punto critico in quanto atleti pesanti tendono a frenare il nastro nella fase di appoggio e quindi a generare una alternanza tra decelerazioni ed accelerazioni invece di una velocità costante. Per contrastare questo problema la potenza del motore dovrà essere di 2,5/3 kW. Un secondo aspetto importante è la lunghezza del tappeto che non dovrà essere troppo ridotta (inferiore ai 2mt.) per non mettere in difficoltà gli atleti alti dotati di ampia falcata. E' comunque buona norma mettere un segno visibile nella parte anteriore del bordo laterale che possa fungere da punto di riferimento per l'atleta il quale eviterà così di retrocedere troppo con l'incrementare della velocità rischiando un appoggio esterno al tappeto che provocherebbe sicuramente una caduta con conseguenze anche gravi.

Tutti i treadmill devono essere dotati di braccioli esterni, che permettano all'atleta di sorreggersi in caso di difficoltà, e di un pulsante di blocco rapido facilmente raggiungibile dal soggetto o dall'operatore da usare in caso di bisogno. Si ricordi, tuttavia, che qualsiasi tipo di appoggio messo in atto durante la prova altera i valori metabolici e ventilatori, in quanto riduce il carico di lavoro; pertanto, si deve invitare ogni soggetto, fin dalle prime prove, ad imparare a correre senza appoggio esterno.

La necessità di un ausilio per mantenere l'equilibrio, anche alle alte velocità, deve essere considerato come uno dei criteri di interruzione del test. Unica eccezione consentita è l'appoggio della mano per permettere il prelievo del sangue necessario per la determinazione dell'acido lattico, in questo caso la manovra sarà effettuata dopo il completamento del periodo di tempo stabilito per ciascun carico, cioè nei primi secondi del nuovo carico in modo da non alterare i valori di fine periodo, che dovrebbero essere i più indicativi della condizione di adattamento al carico. (Tab.1).

Tab. 1 Ergometri a confronto.

	Treadmill	Ciclo	Armo
V'O _{2 max}	100%	80-85 %	65-75 %
Fatica locale	Ridotta	Medio-Elevata	Elevata
Specificità	Bassa	Media	Alta
Apprendimento	Difficile (corsa)	Facile	Media diff.
Facilità d'uso operatore	Buona	Ottima	Buona
Trasportabilità	Difficile	Possibile	Possibile
Costo (range in milioni di lire)	15-50	4-6	3-5

Ergometri per le braccia

Il principio di funzionamento è analogo a quello del cicloergometro, in questi sistemi il volano centrale è azionato dalle braccia. Tramite il remoergometro si può simulare il gesto della remata, in questo caso il volano lavora durante la trazione mentre la fase di ritorno avviene passivamente.

Altri tipi di ergometri sono specifici per la riproduzione dell'azione delle braccia nello sci di fondo o simulano la trazione in acqua del crawl. Tutti questi ergometri richiedono uno specifico allenamento con gli arti superiori prima di affrontare un test che risulti significativo, poiché il livello di affaticamento localizzato alle braccia ed alle spalle è particolarmente accentuato.

I valori di consumo di ossigeno massimale sono sensibilmente inferiori a quelli misurati sul treadmill o su cicloergometro anche se atleti specificamente allenati possono ottenere valori notevoli soprattutto se il movimento utilizzato consente di attivare anche i muscoli del dorso e dell'addome (es. ergometri per il kayak ed il canottaggio) oppure quando il gesto richiede l'uso combinato degli arti inferiori e superiori (ergometri per lo sci di fondo).

Nell'uso comune l'ergometro per le braccia più utilizzato è il cosiddetto ergometro a manovella, cicloergometro con le braccia, che è proposto per la valutazione cardio-respiratoria dei disabili che non hanno la possibilità di un adeguato uso degli arti inferiori.

Per i paraplegici che praticano attività sportive che richiedono di ottenere la massima velocità sulla carrozzina (es. le specialità dell'atletica leggera) sono stati recentemente proposti particolari adattamenti con l'adozione di ergometri a rullo sui quali è possibile posizionare la carrozzina usata nelle competizioni (Palmieri, 1998).

Protocolli standard

I numerosi protocolli, proposti e convalidati nell'ambito della valutazione funzionale, possono essere suddivisi in due categorie principali:

1) *test a carico costante*

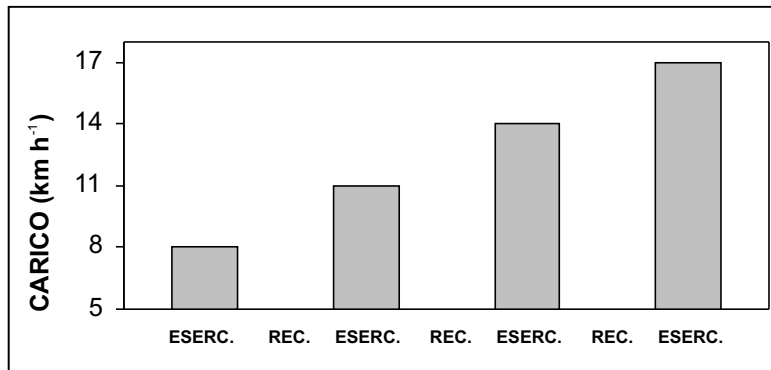
2) *test a carico incrementale*

Questa divisione si riferisce alla modalità con cui il soggetto è portato al livello di sforzo richiesto, al fine di ottenere la risposta metabolica e cardio-respiratoria attesa in funzione dello scopo del test di valutazione.

Il test a carico costante

Definito anche ad onda quadra) consiste in un esercizio nel quale il livello di lavoro non varia dall'inizio alla fine di ogni frazione. Può essere eseguita una singola prova (ad esempio negli studi di cinetica degli scambi ventilatori) oppure, dopo un adeguato periodo di recupero in grado di riportare il soggetto quasi a condizioni basali, si effettua un secondo test ad un carico superiore al precedente (vedi fig. 1).

Fig. 1 Esempio di un protocollo di test a carichi separati da recuperi (ad onda quadra). La durata di ogni carico è tale da permettere il raggiungimento di uno steady state, l'intervallo di recupero può essere anche inferiore dopo i carichi di lavoro più bassi.

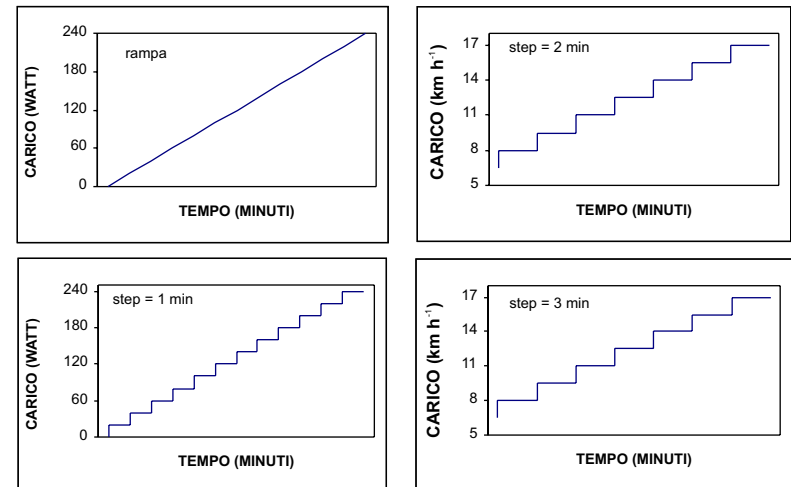


Questo tipo di protocollo permette di definire con maggiore precisione la richiesta metabolica per ogni livello di lavoro; infatti, si può calcolare esattamente il deficit di ossigeno nella fase iniziale della prova ed il livello di lattacidemia prodotto al termine dello sforzo. La durata di una singola prova può essere variabile ma non dovrebbe mai essere inferiore ai 5 minuti ed il periodo di recupero seguente di almeno 6-10 minuti. In questo modo per determinare un massimo consumo di ossigeno è necessario eseguire varie prove ed il tempo complessivo è sempre superiore ai 50-60 minuti, inadatto quindi a soggetti che non siano molto allenati e motivati ad un impegno psico-fisico protratto nel tempo. Questa modalità di protocollo è tuttavia indispensabile per effettuare le misure della cinetica degli scambi gassosi e/o del costo energetico di specifiche potenze meccaniche, inoltre può essere anche un buon protocollo per la determinazione o la verifica della soglia anaerobica (vedi "Definizione" del Capitolo "Test per la misurazione della soglia anaerobica").

Il test incrementale

Definito anche triangolare) prevede invece che il carico di lavoro venga incrementato in modo continuo senza pause di riposo; la durata dei singoli carichi (step) e l'entità dell'incremento dei carichi caratterizza i diversi tipi di protocolli incrementali alcuni dei quali sono mostrati nella figura 2.

Fig. 2 Esempi di diversi tipi di protocolli incrementali senza intervalli di recupero (triangolari). Le ragioni per definire durata di ogni singolo livello di lavoro ed incremento del carico, in rapporto alle finalità della valutazione ed al soggetto esaminato, sono descritte nel testo.



I protocolli proposti inizialmente prevedevano che ogni carico durasse almeno 2 o 3 minuti (vedi per esempio i protocolli classici di Bruce, Naughton, ed il protocollo standard cardiologico) mentre il gruppo di Whipp e Wasserman ha suggerito che la durata del singolo carico non dovrebbe superare il minuto (Wasserman et al., 1994), arrivando a indicare un protocollo di incremento continuo del carico nel periodo di tempo (definito "incremento a rampa") ,ovvero l'aumento di carico per ogni livello è suddiviso, attraverso un controllo elettronico dell'ergometro, nell'intero periodo di tempo e non somministrato bruscamente nei primi secondi.

Vi sono differenze teoriche e pratiche tra le due modalità: la durata di due o tre minuti permette di avere, almeno per i carichi più bassi, un buon livello di steady state e quindi di poter attribuire ad ogni carico i relativi valori metabolici mentre nel protocollo più breve non si raggiunge mai una vera condizione di stato stazionario.

Il test con step di un minuto ha una durata in genere inferiore ai 10 minuti e secondo i suoi sostenitori questo è il tempo ideale per una misura di $\dot{V}O_2$ di picco, inoltre la determinazione della soglia anaerobica con il metodo ventilatorio sarebbe, con questo protocollo, più accurata.

Anche l'entità dell'incremento ha un ruolo cruciale nella buona riuscita del test e dipende soprattutto dalle caratteristiche dell'atleta da valutare. L'incremento usato dovrà essere tale da non imporre dei salti eccessivi di potenza meccanica o dei tempi esagerati di durata del test (salvo che il soggetto non sia ben abituato alle prove di resistenza).

Criteri generali per l'esecuzione dei test

Preparazione al test

Le principali precauzioni da osservare riguardano la scelta dell'orario che dovrebbe essere quello abituale della gara, dell'allenamento o dell'attività fisica quotidiana, e l'indicazione preventiva di presentarsi alla prova dopo due giorni di allenamento blando e a distanza di almeno 5 giorni dall'ultima competizione. La sede del test dovrebbe avere una temperatura intorno ai 15-18 gradi ed un'adeguata aerazione che favorirà la dispersione del calore prodotto dall'atleta. Un periodo di riscaldamento di almeno 15', da effettuarsi sull'ergometro utilizzato per la prova e l'adattamento al set-up sperimentale (in particolare la maschera o il boccaglio) completeranno la fase dei preparativi.

Scelta dell'ergometro

La scelta dell'ergometro è sempre stato un punto cruciale della valutazione funzionale (Shepard, 1985); fortunatamente, se limitiamo il campo alla valutazione dell'atleta, il compito è parzialmente facilitato in quanto la valutazione dovrà avvenire con l'ergometro che più si avvicina al gesto tipico dello sport praticato. Solo motivi molto particolari dovrebbero indurre a valutare un ciclista sul treadmill od un podista sul cicloergometro. Tuttavia vi sono sport per i quali non è immediato individuare lo strumento adatto oppure la mancanza dell'ergometro specifico nel laboratorio può riproporre la questione.

In generale se la corsa o il cammino rappresentano la modalità di locomozione prevalente nello sport in questione, il treadmill sarebbe da preferire al cicloergometro purché vi siano le condizioni organizzative per un buon periodo di adattamento. In soggetti molto pesanti (peso ponderale > 90kg) e non allenati potrebbe risultare più agevole il test su cicloergometro anche perché è molto probabile riscontrare un'inadeguatezza tecnica del nastro trasportatore (vedi paragrafo precedente). Una scelta alternativa potrebbe prendere in considerazione un test di cammino con incremento progressivo della pendenza.

Criteri di sospensione

La definizione dei criteri per l'interruzione della prova di valutazione dipende in larga misura dallo scopo del test stesso e dal soggetto che vi si sottopone. Se la valutazione è finalizzata alla determinazione del massimo consumo di ossigeno, il raggiungimento del plateau di $\dot{V}O_2$ (incremento di $\dot{V}O_2$ nell'ultimo carico inferiore al 3%) è il criterio maggiore di interruzione, qualora questo sia raggiunto prima dell'esaurimento del soggetto (vedi "Definizione" del capitolo "Test per la misurazione del massimo consumo di ossigeno").

Poiché tuttavia in una grande percentuale di casi tale livello non è raggiunto, è necessario osservare un criterio che preveda la presenza di almeno due tra le seguenti condizioni:

- a) il riscontro di un valore di lattacidemia superiore a 8 mM
- b) il quoziente respiratorio superiore a 1.08
- c) la frequenza cardiaca superiore a ($HR_{max} \text{ teorica} - 10$ battiti)

La tendenza attuale è peraltro quella di far proseguire comunque la prova fino all'esaurimento completo del soggetto e di valutare a posteriori il raggiungimento del $\dot{V}O_{2max}$ oppure del $\dot{V}O_2$ di picco. Tale approccio prevede di ottenere una notevole adesione del soggetto alla procedura sperimentale, attraverso un'adeguata motivazione sia prima sia durante la prova, per evitare che l'esaurimento avvenga per una ridotta disponibilità a sopportare il disagio psico-fisico legato all'esercizio intenso.

Una brusca e precoce sospensione volontaria del test da parte del soggetto a causa di uno stato di esaurimento organico che non corrisponde ai criteri fisiologici di raggiungimento di massimo sforzo, indica la mancata adesione (o "compliance") dello stesso al test oppure un errore nella scelta dell'ergometro o del protocollo e, pertanto, suggerisce l'opportunità di ripetizione della prova.

Naturalmente il test dovrà essere interrotto anche in caso di comparsa di segni clinici rilevanti quali: rilievi elettrocardiografici di insufficienza coronarica o di aritmie, dolori toracici, valori pressori eccessivi, senso di vertigine etc. Particolare attenzione alla comparsa di questi segni dovrà essere posta nel caso di valutazione di soggetti con patologie, di anziani, di bambini.

A questo proposito è necessario che il personale che conduce il test (medico e tecnico), a completamento della fase di preparazione, concordi con il soggetto una modalità pratica di comunicazione dei sintomi ed anche le modalità da mettere in atto per la sospensione volontaria del test da parte del soggetto in quanto l'apparato di misura (maschera o boccaglio) rende difficoltosa la comunicazione verbale.

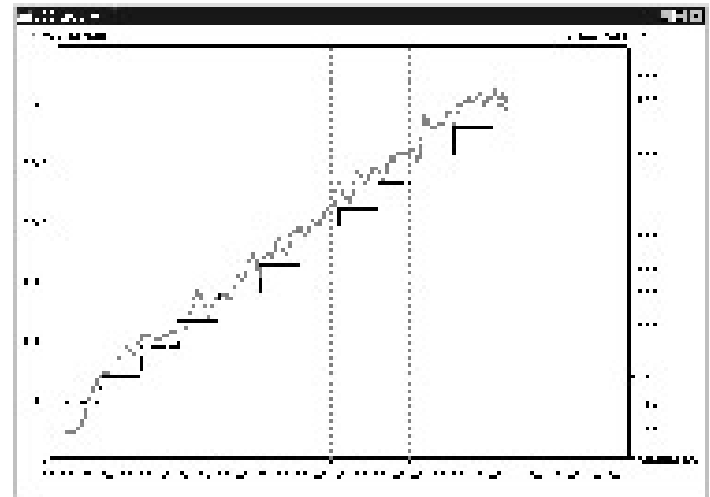
Va anche ricordato che non è mai opportuna una brusca e completa sospensione del carico ma è preferibile che l'atleta riduca il lavoro muscolare subito ad un livello medio-basso e quindi che interrompa lo sforzo in 5-6 minuti con un progressivo calo del carico fino a zero.

Test per la misura del massimo consumo di ossigeno

Definizione

Il massimo consumo di ossigeno ($\dot{V}O_{2max}$) corrisponde al livello più elevato raggiungibile da un soggetto nell'utilizzazione dell'ossigeno per l'ossidazione dei substrati energetici nel corso di un esercizio muscolare. Per poter assumere con una significativa precisione il raggiungimento di un tale livello è necessario che si osservi un mancato incremento dei valori di $\dot{V}O_2$ in presenza di un incremento dell'impegno muscolare cioè della potenza meccanica richiesta. Questo andamento della $\dot{V}O_2$ in funzione del carico, riferito ad un classico test incrementale, è noto come *plateau* (figura 3) ed è peraltro una condizione che non è raggiunta agevolmente e che, in una percentuale rilevante di test, non viene osservata nonostante sia stata messa in atto una corretta esecuzione della prova.

Fig. 3 Test incrementale triangolare (1 min x 20W) per la determinazione del massimo consumo di ossigeno. Il consumo di ossigeno sale proporzionalmente con il carico fino ai due carichi finali nei quali il valore medio è identico ($\dot{V}O_{2plateau}$) identificando il raggiungimento del $\dot{V}O_{2max}$, il soggetto non ha completato l'ultimo carico per esaurimento a 10" dal termine del periodo.



Molti autori suggeriscono in questo caso di considerare il valore più alto di $\dot{V}O_2$ misurato come picco di $\dot{V}O_2$ ($\dot{V}O_{2peak}$) con un significato in pratica quasi sovrapponibile al $\dot{V}O_{2max}$.

Modalità di esecuzione

Secondo quanto enunciato nel paragrafo precedente per ottenere con precisione il valore di massimo consumo di ossigeno si deve sottoporre il soggetto ad una prova incrementale progressiva fino al raggiungimento di un impegno muscolare in grado di stimolare gli aggiustamenti cardiaci e ventilatori che portano al massimo trasporto ed utilizzo dell'ossigeno da parte delle fibre muscolari.

Per ottenere questo risultato lo sforzo non dovrà durare per un tempo eccessivo ma non potrà essere raggiunto in tempi inferiori agli 8-10 minuti.

Nei casi in cui sia già noto un valore approssimativo del massimo carico sostenibile aerobicamente, si potrà usare anche una singola prova ad onda quadra e ad un valore leggermente superiore del massimo previsto, che il soggetto dovrà mantenere per almeno 3 minuti. In entrambi i casi sarà necessario una buona fase di riscaldamento (10-15 min) ed un perfetto adattamento all'ergometro ed alle procedure sperimentali. I protocolli che possono essere usati con i diversi ergometri sono riassunti nelle tabelle 2 e 3. La scelta del protocollo sarà condizionata dalla finalità specifica della valutazione (solo $\dot{V}O_{2\max}$ oppure anche soglia anaerobica, interesse a conoscere anche valori di costo energetico sotto soglia, etc.) oltre che dalle caratteristiche del soggetto, dal suo grado di allenamento e di esperienza nelle procedure di valutazione. Crediamo opportuno consigliare l'adozione di un test standard (per ergometro e per gruppo di soggetti) per tutti coloro che si sottopongono per la prima volta all'osservazione.

Ciò consentirà di avere la possibilità di confrontare i dati di partenza con valori ricavati dalla letteratura e di crearsi anche una personale base dati di riferimento da usare per individuare i consigli più appropriati potendone facilmente valutare gli effetti (Tabelle 2 e 3).

Tab.2 Protocolli incrementali standard sul treadmill

Autore	Protocollo
Naughton	Step di 3 minuti di lavoro + 3 minuti di recupero Incremento sia di velocità sia di pendenza
Astrand	Step 2 minuti Velocità costante 8 mph incremento pendenza 2.5%
Bruce	Step 3 minuti Incremento pendenza e velocità
Balke	Step 1 minuto Velocità 3 mph, 1 min. pendenza 0%, 1 min. 2%, quindi incr. 1%
Saltin-Astrand	Step 3 minuti Velocità 10 Km h ⁻¹ , incremento pendenza 2.5%
Dal Monte	Step 2 minuti Pendenza 0%, velocità 8 Km h ⁻¹ , incremento 2 Km h ⁻¹
Schena	Step 1 minuto Pendenza 2%, velocità 8 Km h ⁻¹ incremento 1 Km h ⁻¹

Tab. 3 Protocolli cicloergometro.

Autore	Protocollo
Mc Dougall (sedentari)	step 3 min Carico iniziale 25 w -incrementi 25 w
Wassermann (patologie)	step 1 min Carico iniziale 0 w -incrementi 5- 15 - 30 w *
Mc Dougall (atleti)	step 3 min Carico iniziale 35 w -incrementi 35 w
Dal Monte - Faina (ciclisti m.)	step 2 min Carico iniziale 50 w -incrementi 50 w
Dal Monte - Faina (ciclisti f.)	step 2 min Carico iniziale 35 w -incrementi 35 w
Schena (ciclisti-triatleti)	step 1 min Carico iniziale 100 w [#] -incrementi 25 w

* in relazione a sesso, età e livello patologia

carico iniziale per 5 minuti

In letteratura è possibile trovare un numero veramente ampio di proposte di test specificamente studiati e sperimentati per diversi tipi di sport. Come è già stato evidenziato in precedenza la specificità del protocollo riduce la possibilità di confronto ma migliora la capacità di previsione della prestazione e la possibilità di usare il test allo scopo di effettuare una verifica mirata degli effetti di allenamento, materiali, etc. Un'ampia rassegna dei protocolli utilizzabili nei diversi tipi di attività sportive è presentata e discussa in una recente pubblicazione curata da Antonio Dal Monte e Marcello Faina (1999).

Criteri interpretativi

Il valore massimo di consumo di ossigeno raggiunto nel corso del test, in genere durante l'ultimo carico di lavoro, è il principale parametro preso in considerazione nella valutazione di un test mirato ad identificare la potenza aerobica di un soggetto.

Tale valore può corrispondere al $\dot{V}O_2$ massimo oppure al picco di $\dot{V}O_2$ in rapporto al fatto che siano o meno osservabili le condizioni illustrate nel paragrafo relativo alla definizione del massimo consumo di ossigeno.

in letteratura per identificare la funzionalità cardio-respiratoria e metabolica sia in soggetti sedentari, sia in atleti ed anche in pazienti affetti da diversi tipi di patologie.

Il $\dot{V}O_2$ può essere espresso in valore assoluto (litri per minuto) oppure in relazione alla massa (peso corporeo totale o peso della massa magra). Nel primo caso sarà individuata la potenza aerobica complessiva del soggetto, mentre la relazione con il peso mette in luce la potenza specifica, cioè la capacità di utilizzare l'ossigeno da parte di ogni unità di massa.

Negli sport in cui lo sforzo è eseguito prevalentemente senza variazioni istantanee di energia potenziale, la potenza globale è l'indicatore più significativo per prevedere le qualità sportive (canottaggio, pattinaggio, ciclismo in pianura) mentre il valore espresso per kg di peso acquista maggior rilievo in tutte quelle attività nelle quali si osserva uno spostamento del centro di gravità (corsa, ciclismo in salita, sci di fondo). I valori medi di riferimento per il $\dot{V}O_{2\max}$ sono variabili a seconda delle caratteristiche della popolazione esaminata (età, sesso, attività fisica abituale, etc.) e vengono generalmente espressi in riferimento al valore normalizzato per il peso (vedi tab.4).

Tab. 4 Valori indicativi per $\dot{V}O_{2max}$ in atleti praticanti diversi sport

Attività sportiva	Sesso	Ergometro	$\dot{V}O_{2max}/kg$ ($ml\ Kg^{-1}\ min^{-1}$)
Mezzofondo	Donne Uomini	Treadmill Treadmill	67.9 70
Maratona	Donne Uomini	Treadmill Treadmill	71.8 72
Ciclismo strada	Donne Uomini	Cicloergometro Cicloergometro	66.2 78.8
Ciclismo pista	Uomini	Cicloergometro	81
Sci di fondo	Donne Uomini	Treadmill Treadmill	73.7 82.5
Pattinaggio rotelle	Donne Uomini	Cicloergometro Cicloergometro	65.7 73.8
Pattinaggio ghiaccio	Uomini	Treadmill	68.4
Pallavolo	Uomini	Treadmill	52.5
Pallacanestro	Uomini	Treadmill	53.8
Tennis tavolo	Uomini	Treadmill	55
Tennis	Uomini	Treadmill	53.4
Triathlon	Uomini	Treadmill Cicloergometro	70.9 60

(da Dal Monte - Faina 1999, modificata)

E' quindi possibile confrontare i valori di un singolo test con dati di riferimento presenti in letteratura, ricordando sempre che il confronto è realizzabile in modo univoco, solo tra prove di valutazione eseguite a parità di protocollo e condizioni ambientali.

Altri parametri fisiologici di rilievo che si possono considerare al termine delle prove massimali sono la ventilazione polmonare, la frequenza cardiaca, il polso di ossigeno ed il quoziente respiratorio, la saturazione dell'emoglobina.

Va sottolineato che l'importanza di questi parametri è senza dubbio maggiore ai livelli di lavoro sottomassimale in quanto forniscono informazioni sull'efficienza dell'adattamento ad intensità di sforzo che possono essere mantenute per tempi più prolungati rispetto al massimo consumo di ossigeno.

La *ventilazione polmonare* raggiunta alla fine di un test incrementale dipende non solo dalle richieste metaboliche ma anche dallo stimolo specifico determinato dall'acidosi indotta dalla produzione di acido lattico. Nel soggetto normale e nell'atleta, la ventilazione raggiunta al massimo dello sforzo è sempre inferiore alla massima ventilazione volontaria e non rappresenta un fattore limitante al raggiungimento della massima prestazione muscolare.

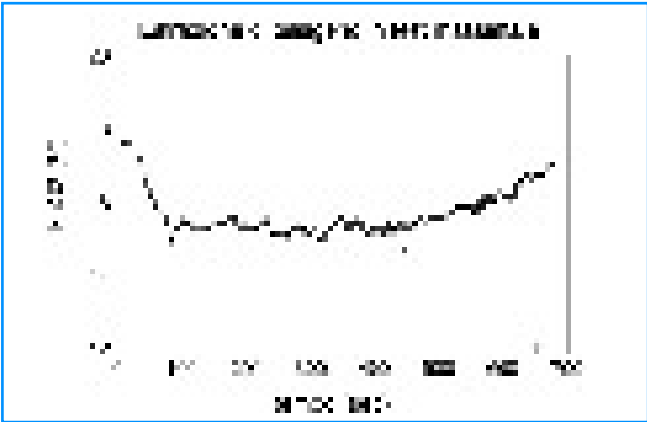
La *frequenza cardiaca* (HR) rilevata nella fase finale del test per la misura del massimo consumo di ossigeno è uguale o lievemente inferiore alla frequenza cardiaca massima raggiungibile dalla persona in esame anche se un numero considerevole di atleti non riesce ad ottenere durante le prove in laboratorio gli stessi valori misurati nel corso di eventi agonistici. Per questa ragione è preferibile chiedere all'atleta prima del test i valori di HR raggiunti abitualmente durante gli allenamenti più intensi ed utilizzarli come HR di riferimento per la determinazione indiretta del raggiungimento di un valore di $\dot{V}O_{2peak}$.

La *saturazione dell'emoglobina* è un parametro scarsamente usato nelle prove di valutazione funzionale di persone sane o di atleti, mentre è largamente considerato nei test per soggetti patologici. Inoltre è ancora relativamente limitato il numero di apparecchiature che propongono questa misura nella configurazione standard.

Recenti studi compiuti presso il dipartimento di Fisiologia dell'università di Ginevra (Ferretti et al., 1997) hanno tuttavia messo in evidenza come proprio gli atleti presentino spesso dei consistenti livelli di desaturazione ai carichi massimali, che vanificherebbero consistenti incrementi di gittata cardiaca, e come questo possa essere anche correlato con la prestazione massimale.

Stante la ridotta disponibilità di dati non è possibile proporre, al momento attuale, un uso pratico di questo parametro quanto l'opportunità di cominciare a valutare anche questo parametro e di correlarne l'evoluzione nell'atleta con un miglioramento dell'accoppiamento tra adattamento polmonare e circolatorio. Il significato e l'interpretazione dei parametri misurati durante i livelli sottomassimali dipende in misura notevole dal tipo di protocollo adottato. Infatti, i dati in questione possono essere presi in considerazione solo se la durata di ogni singolo carico è tale da creare una condizione di stato stazionario. In questo caso è utile osservare il comportamento della *frazione espiratoria dell'ossigeno* (F_{EO_2}) che, nel soggetto ben adattato all'esercizio, esprime in modo molto preciso l'entità dell'estrazione di O_2 da parte dei muscoli e la capacità di scambio dei polmoni.

Fig. 4 Andamento della frazione espiratoria dell'ossigeno (F_{eO_2}) in un test incrementale: si noti la rapida discesa all'inizio del lavoro muscolare, la fase centrale stazionaria che identifica la capacità di resistenza dell'atleta ed il brusco aumento concomitante con il superamento della soglia anaerobica.



Poiché quest’ultima, nei livelli di esercizio lieve e moderato, non è quasi mai limitante, la F_{eO_2} a questi carichi di lavoro rappresenta un buon indice per valutare gli adattamenti aerobici di base, la cosiddetta **resistenza aerobica**, che sarà tanto migliore quanto più basso sarà il valore di frazione espiratoria. Con l’incremento del livello di lavoro la maggiore stimolazione ventilatoria porterà ad una riduzione dell’estrazione (ovvero un livello maggiore di F_{eO_2}) fino ad un rapido incremento di tale parametro nei carichi superiori alla soglia anaerobica (Fig. 4)

Precauzioni ed avvertenze

Il test per la misura del $\dot{V}O_{2\max}$ è una delle prove di valutazione funzionale più impegnative per i soggetti e per gli operatori, non deve quindi stupire se vi sono diverse possibilità di cattiva od imperfetta esecuzione che sono riassunte nella tabella 5.

Come è già stato evidenziato in precedenza il maggior errore in cui si può incorrere nell’esecuzione di un test per la misura del massimo consumo di ossigeno è rappresentato da un **protocollo scorretto** o dall’uso di un **ergometro non adeguato**. Una salita troppo brusca della ventilazione fin dai primi carichi, una durata troppo breve del test, l’insorgenza di forti dolori muscolari sono tutti indicatori che devono mettere sull’avviso l’operatore del possibile errore cui è andato incontro. In tutti questi casi è necessario ripetere il test poiché non sono possibili correzioni sui dati registrati. Il secondo evento più frequente è una **scarsa compliance del soggetto** (il cui motivo può anche essere ricondotto alle cause già evidenziate), da cui deriva il mancato raggiungimento di un “vero” $\dot{V}O_{2\max}$ o $\dot{V}O_{2\text{peak}}$ *

Tab. 5 Motivi comuni di errore nel test di misura del $\dot{V}O_{2\max}$

Motivi comuni di errore nel test di misura del $\dot{V}O_{2\max}$
Errore nei carichi di lavoro
Perdita di aria dal boccaglio/maschera
Alterazione del sistema di misura del flusso di aria (saliva, corpi estranei...)
Errore di taratura degli analizzatori (O_2/CO_2) • Calcolo del ritardo • Attendibilità gas di riferimento • Breve tempo di riscaldamento
Saturazione della capacità di dispersione del tubicino in nafion

La **motivazione** deve essere stimolata e richiesta prima del test nonché sostenuta nel corso della prova, anche con il coinvolgimento di altre persone presenti al test (tecnici, allenatori, genitori, amici...) senza che siano peraltro perdute di vista le misure di sicurezza e di monitoraggio descritte in precedenza.

Fra queste va aggiunta anche la condizione di **overtraining**, a volte misconosciuta, che provoca un sostanziale incremento dei valori di consumo ai valori sotto massimali e l’incapacità di raggiungere i carichi di lavoro abituali e di conseguenza una forte riduzione dei parametri funzionali.

Un paragrafo a parte meritano le avvertenze da seguire per le verifiche del **buon funzionamento delle attrezzature usate**, un evento assolutamente possibile anche con le strumentazioni più sofisticate e moderne. Infatti, proprio l’evoluzione tecnologica se da un lato ha accresciuto la sensibilità e la semplicità della misura dall’altro ha aumentato l’automazione delle procedure escludendo l’operatore dalla possibilità di verifica diretta dei dati misurati e presentando generalmente solo i valori calcolati finali.

Durante ed al termine del test si dovrà sempre aver cura di verificare che i dati registrati seguano *fisiologicamente* il protocollo proposto, cercando nei valori di ventilazione e di concentrazione dei singoli gas l’eventuale ragione di valori apparentemente incongrui. Va ricordato che molti tra gli attuali programmi di gestione consentono di correggere eventuali errori di misura ma tale procedura richiede una perfetta conoscenza degli algoritmi di calcolo e va effettuata con molta cautela.

Test per la misura della soglia anaerobica

Definizione

La definizione di soglia anaerobica è uno dei punti maggiormente controversi di tutta la fisiologia dell'esercizio. Vari ricercatori si sono impegnati allo scopo di definire con esattezza cosa si deve intendere per soglia anaerobica e per questo hanno formulato adeguate teorie e descritto opportuni meccanismi a sostegno delle definizioni proposte. Un'approfondita discussione su questo punto è largamente al di fuori degli scopi di questo capitolo mentre si rimanda ai precedenti capitoli di Carlo Capelli e di Fabio Esposito per gli aspetti strettamente fisiologici del problema. In questa sede si parlerà di soglia anaerobica, intendendo quel livello di lavoro meccanico per il cui sostentamento si rende necessario il ricorso al metabolismo anaerobico che sopravanza la capacità globale dei sistemi muscolari aerobici di mantenere uno stato di equilibrio metabolico, venendosi perciò a creare uno stato di progressivo accumulo di acido lattico.

Modalità di esecuzione

Per la misura della soglia anaerobica sono state proposte metodiche che si basano sul rilievo dei valori ematici di acido lattico e che si riferiscono quindi al metabolita prodotto dai meccanismi di produzione energetici anaerobici. Poiché tale misura presuppone il prelievo di una quantità seppur minima di sangue, con tutti i problemi connessi all'esecuzione di tale manovra ed in particolare alla sua effettuazione durante esercizio, sono state proposte varie metodiche per la determinazione della soglia anaerobica basati sulla misura di parametri modificati dalle variazioni di livelli ematici di lattato. Tra i diversi protocolli che si possono trovare in letteratura verranno presi in considerazione le metodiche basate sull'analisi della ventilazione (Wasserman et al. 1973) e sullo studio della frequenza cardiaca (Conconi et al., 1982).

Metodiche con misurazione diretta della lattacidemia

La produzione di acido lattico nel muscolo è in stretta relazione con il livello di energia richiesta per la contrazione muscolare; quando i meccanismi ossidativi aerobici non sono in grado di coprire tutta la necessità di sintesi dell'ATP, l'utilizzazione anaerobica della scissione del piruvato in lattato ne provoca un incremento della concentrazione muscolare.

La misurazione del lattato prodotto nel muscolo durante esercizio fisico avviene in genere attraverso la determinazione del livello ematico di acido lattico presupponendo un'omogenea diffusione dello ione lattato nel compartimento extracellulare.

In questo caso se un esercizio è protratto per un tempo sufficiente per la diffusione del lattato prodotto fino al raggiungimento di uno stato di equilibrio (in genere tra 15' e 25') è possibile determinare con una serie di carichi ripetuti l'intensità limite alla quale si osserva un valore stabile seppure superiore a quello basale.

Questa metodica, nota come test di Mader (Mader e Heck, 1986), è considerata l'unica in grado di identificare la reale soglia anaerobica ma anche la più difficile da realizzare a causa dell'elevato numero di prove e della loro durata. In numerosi esperimenti, è stato osservato che in un elevato numero di soggetti la soglia, così calcolata, è intorno al valore di 4 mM di acido lattico.

Seguendo questa osservazione è possibile ridurre la durata del protocollo misurando il lattato prodotto in un test incrementale nel quale la durata dei singoli carichi sia inferiore a quella necessaria per uno stato di equilibrio ma comunque sufficiente a liberare in circolo il lattato prodotto a livello muscolare.

Numerosi esperimenti hanno permesso di stabilire che tale durata non dovrebbe essere inferiore ai 4' minuti (Hartman, 1999) e che solo con protocolli di questo tipo è possibile usare il valore di 4 mM proposto da Mader.

Tuttavia si deve ricordare che le 4 mM non sono un riferimento fisiologico generale ma solo un *risultato statistico* e quindi è assolutamente possibile che singoli soggetti abbiano valori di soglia superiori od inferiori a questo livello.

Nell'esecuzione di un protocollo incrementale con carichi della durata di 3-5 minuti è possibile individuare un secondo valore significativo di lattacidemia intorno ai 2 mM corrispondente secondo Heck (1985) alla soglia aerobica ovvero al livello metabolico entro il quale tutta l'energia necessaria è ottenuta con le reazioni ossidative aerobiche senza l'impiego, neppure parziale, delle fonti anaerobiche.

In questo tipo di protocolli l'entità dell'incremento del carico dovrà essere valutata in funzione del livello di allenamento del soggetto in quanto il test non dovrà superare complessivamente la durata di 20-25 minuti per evitare la deplezione dei substrati e l'affaticamento generale.

Metodiche ventilatorie

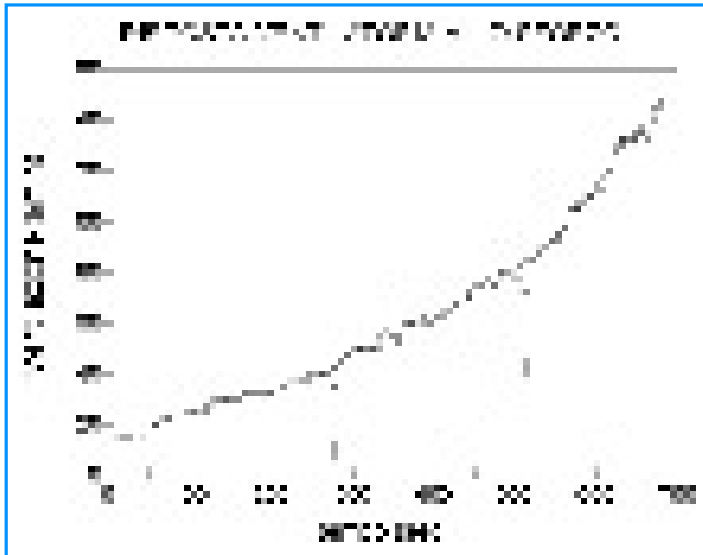
L'osservazione della relazione tra consumo di ossigeno e ventilazione in relazione all'intensità dell'esercizio fisico suggerisce una possibilità di inferire sul punto di transizione tra i diversi tipi di metabolismo anche senza dover ricorrere alla misura diretta della lattacidemia. Tra le diverse metodiche proposte quella che ha avuto senza dubbio la maggiore diffusione è quella suggerita da Wasserman nel 1973 e basata sulla determinazione del punto di rottura della relazione lineare tra ventilazione e consumo di ossigeno ("ventilatory breaking point"). La spiegazione di tale evento è stata indicata nella necessità di compensare l'iniziale produzione di radicali acidi a livello muscolare attraverso il tamponamento con bicarbonati, che indurrebbero un incremento di $V\text{CO}_2$ cui seguirebbe un incremento di ventilazione.

Questa metodica presuppone la misurazione degli scambi gassosi respiro per respiro e l'adozione di un protocollo con carichi di breve durata e di incrementi di modesta intensità; Wasserman et al propongono l'uso di un protocollo a rampa in cui il carico varia in modo quasi continuo per tutta la durata del test.

Successivamente altri autori suggerirono di usare anche altri parametri ventilatori e metabolici per una migliore identificazione del punto di flesso come ad esempio i rapporti tra $V'_E/V'O_2$ e $V'_E/V'CO_2$, la frequenza respiratoria, la relazione tra $V'CO_2$ e $V'O_2$ "V Slope" che è il metodo più usato nella maggior parte dei laboratori che utilizzano metodiche ventilatorie.

Va segnalato che, con gli attuali sistemi di misura della ventilazione e delle concentrazioni dei gas, è possibile nel corso di un test incrementale a carichi sufficientemente brevi (ad esempio 1 minuto) individuare nella gran parte dei soggetti allenati due punti di flesso (figura 5), il primo corrispondente all'iniziale incremento della V'_E e della $V'CO_2$ rispetto al $V'O_2$ (definita anche soglia ventilatoria compensata) ed il secondo nel quale la V'_E si innalza ancora anche rispetto al $V'CO_2$ e che corrisponde all'abbassamento del pH (soglia ventilatoria non compensata).

Fig. 5 Esempio di andamento della ventilazione polmonare misurata respiro per respiro in un test incrementale. La pendenza di salita della V'_E mostra due bruschi incrementi in corrispondenza della prima e della seconda soglia ventilatoria (vedi il testo per maggiori dettagli).



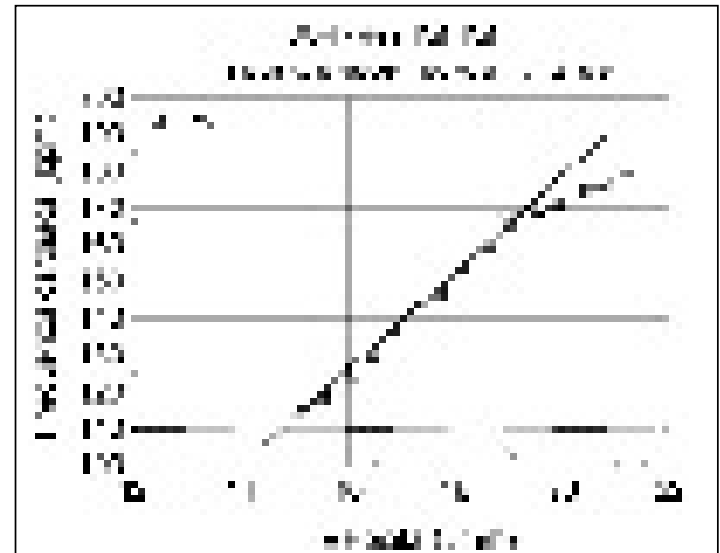
Metodica Conconi

Non è possibile parlare di soglia anaerobica senza descrivere il metodo di determinazione presentato nel 1982 da Conconi e collaboratori sul Journal of Applied Physiology (Conconi et al., 1982) che utilizzava l'analisi dell'andamento della frequenza cardiaca in rapporto al carico di lavoro per individuare, in una prova incrementale che poteva essere eseguita tanto in laboratorio quanto sul campo, un punto di flesso che è messo in relazione con la variazione della lattacidemia (vedi riquadro per i dettagli).

Lo studio provocò da un lato le obiezioni di molti ricercatori che contestarono la definizione di soglia per tale flesso, dall'altro un uso diffuso negli sport più diversi per la facilità di esecuzione e l'immediata applicabilità nell'allenamento.

La base teorica della metodologia proveniva dall'assunto che la relazione lineare tra frequenza cardiaca e $V'O_2$ dovesse obbligatoriamente modificarsi quando il lattato diveniva fonte energetica di rilievo, (quindi in corrispondenza della soglia) e dar luogo quindi ad un flesso nella curva (figura 6).

Fig. 6 Esempio di un test Conconi per la misura del punto di flesso nella relazione velocità frequenza cardiaca. L'atleta percorreva intervalli di 200 m su pista di atletica a velocità progressivamente più elevate fino alla velocità massima. L'incremento avveniva nei primi 50 m di ogni frazione mentre la frequenza era misurata ogni 5 sec con un cardiofrequenzimetro e veniva riportata la media degli ultimi 10 sec di ogni frazione.



Senza voler entrare nel merito del dibattito scientifico sul reale significato della deflessione si deve ricordare che la prova eseguita con accuratezza si è dimostrata ripetibile e correlata con la prestazione (in alcuni casi anche con la $\dot{V}O_2$) e quindi certamente utile per la valutazione specialmente dell'atleta.



Inserto 2

Il test Conconi: confronto tra laboratorio e campo")

Poiché questo metodo non prevede la misura di parametri ventilatori e metabolici non permette di ottenere notizie sulle caratteristiche generali del metabolismo aerobico. Quindi si ritiene che debba essere considerato un test di livello specialistico da attuare soprattutto in funzione dello studio di specifiche prestazioni ed in funzione della definizione di un programma di allenamento agonistico.

Criteri interpretativi

La valutazione della soglia anaerobica è fortemente influenzata dalla metodica utilizzata per la sua determinazione ed il valore da attribuire ai valori riscontrati varia anche in misura considerevole in funzione del protocollo usato. Ricordando che l'unico test con il quale si misura effettivamente la soglia anaerobica vera è quello con determinazione del lattato, va altresì tenuto in considerazione che nei test incrementali per la determinazione del carico a 4 mM la durata dello step influisce sul valore determinato.

Più lo step è lungo (oltre i 6'-7') più ci si avvicina a determinare un carico di soglia che il soggetto potrà mantenere per lunghi periodi di tempo (decine di minuti), anche in funzione del suo livello di allenamento.

Nel caso di un atleta allenato per prove di breve durata o per prove alternate la differenza in funzione della durata del carico sarà più rilevante rispetto ad un atleta di resistenza. E' quindi necessario, per usare la soglia come parametro per la determinazione dell'adattamento al training, che il protocollo del test sia mantenuto rigorosamente identico nelle varie ripetizioni.

La soglia ventilatoria misurata con il sistema della V-slope si osserva ad un carico in genere inferiore alla soglia rilevata con il metodo delle 4 mM e corrisponde ad un livello di effettiva condizione aerobica che potrà essere mantenuta abbastanza a lungo anche da un soggetto non allenato oppure, con una modesta riduzione, anche da un paziente con patologie croniche non complicate.

Il valore rilevato con il test Conconi è spesso superiore alle altre soglie; infatti, la maggior parte dei soggetti è in grado di lavorare a tale intensità per meno di 20', in quanto la condizione metabolica ad equilibrio corrisponde ad uno stato di moderato accumulo di lattato.

Altre prove di valutazione della funzione aerobica

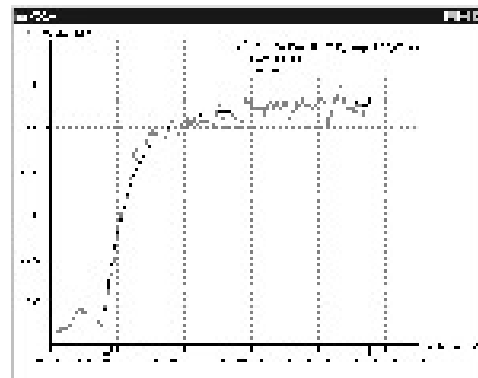
Test per la misura della cinetica

La misura dell'adeguamento temporale (cinetica) del consumo di ossigeno all'esercizio rappresenta un ulteriore metodo di studio delle caratteristiche funzionali adattate dell'organismo umano in risposta alla necessità di eseguire una certa quantità di lavoro meccanico.

La curva di incremento del $\dot{V}O_2$ ha una tipica forma **esponenziale** comune a molti altri processi biologici. L'ossigeno richiesto per i meccanismi energetici non è quindi immediatamente disponibile a livello tissutale, ma il suo consumo cresce progressivamente: prima rapidamente ("onset" $\dot{V}O_2$), poi la velocità di incremento si riduce man mano che il valore assoluto si avvicina alla quantità necessaria per garantire la produzione di ATP utile per assicurare la giusta contrazione muscolare, fino a raggiungere idealmente un valore stabile (fase di steady state).

Lo studio della cinetica di ossigeno attraverso le misure eseguite a livello della bocca permettono di apprezzare questo andamento esponenziale e di determinare, attraverso adeguati metodi matematici, le caratteristiche peculiari della funzione esponenziale (Fig. 7).

Fig. 7 Esempio di test per la determinazione delle cinetiche di risposta del consumo di ossigeno all'esercizio sottomassimale. Il carico di lavoro al cicloergometro era pari al 70% del massimo consumo di ossigeno. La curva scura rappresenta la migliore interpolazione dei punti sperimentali ed i suoi parametri (valore basale di $\dot{V}O_2$, valore di steady state, tempo di inizio della curva e costante di tempo e coefficiente di correlazione della regressione (r^2) sono evidenziati nel riquadro in alto.



Le cinetiche osservate per carichi di lavoro decisamente inferiori alla soglia anaerobica seguono un andamento rappresentabile da un'equazione mono-esponenziale $V'O_2(t) = V'O_{2, \text{ basale}} + A(1 - \exp^{-t/\tau})$ dove la $V'O_2$ al tempo t dopo l'inizio dell'esercizio è data dalla somma della $V'O_2$ di base e di A che rappresenta la $V'O_2$ necessaria per lo specifico lavoro muscolare. Il valore di A è tuttavia proporzionalmente ridotto sulla base della costante di tempo τ che indica la velocità con cui la funzione tende ad arrivare al valore di completa stazionarietà, ovvero più la τ è piccola più il valore di $V'O_2(t)$ tenderà rapidamente ad arrivare ad A .

Il valore di τ rappresenta quindi un indice della funzionalità temporale di tutti i sistemi respiratori, cardiovascolari e muscolari che consentono un corretto utilizzo dell'ossigeno per la produzione energetica: valori normali per t in esercizi sottosoglia variano da 30 a 40 secondi.

La cinetica descritta può essere ulteriormente complicata dalla presenza in un numero rilevante di casi, di una risposta iniziale transitoria e molto rapida che non segue la funzione esponenziale (definita fase I dagli autori anglosassoni) sulla cui origine vi sono diversi punti di vista e che viene in genere esclusa dall'analisi della curva per la cui trattazione si rimanda ai testi più estesi di Wasserman e Dal Monte-Faina.

Se il carico di lavoro imposto è vicino o superiore alla soglia anaerobica la cinetica del $V'O_2$ assume un andamento più articolato che aggiunge alla prima esponenziale un seconda curva con costante di tempo più lenta, in questo caso l'andamento è di tipo bi-esponenziale.

Secondo alcuni autori (Whipp, 1994, Poole et al., 1994) questa seconda curva potrebbe anche essere modellizzata in modo diverso ovvero con una funzione lineare sovrapposta alla prima esponenziale ed è indicata come **componente lenta del $V'O_2$** , il cui significato fisiologico è ancora dibattuto ed argomento di numerose ricerche.



Inserto 3 Cinetica lenta del $V'O_2$

Test per la determinazione del Costo energetico

Il costo energetico dell'attività motoria corrisponde alla quantità di energia metabolica necessaria per unità di lavoro meccanico eseguito. Ne consegue che per valutare il costo energetico ci si deve trovare in una condizione stazionaria e questo può avvenire quando il soggetto è in grado di coprire tutte le richieste energetiche attraverso i meccanismi aerobici.

Il calcolo del costo energetico viene quindi di norma effettuato per intensità di carico inferiori alla soglia anaerobica anche se è possibile stimare la componente anaerobica per intensità sopra la soglia attraverso la misura del lattato totale prodotto nel corso di un esercizio costante (vedi per una descrizione più completa del metodo da utilizzare Capelli et al. 1998).

Per lo studio del costo energetico è quindi necessario usare test ad onda quadra o comunque con un periodo di lavoro a carico costante tale da permettere il raggiungimento di un sicuro steady state (almeno 4 minuti anche in esercizi senza interruzione), risulta anche opportuno misurare il valore di lattato al termine di ogni carico.

Il valore di steady state può essere misurato calcolando la media dei 30 o 60 secondi finali di ogni livello oppure attraverso la determinazione del valore di asintoto di una regressione mono-esponenziale (figura 7).

L'utilità della misura del costo energetico per la valutazione funzionale è stata recentemente ripresa in considerazione per la possibilità che offre, soprattutto in atleti, di avere una misura organica del miglioramento tecnico.

Infatti, a parità di consumo di ossigeno sostenibile per gli specifici tempi di gara, un atleta che presenta un basso costo energetico (ovvero un alto rendimento) sarà in grado di eseguire un lavoro meccanico maggiore e quindi, verosimilmente, una prestazione sportiva più elevata.

Attraverso lo studio del costo energetico, che deve essere fatto per livelli di lavoro adeguati all'attività sportiva specifica di ogni soggetto, sarà possibile osservare eventuali effetti di un programma di allenamento mirato a migliorare la capacità di lavoro specifica.

Inserto 1**Principi generali di metodologia**

Ogni volta che si definisce un protocollo di valutazione, questo dovrebbe essere valutato in primo luogo in relazione ad alcune caratteristiche peculiari proprie di ogni sistema di misurazione:

- *specificità*
- *validità*
- *accuratezza*
- *ripetibilità*

La **specificità** misura quanto il test è in grado di avvicinarsi alla prestazione sportiva e deriva dalla precedente identificazione dei parametri fisici e fisiologici dello sport che si intende analizzare.

La **validità** di un test si riferisce alla precisione con la quale la prova valutativa fornisce un valore numerico della grandezza (fisiologica) che si intende stimare.

L'**accuratezza** individua il margine di errore che si commette nell'effettuare la misura, che deriva dall'errore proprio dello strumento di misura e dall'errore introdotto nelle procedure dalla componente umana.

La **ripetibilità** indica la differenza che si riscontra nelle singole misure attraverso la riproduzione nelle medesime condizioni dello stesso test, ai fattori già citati per l'accuratezza vanno aggiunti quelli propri della variabilità biologica.

Per alcuni test standard, queste caratteristiche sono note (Dal Monte e Faina, 1999) ed in genere la pubblicazione scientifica che presenta il test illustra anche in dettaglio questi aspetti, chiarendo contestualmente anche i limiti applicativi. Comunemente, viene data più enfasi alla specificità ed alla validità, mentre sono frequentemente trascurate l'accuratezza e la ripetibilità.

Inserto 2**Il test "Conconi": confronto tra laboratorio e campo**

Uno dei principali argomenti di discussione intorno al test Conconi è sempre stata la sua realizzazione in laboratorio. Applicando un classico protocollo incrementale, 2-3 min a 25 o 30 Watts, la maggior parte dei ricercatori non era in grado di evidenziare alcuna deflessione nella relazione HR - carico di lavoro.

Al contrario effettuando il test sul campo il flesso veniva messo in evidenza nella quasi totalità dei casi con i limiti di riproducibilità posti dalla soggettività intrinseca nell'affidare l'analisi al singolo operatore (ad esclusione di un 5%) di test "negativi" segnalato anche dall'autore, (Conconi, comunicazione personale).

Il test su campo appare tuttavia difficoltoso in alcuni sport, come ad esempio il ciclismo in cui le condizioni ambientali sono spesso avverse (temperature basse, vento, pioggia).

Il protocollo proposto inizialmente dal gruppo di Conconi prevedeva di effettuare un numero elevato di prove a velocità progressive su una distanza costante ottenendo quindi un test in cui la durata di ogni singolo carico di lavoro si riduceva man mano che il carico aumentava.

Successivamente gli stessi autori (Conconi et al., 1996) hanno suggerito che il test potesse essere eseguito anche per intervalli costanti a condizione che ciascun periodo avesse una durata di 45" - 60".

In uno studio recente (Schena et al. 1997) entrambi questi approcci (durata costante e durata decrementante) sono stati usati in un gruppo di ciclisti di buon livello agonistico confrontandoli con un test tradizionale in velodromo per valutare la corrispondenza dei valori di soglia stimati. I test in laboratorio prevedevano intervalli costanti di 60 sec. a 25 watts (COST) oppure decrementanti da 50 sec. a 35 sec. con riduzioni di 1 secondo per ogni periodo sempre con variazioni di carico di 25 watts (DECR). Il test in velodromo è stato condotto su pista da 340 mt. variando la velocità di 1 km/h ad ogni giro. In tutti i

test, è stato possibile evidenziare un punto di discontinuità (flesso secondo Conconi) nella relazione velocità-frequenza cardiaca identificato da due operatori indipendenti con una riproducibilità del 90%. I valori medi di frequenza cardiaca (172.6 ± 4.1 vs 169.7 ± 3.4 bpm) e carico di lavoro (339 ± 12.5 vs 332 ± 9.6 watts) alla deflessione sono risultati lievemente più elevati nel test DECR, ma in entrambi i casi non sono stati diversi significativamente da quelli misurati nella prova in velodromo. Appare quindi possibile riprodurre in laboratorio il test Conconi con ciclisti esperti, purché la durata dei carichi di lavoro sia sempre limitata, ed utilizzare i valori di HR rilevati per la programmazione dell'allenamento.

Inserto 3**Cinetica lenta della $\dot{V}O_2$**

Quando viene eseguito un carico di lavoro francamente superiore alla soglia anaerobica si osserva nella maggior parte dei casi un'incapacità da parte del soggetto di mantenere un valore di steady state del consumo di ossigeno anche se la prova è protratta oltre i 3-4 minuti. Il valore di $\dot{V}O_2$ tende, infatti, a presentare un moderato ma continuo incremento rispetto al tempo che viene usualmente definito "componente lenta" del consumo di ossigeno. La definizione di componente lenta fa riferimento al superamento del valore di $\dot{V}O_2$ allo steady state atteso rispetto alla linearità del rapporto carico- $\dot{V}O_2$ ai carichi sotto la soglia. In modo semplice questa componente viene determinata dalla presenza di una differenza superiore al 300 ml del valore di $\dot{V}O_2$ tra il 6° ed il 3° minuto in un test ad onda quadra (Whipp, 1994). La natura di questa risposta fisiologica è ancora oggetto di dibattito tra i ricercatori, alcune ipotesi sono:

- costo per il parziale smaltimento del lattato prodotto per mantenere il carico
- spesa energetica per il maggior lavoro dei muscoli respiratori

Tuttavia ciò che appare di maggiore interesse è la possibilità che l'entità della componente lenta possa spiegare la ragione delle diverse capacità di prestazione tra soggetti con eguale potenza aerobica oppure possa essere usata per discriminare l'efficacia di un programma di allenamento in atleti già ben adattati nei quali non è facile vedere differenze nei valori di $\dot{V}O_{2max}$.

Questo secondo obiettivo in particolare richiederebbe un metodo di calcolo affidabile della componente lenta che ancora non è disponibile, in particolare rimangono ancora da definire con precisione:

- la natura matematica del modello da usare: esponenziale o lineare
- il calcolo del tempo di inizio della componente rispetto alla cinetica iniziale

per un ulteriore approfondimento del problema si consigliano gli articoli di Poole et al (1994) e Billat et al. (1998).

Bibliografia

- Antonutto G, di Prampero PE. 1995. The concept of lactate threshold: a short review. *J Sports Med Phys Fitness*; 35: 6-12.
- Beaver WL, Wasserman K and Whipp BJ. 1986. A new method for detecting the anaerobic threshold by gas exchange. *J Appl Physiol*; 60:2020-2027.
- Billat V, Renoux JC, Pinoteau J. 1994. Reproducibility of running time to exhaustion at VO_{2max} in subelite athlete. *Med Sci Sports Exerc*; 26: 254-257.
- Billat V, Richard R, Binsse VM, Korelsztein JP, Haouzi P. 1998. The VO_2 slow component for severe exercise depends on type of exercise and is not correlated with time to fatigue. *J Appl Physiol*; 85:2118-2124.
- Brooks GA. 1984. The lactate shuttle during exercise and recovery. *Med Sci Sports Exerc*; 18:360-368.
- Bruce RA. 1984. Normal values for VO_2 and the VO_2 -HR relationship. *Am Rev Respir Dis*; 129:41-48.
- Capelli C, Schena F, Zamparo P, Dal Monte A, Faina M, and di Prampero PE. 1998. Energetics of best performances in track cycling. *Med Sci Sports Exerc*; 30: 614-624.
- Conconi F, Ferrari M, Ziglio PG, Droghetti P, Codecà L. 1982. Determination of the anaerobic threshold by a noninvasive field test in runners. *J Appl Physiol*; 52:869-873.
- Conconi F, Grazzi G, Casoni I et al. 1996. The Conconi test: methodology after 12 years of application. *Int J Sports Med*; 17(7): 509-519.
- Dal Monte A. 1983. La valutazione funzionale dell'atleta, Sansoni, Firenze.
- Dal Monte A, Faina M. 1999. Valutazione dell'atleta, UTET, Roma.
- Dal Monte A, Faina M and Menichelli C. 1992. Sport specific ergometric equipment. in *Endurance in sports*, Shepard R.J. & Astrand P.O. (eds). Blackwell Scientific Publ. London pp.201-207.
- Kuipers H. 1997. Advances in the evaluation of the sport training in: *Perspective in exercise science and sport medicine*. Vol.10: *Optimizing Sport Performance*, Lamb DR and Murray R. (eds). Cooper Publishing Group, Carmel, pp. 63-90.
- Jones NL. 1988. *Clinical Exercise Testing*, W.B. Saunders Co., Philadelphia.
- Mader A, Heck A. 1986. A theory of the metabolic origin of "anaerobic threshold". *Int J Sports Med* 7:45-65.
- Poole DG, Barstow TJ, Gasser GA, Willis WT, Whipp BJ. 1994. VO_2 slow component: Physiological and functional significance. *Med Sci Sport Exerc*; 26 (11): 1341-1346.
- Rundell KW. 1995. Treadmill roller ski test predicts biathlon roller ski race results of elite US biathlon women. *Med Sci Sports Exerc* 27: 1677-1685.
- Wasserman K. 1996. The anaerobic threshold: theoretical basis, significance evaluation of the athlete. *Med Sport*; 49:247-260.
- Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Whipp BJ, Casaburi R. 1999. *Principles of exercise testing and interpretation*. III ed. Lea & Fabiger, Philadelphia.
- Whipp BJ. 1994. The slow component of O_2 uptake kinetics during heavy exercise. *Med Sci Sports Exerc*; 26:1319-1324.

