

<b>1 – INTRODUZIONE</b>	<b>4</b>
<b>2 – FONTI ENERGETICHE E METABOLISMO</b>	<b>6</b>
2.1- <i>Il metabolismo anaerobico alattacido</i>	8
2.2- <i>Glicolisi</i>	9
2.3- <i>Metabolismo anaerobico lattacido (glicolisi anaerobica)</i>	10
2.4- <i>Metabolismo aerobico</i>	10
<b>3 – FATTORI CHE LIMITANO IL METABOLISMO AEROBICO</b>	<b>12</b>
3.1- <i>Disponibilità dei substrati</i>	12
3.2- <i>Disponibilità dell'ossigeno</i>	13
3.2.1- <i>capacità di assunzione dell'ossigeno</i>	13
3.2.2- <i>capacità di trasporto dell'ossigeno</i>	15
3.2.3- <i>capacità di utilizzazione dell'ossigeno</i>	16
3.3- <i>Tempo di esaurimento</i>	16
3.4- <i>Deficit di ossigeno</i>	17
3.4.1- <i>Fonti energetiche del deficit di ossigeno</i>	19
3.4.2- <i>Deficit e debito di ossigeno</i>	19
<b>4 – LA SOGLIA ANAEROBICA</b>	<b>20</b>
4.1- <i>Definizione</i>	20
4.2- <i>Il significato di soglia anaerobica</i>	20
4.3 - <i>Determinazione della AT</i>	22
<i>Intensità dell'esercizio</i>	24
<b>5 – MASSIMA POTENZA AEROBICA (VO<sub>2</sub>max)</b>	<b>25</b>
5.1- <i>Valori e andamenti del VO<sub>2</sub> max</i>	25
5.2- <i>Fattori limitanti il VO<sub>2</sub>max</i>	26

5.3- $VO_2$ di picco	27
<b>6 – CINETICA DEL CONSUMO DI OSSIGENO</b>	<b>28</b>
6.1- Fase I del consumo di ossigeno	29
6.2- Fase II del consumo di ossigeno	29
6.3- Fase III del consumo di ossigeno	31
6.4- Cinetica del consumo di ossigeno nella fase di recupero ( $VO_2$ -off)	33
6.5- La cinetica del consumo di ossigeno: meccanismi centrali e periferici	34
6.6- Cinetica del consumo di ossigeno in esercizi eseguiti con gli arti superiori	36
6.7- Influenza dell'età sulla cinetica del consumo di ossigeno	36
6.8- Cinetica del consumo di ossigeno in condizioni patologiche	37
6.9- Effetti dell'allenamento sulla cinetica del $VO_2$	38
6.10- Modelli di valutazione delle cinetiche	40
6.11- Mean Response Time	42
<b>7 – GLI STRUMENTI PER LA REALIZZAZIONE DEI TEST</b>	<b>43</b>
7.1- Cicloergometro	43
7.2- Armoergometro	43
7.3- Il cardiofrequenzimetro: il Polar Vantage NVTM	43
7.4- Metabolimetro Vmax29c (Sensormedics)	45
<b>8 - PROTOCOLLO SPERIMENTALE</b>	<b>47</b>
8.1- Soggetti	47
8.2- Protocollo	47
8.2.1- Test preliminari	48
Preparazione	48
Esecuzione	48
8.2.2- Test sperimentali	49
Preparazione	49

Esecuzione	49
<i>8.2.3- Schema seguito per la randomizzazione dei test sperimentali da parte dei soggetti esaminati.</i>	50
<b>9 – METODI</b>	<b>51</b>
<i>9.1- Strumenti di acquisizione</i>	51
<i>9.2- Registrazione dei parametri cardiorespiratori</i>	51
<i>9.3- Elaborazione dei dati</i>	53
<b>10 – RISULTATI</b>	<b>65</b>
<i>10.1- Consumo di ossigeno</i>	66
<i>10.2- Componente lenta del VO<sub>2</sub></i>	68
<i>10.3- Ventilazione</i>	71
<i>10.4- Frequenza cardiaca</i>	72
<i>10.5- Tau</i>	73
<i>10.6- Time delay</i>	76
<i>10.7- Mean response time</i>	77
<b>11 - DISCUSSIONE</b>	<b>79</b>
<b>RINGRAZIAMENTI</b>	<b>82</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>83</b>

# 1 – INTRODUZIONE

All'inizio di un esercizio fisico, o quando l'intensità dell'esercizio varia, avviene un aumento nella richiesta di energia da parte dell'organismo che cerca di incrementare l'assunzione di ossigeno per coprire la maggiore domanda dei muscoli. Gli apparati circolatorio e respiratorio si adeguano per cercare di fornire un adeguato apporto di ossigeno ai muscoli e di rimuovere l'anidride carbonica che si forma durante i processi ossidativi. Il sistema di regolazione, però, non risponde istantaneamente a tale richiesta; al contrario, la maggior parte delle funzioni cardiorespiratorie mostra un ritardo nell'adeguarsi alle nuove esigenze dell'organismo.

Le conoscenze che derivano dallo studio delle modificazioni fisiologiche durante gli stati stazionari, sono generalmente insufficienti per spiegare i meccanismi che stanno alla base degli aggiustamenti rapidi. Risposte più precise si possono ricercare nell'analisi dei periodi di passaggio da uno stato stazionario ad un altro. Poiché l'aumento del consumo di ossigeno durante il lavoro muscolare riflette l'azione integrata di molti fattori (respiratori, circolatori e metabolici), la misura e l'analisi dei cambiamenti nel consumo di ossigeno all'inizio dell'esercizio sono utili strumenti di studio per aumentare le conoscenze nell'ambito della fisiologia dell'esercizio.

La risposta del consumo di ossigeno all'inizio dell'esercizio è un valido indice che riflette sia il trasporto di ossigeno ai muscoli, sia il metabolismo muscolare. Se si assume che l'assunzione di ossigeno misurato alla bocca rifletta completamente gli scambi gassosi a livello dei tessuti, è possibile, misurando la quantità di aria e la concentrazione di ossigeno e anidride carbonica nell'aria inspirata ed espirata, studiare come il nostro organismo sopperisca alla maggior richiesta di ossigeno da parte dei muscoli e come proceda alla rimozione dell'anidride carbonica formata durante i processi ossidativi. Queste misure si possono realizzare attraverso un misuratore del flusso respiratorio e di analizzatori di ossigeno e di anidride carbonica. Durante i periodi di passaggio da uno stato all'altro sono necessari strumenti che registrino la concentrazione dei gas e il volume durante ogni respiro obiettivo che può essere ottenuto con vari tipi di sistemi commerciali (metabolimetri) che assolvono questo compito in maniera molto precisa.

D'altra parte, se durante lo stato stazionario la misura degli scambi gassosi alla bocca riflette fedelmente gli scambi gassosi dei tessuti, durante i cambiamenti di stato l'influenza del ritardo tra il luogo dove aumenta la domanda metabolica e la bocca può ridurre l'interpretabilità dei risultati. Sin dai primi studi di Krogh e Lindhard (1913) sono state descritte due distinte componenti negli adeguamenti ventilatori e degli scambi gassosi come risposta a un esercizio a carico costante. Una fase iniziale che corrisponde all'intervallo prima del cambiamento della tensione dei gas nel circolo venoso, una seconda fase in cui gli effetti del metabolismo dei tessuti vengono trasferiti a livello polmonare in seguito al cambiamento della tensione dei gas nel circolo venoso. Il riconoscimento e la suddivisione delle due fasi sulla base dei parametri respiratori e metabolici misurabili alla bocca non è peraltro sempre agevole.

Fino ad ora le caratteristiche della risposta del consumo di ossigeno nel transiente verso esercizi di diverse intensità sono state studiate approfonditamente (Barstow TJ, 1994; Linnarsson D. 1974; Whipp BJ, 1984). Sono stati studiati molto dettagliatamente anche alcuni fattori che influenzano la cinetica del consumo di ossigeno, come l'allenamento l'età il sesso o le malattie (Babcock MA et al., 1994; Gaesser GA, 1994). Nonostante l'abbondanza di studi sull'argomento alcuni interrogativi rimangono aperti, ad esempio l'esatta modalità con cui viene controllato l'incremento del  $\text{VO}_2$  e la definizione quantitativa dei fattori centrali e periferici. (Xu F, Rhodes EC, 1999).

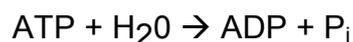
La maggior parte degli studi sull'argomento sono stati condotti durante esercizi svolti al cicloergometro o al nastro trasportatore, quindi coinvolgendo grosse masse muscolari, mentre esistono pochissimi studi che riguardano esercizi svolti con le braccia. E' invece possibile che proprio confrontando esercizi di diverse intensità eseguiti con diverse masse muscolari sia possibile avere maggiori informazioni per dirimere alcuni punti ancora poco chiari dei meccanismi sopra ricordati.

Per questo motivo questa tesi è focalizzata sul confronto tra le cinetiche del consumo di ossigeno durante esercizi sopra e sotto la soglia ventilatoria (Whipp BJ, 1984) svolti utilizzando alternativamente gli arti superiori (ergometro a braccia) o gli arti inferiori (cicloergometro).

## 2 – FONTI ENERGETICHE E METABOLISMO

L'energia influenza direttamente la capacità di eseguire un lavoro. Il lavoro è il trasferimento di energia da un sistema ad un altro. Dal punto di vista fisico si indica con lavoro uno spostamento prodotto da una forza. In biologia il termine ha un significato più ampio comprendendo innumerevoli fenomeni quali il trasferimento di molecole attraverso le membrane, l'instaurarsi di potenziali di membrana nei nervi e nei muscoli, la sintesi o la degradazione di molecole, lo scorrimento tra i filamenti di actina e miosina.

L'energia necessaria per produrre queste forme di lavoro "biologico" proviene da quella immagazzinata nei legami chimici di alcune sostanze presenti nell'organismo: glucidi, grassi e proteine, introdotti con gli alimenti. Quando le reazioni chimiche che avvengono a livello cellulare determinano la rottura di questi legami, parte dell'energia liberata è trasformata in calore e provoca l'incremento o il mantenimento della temperatura corporea; un'altra porzione di energia può invece essere usata per generare lavoro biologico. Alcune molecole sono in grado di rilasciare una grande quantità di energia in seguito alla loro degradazione ma solo l'ATP (adenosintrifosfato) che, degradandosi in una molecola di ADP (adenosindifosfato) e in una di fosforo inorganico (Pi), può essere utilizzata per ottenere l'energia necessaria per svolgere lavoro muscolare.



Questa reazione libera una notevole quantità di energia, una frazione della quale viene utilizzata dai ponti dei filamenti di miosina per generare forza e/o compiere lavoro sui filamenti di actina.

**Tab.1:** produzione di ATP per mole di substrato, o di O<sub>2</sub> consumato in diverse vie. E' anche indicato il quoziente respiratorio, QR=VCO<sub>2</sub>/VO<sub>2</sub>. Da Guyton, 1995.

Substrato	reazione	Metabolita finale	ATP/mol Substrato	ATP/mol O <sub>2</sub>	QR
Glicogeno*	→	Lattato	3	-	-
Glucosio	→	Lattato	2	-	-
Lattato	→	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	17	5.7	1.00
Glicogeno*	→	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	37	6.2	1.00
Glucosio	→	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	36	6.0	1.00
AGL**	→	CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	138	5.6	0.71

\*= per unità glucosidica

\*\*= AGL, acidi grassi liberi, composizione simile al tessuto adiposo umano

Tuttavia la concentrazione intramuscolare di ATP è talmente limitata (5-6 mmol per kg di muscolo fresco) da non essere sufficiente che per poche contrazioni. Ne segue che, per una qualsiasi attività muscolare, l'ATP deve essere ricostituito alla stessa velocità con cui viene utilizzato.

Secondo il tipo di lavoro da compiere il nostro organismo utilizza tre diversi tipi di processi per rifornire di ATP il muscolo durante il lavoro: 1) *il metabolismo anaerobico alattacido*, 2) *il metabolismo anaerobico lattacido*, 3) *il metabolismo aerobico* (tab. 2).

Fonti energetiche	PotenzaMax W/kg	Capacità max Kj/Kg	Tempo di esaurimento
Anaerobiche alattacide	50/80	0.75/0.85	6 secondi
Anaerobiche lattacide	20/30	0.9/1.1	40 secondi
Aerobiche(VO <sub>2</sub> max)	10/20	(4000/8000)	7/10 minuti

**Tab. 2:** massima potenza e massima capacità aerobiche, per kg di massa corporea totale, delle tre fonti energetiche del lavoro muscolare per un atleta (valori maggiori) e un non atleta (valori inferiori) di sesso maschile e di età di 20/30 anni. Nei soggetti femminili i valori corrispondenti sono del 10-20% inferiori. L'ultima colonna riporta il tempo di completa utilizzazione della capacità, quando questa sia utilizzata alla massima potenza. La massima capacità delle fonti aerobiche è proporzionale alle riserve di grasso dell'organismo; essa tuttavia non può essere utilizzata alla massima potenza. Da Guyton, 1995.

## 2.1- Il metabolismo anaerobico alattacido

La prima riserva di carburante utilizzata quando comincia ad essere degradato l'ATP è il *creatinfosfato* (o fosfocreatina, o PCr) il quale è immagazzinato all'interno della fibra muscolare. Tutti gli esercizi di brevissima durata (< 6 secondi), inclusi quelli alla massima potenza assoluta, utilizzano quale fonte energetica pressochè esclusiva la PCr e, poiché non utilizzano ossigeno e non producono acido lattico, si parla di **metabolismo anaerobico alattacido**. Nello stesso momento in cui le molecole di ATP sono idrolizzate in ADP + P altrettante molecole di ATP vengono resintetizzate a spese del creatinfosfato dalla reazione:



La quantità di creatinfosfato presente nel muscolo scheletrico umano è circa 20-30 mmol·kg<sup>-1</sup>. Tale quantità è sufficiente per sostenere esercizi muscolari assai intensi, ma per un periodo assai breve. In realtà la velocità di demolizione della fosfocreatina dipende dall'intensità dell'esercizio. In esercizi di intensità pari al 100% del VO<sub>2</sub>max (massima potenza aerobica, cap. 5), il creatinfosfato si riduce a basse concentrazioni in 2-3 minuti, mentre durante sforzi muscolari massimali diminuisce drasticamente già dopo 5 secondi. Sembra quindi esistere una relazione lineare tra la caduta della concentrazione di

creatinfosfato e la potenza erogata durante l'esercizio (Binzoni, 1994). Quindi, nel caso di esercizi estremamente intensi, se i processi indicati nella tabella 1 non hanno raggiunto una velocità adeguata, essi non sono sufficienti alla risintesi di tutto l'ATP necessario alla contrazione muscolare. In questo caso, l'idrolisi della PCr continua fino a quando la sua concentrazione muscolare non è ridotta ad un livello minimo; a questo punto l'esecuzione di lavoro meccanico deve necessariamente cessare o ridursi di intensità.

Tuttavia anche se il carico di lavoro è di minore intensità, nelle fasi iniziali di un esercizio a carico costante, il consumo di ossigeno a livello muscolare non copre immediatamente la totale richiesta di energia, ma la raggiunge dopo un certo ritardo, le cui cause vedremo in seguito. A tale ritardo supplisce in parte l'idrolisi della PCr alla quale si aggiunge rapidamente la glicolisi anaerobica che comincia ad essere osservabile quando la PCr è caduta al 40% di quella iniziale.

## **2.2- Glicolisi**

Finora sono stati descritti quei processi metabolici che possono realizzarsi a spese di substrati con alto livello energetico (ATP e PCr), già disponibili all'interno del citoplasma cellulare. Questi substrati, però, si esauriscono molto rapidamente, quindi, per lavori di durata superiore, la cellula deve coinvolgere altre fonti energetiche.

Il glucosio è uno dei materiali che può essere metabolizzato per tale scopo. La demolizione del glucosio all'interno della cellula può schematicamente essere suddivisa in due gruppi di reazioni metaboliche: la via ossidativa, che si realizza solo se nella cellula è presente ossigeno e la via anaerobica, che può avvenire anche in assenza di ossigeno. Il glucosio utilizzabile per la demolizione si trova immagazzinato sotto forma complessa di glicogeno nei muscoli (250-400 g) e nel fegato (circa 100 g) e, sotto forma semplice di glucosio libero, nei liquidi extracellulari (10 g).

La concentrazione del glicogeno (valore medio 12-15 g per Kg di peso fresco) può variare in funzione dell'attività fisica e della dieta.

### 2.3- Metabolismo anaerobico lattacido (glicolisi anaerobica)

La glicolisi anaerobica consiste nella scissione di una molecola di glucosio (6 atomi di carbonio) in 2 molecole a tre atomi di carbonio (acido lattico o acido piruvico) con produzione di 2 molecole di ATP. La glicolisi anaerobica è di fondamentale importanza, anche se l'energia chimica prodotta tramite meno del 10% di quella sfruttabile dalla completa ossidazione del glicogeno. Infatti essa interviene per: 1) assicurare energia all'attività delle fibre muscolari bianche (tipo II b), che sono meno dotate di enzimi ossidativi; 2) fornire energia per la contrazione dei muscoli durante il periodo iniziale dell'esercizio, prima che il flusso ematico possa garantire l'adeguato apporto di ossigeno; 3) incrementare ulteriormente la produzione di ATP quando le richieste sono superiori alla massima potenza aerobica.

### 2.4- Metabolismo aerobico

Una cellula muscolare a riposo riceve l'energia minima di cui ha bisogno, per il mantenimento dei gradienti ionici e delle altre funzioni, attraverso i processi del metabolismo aerobico: tramite questa via le sostanze assunte attraverso l'alimentazione (soprattutto glucidi e lipidi), vengono demolite nei mitocondri in  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ . L'energia così prodotta viene utilizzata per ottenere ATP. Tramite il metabolismo aerobico può essere trasformata in ATP circa il 50% dell'energia contenuta nei legami degli zuccheri o dei grassi, la rimanente quota viene dispersa sotto forma di calore e serve al mantenimento della temperatura corporea.

In questo processo, che prende avvio all'interno dei mitocondri con il ciclo degli acidi tricarbossilici (**ciclo di Krebs**), la sintesi di ATP avviene in presenza di ossigeno. Il meccanismo aerobico è assai meno potente rispetto a quello anaerobico, nel senso che è in grado di produrre, nell'unità di tempo, una minore quantità di ATP. D'altra parte esso ha una capacità d'erogazione virtualmente infinita in quanto limitata solo dall'apporto di ossigeno e di substrati.

Come indicatore dell'attivazione del metabolismo aerobico si utilizza il **consumo di ossigeno ( $\text{VO}_2$ )**, che può essere definito come la quantità di ossigeno utilizzata dalle cellule per soddisfare le richieste metaboliche dell'organismo.

Se il  $VO_2$  rappresenta un indice dell'attività metabolica, il **massimo consumo di ossigeno ( $VO_{2max}$ )** rappresenta la massima potenza che può essere sviluppata dall'organismo sulla base dei soli processi ossidativi, in altre parole la massima capacità individuale di risintesi aerobica dell'ATP. Esso è una misura globale e integrata di tutti quei meccanismi che presiedono al trasporto dell'ossigeno dall'ambiente esterno (aria atmosferica) fino alla sua utilizzazione all'interno degli organi a ciò deputati (i mitocondri) a livello della fibra muscolare (di Prampero, 1985). Questo argomento sarà ulteriormente approfondita nel capitolo 5.

### **3 – FATTORI CHE LIMITANO IL METABOLISMO AEROBICO**

Per molti anni vi sono state opinioni diverse su quale potesse essere la fase limitante nel percorso che porta dall'assunzione dell'ossigeno a livello polmonare, attraverso la circolazione del sangue al suo consumo nei mitocondri. La ricerca più recente ha stabilito che ogni stadio fornisce una certa resistenza al passaggio dell'ossigeno dai polmoni ai mitocondri e che l'entità di tale resistenza varia percentualmente in funzione della quantità di masse muscolari utilizzate. In esercizi nei quali viene utilizzata una grande percentuale della nostra massa muscolare, la resistenza principale (80%) sta nel sistema cardiocircolatorio, mentre per esercizi che richiedono una quantità modesta di massa muscolare l'intervento di tali fattori scende al 50% (di Prampero, 1985).

Per mantenere una prestazione elevata per un tempo prolungato non è solo rilevante la presenza dell'ossigeno necessario ma anche la continua disponibilità di substrati degradabili. Infatti, nei muscoli dei mammiferi, la capacità di fosforilazione ossidativa (metabolismo aerobico) è maggiore della corrispondente capacità di trasporto dei substrati (glucosio ed acidi grassi liberi). Perciò prestazioni aerobiche di elevata intensità portano necessariamente ad una continua diminuzione delle riserve di substrati intracellulari delle fibre muscolari. Quando questi sono esauriti, i processi del metabolismo aerobico possono svolgersi solo alla velocità permessa dal trasporto di substrati ai muscoli, che probabilmente corrisponde a non più del 50% della massima capacità aerobica.

Da quanto detto, si può concludere che in carichi elevati media durata (da 30 minuti a un'ora), il fattore limitante è rappresentato dalla capacità ossidativa mitocondriale e quindi dal corrispondente volume globale dei mitocondri nei muscoli interessati, mentre la quantità delle riserve di substrati determina la lunghezza del periodo per il quale potrà essere mantenuta una prestazione aerobica di più bassa intensità.

#### **3.1- Disponibilità dei substrati**

L'utilizzazione relativa dei glucidi quali substrati ossidabili aumenta in proporzione all'intensità dell'esercizio (dal 25% a riposo all'80% per un esercizio prossimo alla  $VO_2max$ ), mentre parallelamente diminuisce l'utilizzo dei lipidi.

Il ruolo dei carboidrati, essenziali in esercizi che richiedono l'uso di meccanismi anaerobici alattacidi, risulta importante anche in esercizi di durata prolungata a bassa intensità essendo il substrato utilizzato nelle prime fasi del lavoro. Inoltre il tempo di esaurimento di un esercizio di media intensità, tra il 60 ed il 85% del  $VO_2\max$ , è legato all'esaurimento dei depositi di glicogeno nei muscoli impegnati.

Il ruolo dei lipidi, originati dall'idrolisi dei trigliceridi del tessuto adiposo e dei depositi muscolari e presenti nel sangue sotto forma di acidi grassi liberi, è soprattutto importante durante esercizi di bassa intensità. Un elevato livello ematico di acidi grassi determina una loro utilizzazione preferenziale con conseguente risparmio di glicogeno e ritardo nell'insorgenza della fatica.

L'utilizzazione netta delle proteine non è modificata in modo apprezzabile dal lavoro muscolare; di conseguenza, il suo contributo percentuale al dispendio energetico (circa il 4% a riposo) diminuisce in modo proporzionale all'intensità del lavoro. Sembra comunque che negli esercizi di lunga durata anche gli aminoacidi diventino degli importanti substrati ossidabili (Lamb, 1984).

### **3.2- Disponibilità dell'ossigeno**

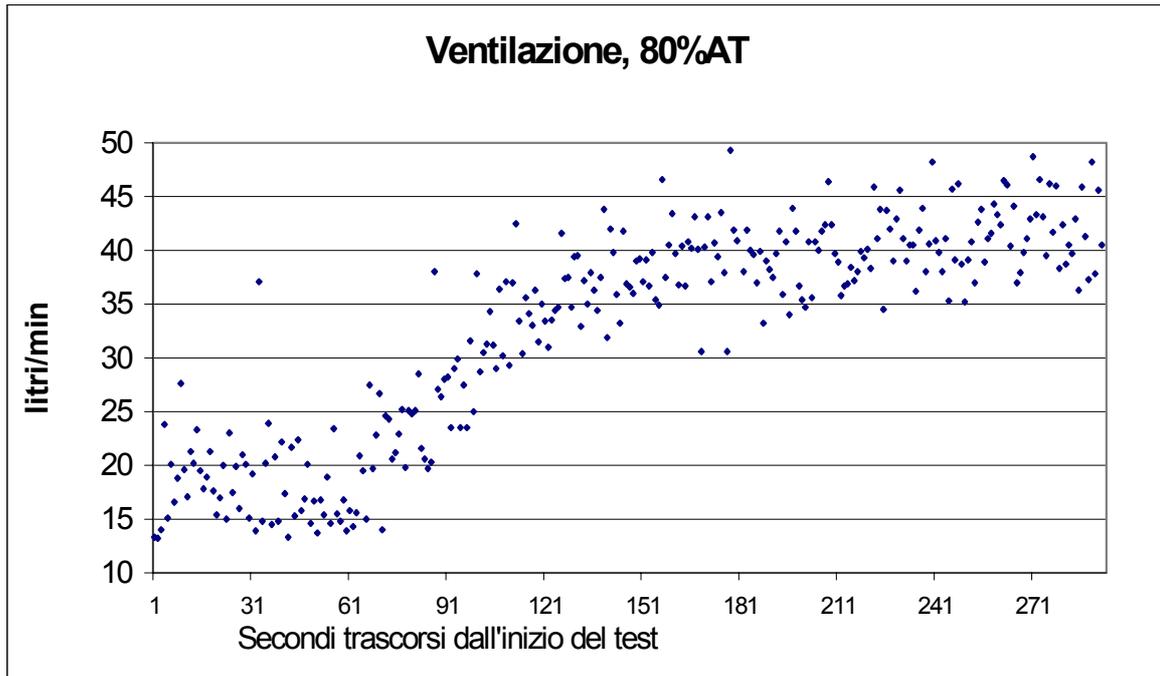
Poiché la disponibilità ambientale dell'ossigeno è illimitata, i fattori che ne limitano la disponibilità ai tessuti sono:

- 1) capacità di assunzione dell'ossigeno
- 2) capacità di trasporto dell'ossigeno
- 3) capacità di utilizzazione dell'ossigeno.

#### **3.2.1- capacità di assunzione dell'ossigeno**

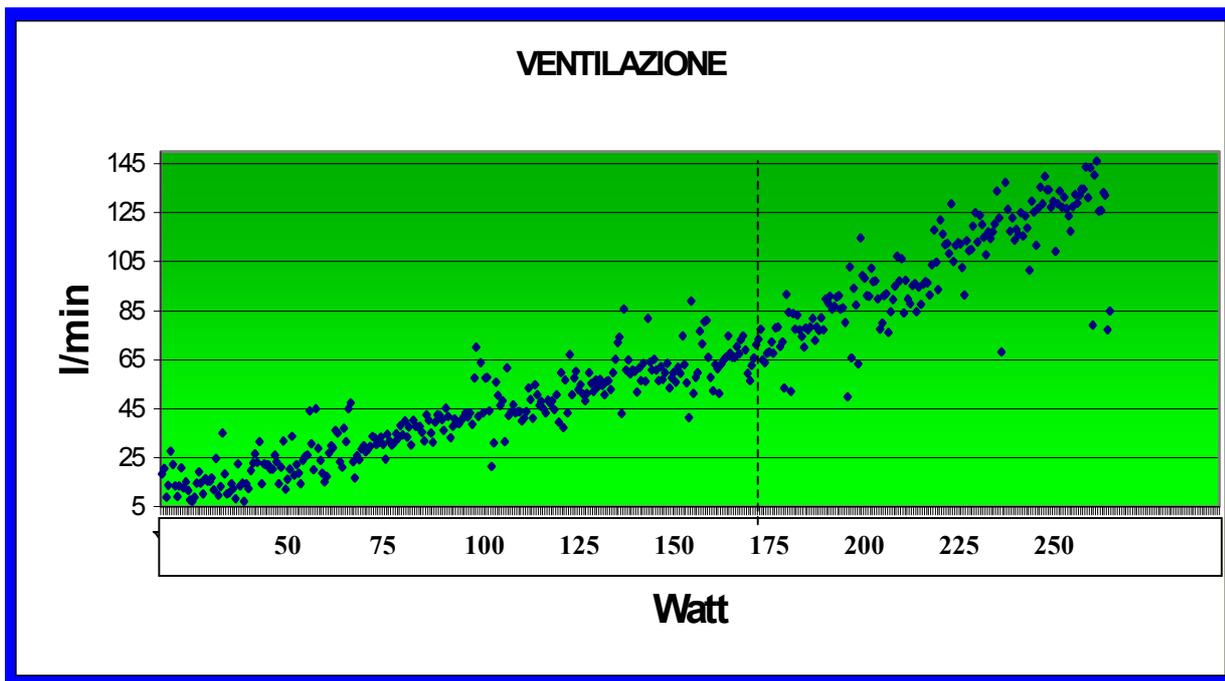
Durante il lavoro muscolare, l'aumentata richiesta di  $O_2$  e la necessità di eliminare la  $CO_2$  prodotta determinano un aumento della ventilazione (risposta ventilatoria).

Se il carico è costante la ventilazione aumenta fino a stabilizzarsi quando sono soddisfatte sia la richiesta di  $O_2$  sia lo smaltimento della  $CO_2$  (fig. 1).



**Fig. 1:** Risposta ventilatoria durante un test condotto al cicloergometro con carico inferiore alla soglia anaerobica. Durante i primi 60 secondi il soggetto pedalava a carico nullo. Successivamente è stato applicato un carico pari all'80% della soglia anaerobica.

Più il carico è elevato più alto sarà il livello di equilibrio e più lunghe saranno le fasi di adattamento e di recupero. Quando il lavoro muscolare viene effettuato con carichi crescenti, l'incremento della ventilazione è progressivo fino ad un livello massimale. Studiando l'incremento della ventilazione durante un carico crescente si osserva che la risposta è linearmente proporzionale al carico di lavoro fino ad un valore corrispondente al 60% circa del massimo consumo di ossigeno, quindi l'incremento diventa maggiore, con un relativo maggior aumento via via che i carichi di lavoro divengono più elevati (fig. 2). Vedremo in seguito il significato di questo andamento.



**Fig. 2:** Test incrementale svolto al cicloergometro. Sono indicati il carico di lavoro (Watt) sulle ascisse e le ventilazione (l/min) sulle ordinate. Si nota come, a partire dal carico di 175 W, l'incremento della ventilazione diventa maggiore, segno dell'intervento dei meccanismi metabolici lattacidi.

### 3.2.2- capacità di trasporto dell'ossigeno

La possibilità che il muscolo, sia in stato di riposo sia di lavoro, disponga di un adeguato apporto di ossigeno, dipende anche dalla capacità del cuore di assicurare tale apporto mediante aggiustamenti della propria funzione di pompa. La quantità di sangue pompata in un minuto da ciascuno dei due ventricoli del cuore è detta gittata cardiaca (GC). La GC dipende da due componenti: la gittata sistolica (GS), che è la quantità di sangue pompata dal cuore ad ogni battito (sistole), e la frequenza cardiaca (Fc). La gittata cardiaca di un individuo a riposo è di circa 5-6 l/min e, durante esercizio, può raggiungere i 25-30 l/min. La GS a riposo è di circa 70-80 ml e può raggiungere i 130-150 ml, mentre la frequenza cardiaca varia da 60-80 battiti/min a riposo fino a 180-200 durante uno sforzo massimale; questo in individui sedentari. In individui allenati e in condizioni di riposo, la gittata cardiaca non si discosta dai valori delle persone sedentarie, ma essa deriva da una maggiore gittata sistolica (100-110 ml) con una frequenza cardiaca inferiore (40-55 b/min).

Pertanto le persone allenate hanno un grado di riempimento del cuore e una contrattilità miocardica capaci di fornire migliori prestazioni. Durante l'esercizio nell'individuo allenato la GC può raggiungere valori massimali superiori rispetto a quelli dei soggetti sedentari. Negli allenati inoltre l'aumento della GC è dovuto maggiormente all'incremento della gittata sistolica che non nei sedentari, indicando che il cuore allenato sopporta in maniera più efficiente lo sforzo.

### **3.2.3- capacità di utilizzazione dell'ossigeno**

La capacità di utilizzazione dell'ossigeno da parte del muscolo è l'ultimo anello della catena. Questa capacità dipende dall'entità del processo di diffusione del gas dai capillari alla cellula muscolare e dalla presenza all'interno di essa di una quantità di organuli (mitocondri) ed enzimi in grado di permettere l'utilizzazione dell'O<sub>2</sub>. Non sussistono dubbi circa la correlazione tra la densità capillare, concentrazione di enzimi ossidativi e capacità del muscolo di compiere lavoro aerobico. Infatti, le fibre di tipo I, quelle maggiormente demandate a compiere lavori di tipo aerobico, sono caratterizzate da un elevato contenuto di enzimi coinvolti nella via ossidativa. Inoltre il microcircolo appare tanto più sviluppato quanto più elevata è la capacità aerobica delle fibre muscolari che irrorano. Pertanto il flusso ematico, che è tanto maggiore quanto più elevata è la densità capillare e più alto il rapporto tra capillari e fibre, viene ridistribuito all'interno del muscolo in rapporto alla capacità aerobica delle fibre.

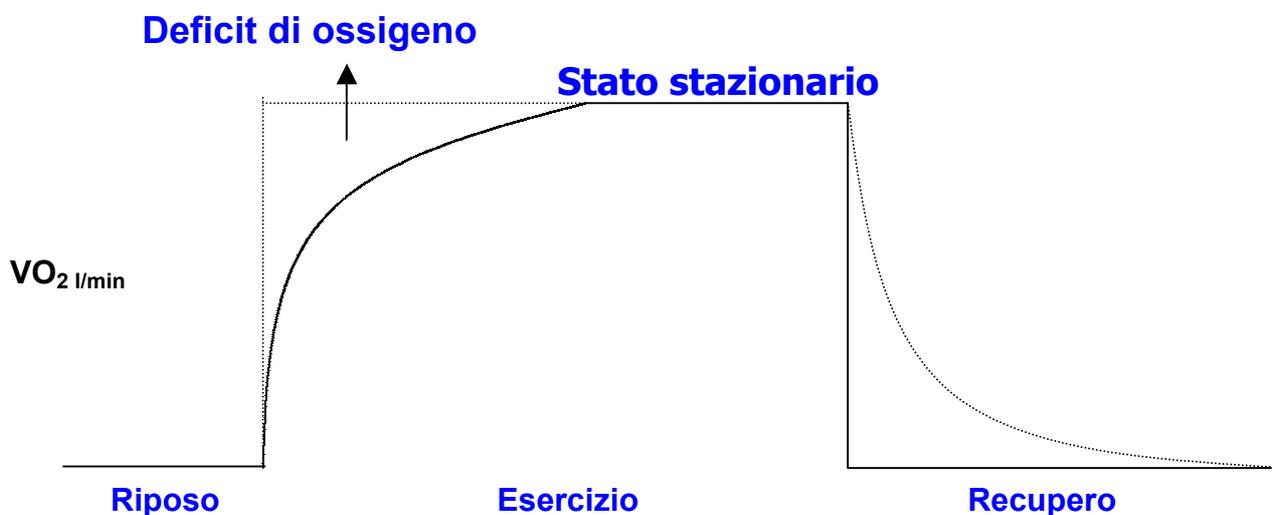
La correlazione esistente tra capillarizzazione, contenuto enzimatico e capacità di lavoro muscolare aerobico ha fatto ipotizzare che il fattore limitante la prestazione aerobica fosse essenzialmente periferico (Kaijser, 1970) e che il VO<sub>2</sub>max fosse limitato a questo livello. Tale ipotesi è stata tuttavia messa in dubbio da altre ricerche che vedono i fattori centrali (soprattutto cardiocircolatori) quali principali fattori limitanti la massima prestazione aerobica (Basset e Howley, 1977), ipotesi avvalorata dal fatto che durante uno sforzo submassimale il contenuto di O<sub>2</sub> nel sangue venoso è bassissimo (Piiper et al., 1968).

### **3.3- Tempo di esaurimento**

Il tempo durante il quale un esercizio di intensità costante può essere sostenuto diminuisce all'aumentare dell'intensità di lavoro. Soggetti allenati riescono a mantenere un'intensità di lavoro pari al 60% del  $VO_2\max$  per circa 5 ore, ma la durata si riduce a soli 7-14 minuti per una intensità pari al 100% del  $VO_2\max$ . Per esercizi di intensità relativa tra il 65 e il 90% di  $VO_2\max$ , il tempo di esaurimento in condizioni normali è tanto più lungo quanto maggiore è la concentrazione di glicogeno muscolare all'inizio del lavoro. La concentrazione normale di glicogeno muscolare in un soggetto a dieta mista è di 14 g/kg, ma, in un soggetto allenato e seguendo una particolare dieta, può arrivare a 35 g/kg. Per intensità di lavoro inferiori al 65%, almeno in soggetti allenati, il glicogeno muscolare non sembra essere il fattore limitante la durata dell'esercizio; infatti le necessità energetiche possono essere quasi interamente sostenute dall'ossidazione degli acidi grassi e i glucidi possono essere reintegrati dalla somministrazione, ad esempio, di bevande zuccherate. Sembra quindi che intervengano altri fattori, quali la stanchezza psicologica, i microtraumi associati all'esercizio, o fattori di termoregolazione, nello stabilire il limite di durata dell'esercizio.

### 3.4- Deficit di ossigeno

All'inizio di un esercizio che raggiunga immediatamente l'intensità voluta e che si mantenga poi a intensità costante (*"a onda quadra"*), la velocità di utilizzazione di ATP aumenta in modo praticamente istantaneo fino a un livello tanto più elevato quanto più



**Fig. 3:** Consumo di O<sub>2</sub> (linea continua) durante un lavoro muscolare moderato ad inizio subitaneo nell'uomo. La richiesta energetica per la risintesi di ATP è indicata dalla linea tratteggiata. All'inizio del lavoro, l'apporto di O<sub>2</sub> è inferiore alla richiesta; alla fine, è superiore: un deficit di O<sub>2</sub> quindi è "contratto" all'inizio e "pagato" alla fine del lavoro. Nella fase di stato stazionario, richiesta ed apporto di O<sub>2</sub> coincidono. (Guyton, 1995).

intenso è il lavoro. Il consumo di ossigeno invece segue il tasso di utilizzazione dell'ATP con un certo ritardo: ad esempio, in un esercizio ad onda quadra di intensità moderata, esso aumenta fino a raggiungere lo stato stazionario in circa 3 minuti (fig. 3).

Lo stato stazionario (ss) è generalmente definito come una condizione in cui i più rilevanti parametri cardiocircolatori e ventilatori (ventilazione, consumo di O<sub>2</sub>, frequenza e gittata cardiaca, ecc.) non variano significativamente nel tempo, dopo che è stato contratto un debito di VO<sub>2</sub> nel periodo di tempo tra inizio del lavoro e raggiungimento di VO<sub>2</sub>ss (consumo di O<sub>2</sub> allo stato stazionario). Anche durante la fase di stato stazionario, tuttavia, alcune grandezze fisiologiche, ad esempio le scorte di glicogeno muscolare o il quoziente respiratorio, continuano a modificarsi nel tempo, sia pure in modo estremamente più lento di quanto non avvenga quando la glicolisi anaerobica e/o l'idrolisi della fosfocreatina intervengono nella resintesi di ATP. Sia pure con questi limiti, la nozione di stato stazionario è pienamente giustificata sul piano operativo e definisce in modo appropriato il lavoro muscolare aerobico.

La differenza tra il volume di ossigeno effettivamente consumato all'inizio del lavoro e il volume consumato in un tempo uguale, ma allo stato stazionario, si definisce **deficit di ossigeno**. Esso corrisponde alla quantità di energia, espressa in equivalenti di ossigeno, che viene presa a prestito da fonti energetiche diverse dal consumo di ossigeno, anche in un esercizio aerobico, prima del raggiungimento dello stato stazionario per resintetizzare una parte di ATP necessaria al lavoro muscolare ed è proporzionale all'intensità dell'esercizio.

Alla fine del lavoro, mentre l'utilizzo di ATP da parte dei muscoli si riduce istantaneamente ai valori di riposo, il consumo di ossigeno, in esercizi moderati, diminuisce con un andamento simmetrico a quello osservato all'inizio (Barstow, 1994). In questa fase, le fonti energetiche non ossidative prese a prestito all'inizio dell'esercizio, vengono ricostituite a spese dell'O<sub>2</sub> consumato in eccesso rispetto al valore di riposo. Questa interpretazione fu proposta inizialmente da Hill e Lupton nel 1923 per spiegare il fenomeno ma allo stato attuale non sembra più in grado di spiegare esaurientemente i fattori responsabili dell'aumento del consumo di ossigeno nel recupero, la cui causa sembra doversi ricercare in una diffusa alterazione metabolica causata dall'esercizio stesso.

Per questo motivo attualmente si preferisce il termine *excess post exercise oxygen consumption* (EPOC). I fattori responsabili dell'EPOC sono riconducibili a:

- rifosforilazione della creatina e dell'ADP (10% dell'EPOC dopo un esercizio massimale);
- utilizzazione del lattato per la risintesi del glicogeno;
- intervento degli ormoni glicocorticoidi e della tiroxina che, aumentando l'attività della pompa sodio-potassio, richiederebbe un incremento della produzione di ATP e del relativo  $VO_2$ ;
- lipolisi e rilascio degli acidi grassi durante lo sforzo;
- ioni calcio consumati dal muscolo cardiaco e scheletrico;
- innalzamento della temperatura corporea (fattore di maggior peso della componente lenta dell'EPOC – vedi cap. 6.4 - in esercizi tra il 50-80%  $VO_{2max}$ ) (Hagberg et al., 1980).

Di conseguenza appare evidente che cercare di misurare la capacità lattacida attraverso la stima dell'EPOC risulta un procedimento non molto preciso.

### 3.4.1- Fonti energetiche del deficit di ossigeno

Alla base del deficit di ossigeno ci sono:

- l'idrolisi della fosfocreatina (PCr): all'inizio dell'esercizio la sua concentrazione diminuisce, fino a raggiungere un livello stabile in circa 3 minuti, ad un valore tanto più basso quanto più intenso è l'esercizio;
- l'attivazione del meccanismo anaerobico lattacido, in particolare per esercizi di intensità superiore al 60-70% di  $VO_{2max}$ , con produzione precoce di acido lattico.

### 3.4.2- Deficit e debito di ossigeno

Secondo alcuni Autori (Krogh and Lindhart, 1920), bisogna distinguere il termine di debito di ossigeno, che indica la quantità di ossigeno consumata in eccesso rispetto al valore basale di riposo e necessaria a metabolizzare nel postesercizio il lattato accumulato, da quello di deficit di ossigeno, cioè la differenza tra il volume di ossigeno effettivamente consumato all'inizio dell'esercizio fino al momento in cui si raggiunge la stabilizzazione del  $VO_2$  e il volume di ossigeno che verrebbe consumato in un tempo uguale se la prova raggiungesse nell'istante iniziale lo stato stazionario: **il deficit di  $O_2$  è quindi riferito alla fase iniziale dell'esercizio**, fino al momento in cui il  $VO_2$  si stabilizza (stato stazionario).

## **4 – LA SOGLIA ANAEROBICA**

### **4.1- Definizione**

La soglia anaerobica è definita come il valore di  $VO_2$  sopra il quale si verifica un significativo aumento di produzione di acido lattico e un aumento del rapporto lattato/piruvato. L'incremento di quest'ultimo riflette un incremento non più proporzionale del lattato rispetto alla glicolisi quando il pH del muscolo comincia a diminuire (Wasserman, 1986).

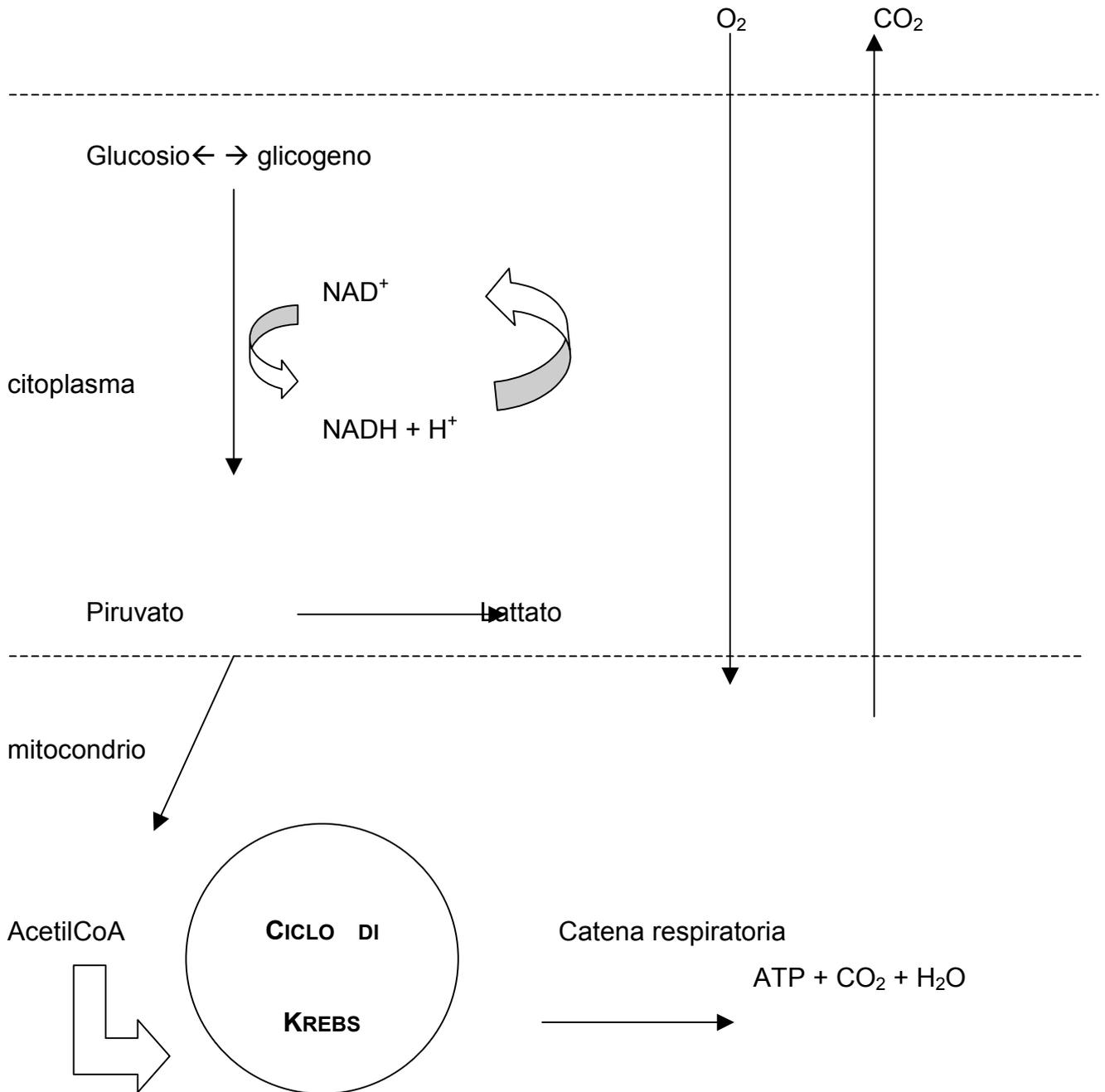
### **4.2- Il significato di soglia anaerobica**

L'esatta determinazione della soglia anaerobica è un parametro fondamentale negli sport di resistenza di lunga durata, in quanto la capacità di prestazione non è strettamente correlata con il massimo consumo di ossigeno ( $VO_{2max}$ ), cioè con la potenza aerobica, ma piuttosto con la più alta percentuale di esso che si è in grado di utilizzare senza intaccare significativamente i meccanismi di ricarica di tipo lattacido.

L'intensità di lavoro riferita alla frequenza cardiaca, alla potenza meccanica, alla velocità corrispondente alla suddetta percentuale del  $VO_{2max}$ , è definita soglia anaerobica. Quando, nel caso della competizione o dell'allenamento, si supera questa intensità di lavoro, si innesca uno squilibrio tra la produzione e la metabolizzazione dell'acido lattico (fig. 4), comportando un accumulo nei muscoli impegnati nel lavoro che costringe l'atleta alla diminuzione del carico.

Esisterebbe quindi un livello di  $VO_2$  al quale il rifornimento di  $O_2$  non soddisfa interamente la richiesta di  $O_2$  da parte dei mitocondri dei muscoli in attività: lo sbilanciamento tra richiesta e disponibilità di  $O_2$  fa aumentare la glicolisi anaerobica per generare ulteriore energia, convertendo il piruvato in lattato.

sangue



**Fig. 4:** esemplificazione del percorso seguito dal glucosio per la produzione di ATP: l'incremento della glicolisi, conseguente ad un aumento di intensità nell'esercizio fisico, causa un aumento di produzione di piruvato, ridotto a lattato dal NADH, il quale ossidandosi può riprendere parte alla glicolisi (da Wasserman et al, 1986).

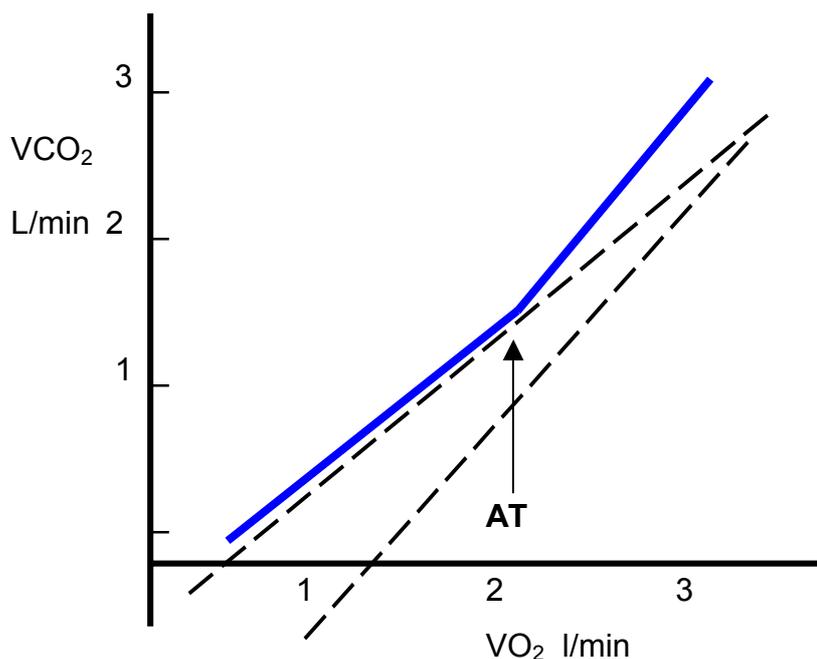
In individui allenati, la soglia anaerobica può non essere osservata prima che l'esercizio raggiunga una intensità pari ad un livello 10-15 volte superiore al  $VO_2$  di riposo. In soggetti sedentari, invece, la soglia anaerobica si ritrova circa 4 volte sopra il valore di riposo e in pazienti con problemi cardiaci soltanto a due volte il valore di  $VO_2$  basale. L'accumulo di lattato determina:

- un abbassamento del pH nell'organismo (acidosi metabolica);
- alterazione delle cinetiche del consumo di ossigeno e eliminazione della  $CO_2$ ;
- aumento della ventilazione ( $V_e$ ) per stimolazione dei chemorecettori, sensibili alla diminuzione del pH.

### 4.3 - Determinazione della AT

Partendo dal presupposto che la media delle persone è in grado di sostenere esercizi di intensità pari alla propria massima capacità aerobica per non oltre 10-12 minuti, è bene che i test atti a calcolare il valore del  $VO_{2max}$  abbiano una durata non superiore a tale valore, ma allo stesso tempo non inferiore agli 8 minuti, per non richiedere eccessivi incrementi da un carico al successivo con attivazione di meccanismi anaerobici nel transiente.

Un test per la misura della AT consiste in un esercizio a carico incrementale, durante il quale vengono misurati respiro per respiro diversi parametri ventilatori e metabolici. L'analisi grafica dell'andamento di questi parametri permette la determinazione di due momenti significativi nell'esercizio; il primo corrisponde alla **soglia anaerobica o ventilatoria**: Beaver ha proposto una tecnica per la determinazione di tale soglia, chiamata "V-slope", che individua AT nel punto in cui la relazione tra  $VO_2$  (l/min) sull'asse delle ascisse e la  $VCO_2$  (l/min), sull'asse delle ordinate subisce un incremento nella sua inclinazione (fig. 5).



**Fig. 5:** determinazione della AT col metodo V-slope: la linea meno inclinata rappresenta la produzione di  $\text{CO}_2$  nel muscolo in funzione di un certo valore di  $\text{VO}_2$ ; la retta più inclinata include la  $\text{CO}_2$  generata dal tamponamento dell'acido lattico da parte del bicarbonato (da Wasserman et al., 1986).

Le variazioni individuate dipendono solo dalla tamponamento degli  $\text{H}^+$  liberati dall'acido lattico con il bicarbonato e sono indipendenti dalla sensibilità dei chemorecettori ai cambiamenti del contenuto di  $\text{CO}_2$  e del pH del sangue.

Sopra la AT, l'incremento della  $\text{VO}_2$  rimane relativamente lineare mentre l'incremento della  $\text{VCO}_2$  subisce una accelerazione quale conseguenza del tamponamento dell'acido lattico da parte del bicarbonato. Questo incremento della  $\text{VCO}_2$  è normalmente accompagnato da un parallelo incremento della ventilazione ( $\text{V}_e$ ), così da mantenere la  $\text{CO}_2$  arteriosa ( $\text{PaCO}_2$ ) e alveolare ( $\text{PetCO}_2$ ) relativamente costanti.

L'equivalente ventilatorio dell' $\text{O}_2$  ( $\text{Ve}/\text{VO}_2$ ), che è diminuito o rimasto invariato sotto la AT, comincia a crescere sopra la soglia stessa senza un incremento dell'equivalente ventilatorio della  $\text{CO}_2$  ( $\text{Ve}/\text{VCO}_2$ ). Di conseguenza l' $\text{O}_2$  alveolare ( $\text{PetO}_2$ ) aumenta anch'esso in corrispondenza della AT mentre la  $\text{CO}_2$  alveolare ( $\text{PetCO}_2$ ) invece non varia sopra la AT, in quanto l'aumento della ventilazione riesce a smaltire la  $\text{CO}_2$  prodotta in eccesso dal bicarbonato (*tamponamento isocapnico*, vedi anche cap. 7.5).

L'aumento della  $V_e/VO_2$  senza un contemporaneo aumento di  $V_e/VCO_2$  e l'incremento di  $PetO_2$  aumenta senza un contemporaneo calo di  $PetCO_2$  sono degli specifici indicatori del superamento della soglia anaerobica.

Il quoziente respiratorio (QR, dato da  $VCO_2/VO_2$ ), che normalmente sale lentamente durante i test incrementali, a partire dalla AT sale più velocemente.

La fase di tamponamento isocapnico termina con la **seconda soglia ventilatoria**: dopo tale soglia interviene la compensazione respiratoria all'acidosi metabolica, individuabile da un incremento del rapporto  $V_e/VCO_2$  e un calo nella  $PetCO_2$ . Infatti la  $V_e$  viene fortemente incrementata dall'azione degli idrogenioni ormai abbondanti sui chemorecettori, i quali vanno a stimolare, incrementandola, la ventilazione.

### **Intensità dell'esercizio**

La cinetica del  $VO_2$  varia a seconda dell'intensità di lavoro; si distinguono quindi tre diversi "domini":

- il primo dominio è denominato **esercizio moderato**; esso non induce variazioni nel lattato ematico e quindi si parla di *intensità moderata*. Il limite superiore di questo dominio corrisponde alla **soglia anaerobica (AT)**.
- il secondo dominio è denominato **esercizio intenso**; l'intensità di lavoro in questo caso è superiore alla AT e il tasso di produzione di lattato supera quello del suo smaltimento, per cui il lattato ematico inizia ad aumentare. Esso può stabilizzarsi a un nuovo livello, più elevato di quello iniziale, se l'intensità di lavoro è inferiore al *massimo stato stazionario di lattato (MLSS)*. Quindi, un lavoro di intensità compresa tra AT e MLSS è considerato ad *elevata intensità*.
- il terzo dominio è chiamato **esercizio severo**. Il lavoro è condotto al di sopra della MLSS e ne risulta un costante aumento del lattato ematico. In questo caso si parla di esercizio condotto a *intensità severa*.

## 5 – MASSIMA POTENZA AEROBICA (VO<sub>2</sub>max)

La quantità di ossigeno che l'organismo deve assumere è regolata dal livello metabolico cellulare. La quantità minima necessaria a soddisfare le esigenze vitali è definita *metabolismo basale*. Il consumo di ossigeno (VO<sub>2</sub>) aumenta all'aumentare del fabbisogno cellulare. Esiste un limite massimo individuale che rappresenta la massima potenza esprimibile sulla base di processi metabolici aerobici. Questo valore è il *massimo consumo di ossigeno* (VO<sub>2</sub>max) ed è espresso in litri al minuto (l/min.). Tale unità è valida solo nel caso degli sport in cui il peso corporeo non rappresenti un fattore limitante (nuoto), mentre negli sport antigravitari (corsa) il VO<sub>2</sub>max deve necessariamente essere normalizzato con il peso corporeo (ml/Kg · min<sup>-1</sup>), per omogeneizzare anche soggetti di taglia corporea diversa. Anche tale approccio, in realtà, non è sufficientemente accurato in quanto la massa corporea è composta anche da tessuto adiposo inattivo, quindi sarebbe necessario normalizzare solamente per la massa magra del soggetto.

### 5.1- Valori e andamenti del VO<sub>2</sub> max

Il massimo consumo di ossigeno è determinato in larga misura da caratteristiche genetiche: tale affermazione è suffragata da numerosi studi sull'argomento, i quali dimostrano che l'aumento del VO<sub>2</sub>max per effetto dell'allenamento di lunga durata è del 15-20% al massimo, mentre la differenza tra un non atleta, anche allenato, e un atleta di fondo è del 50-70%. In poche parole, l'allenamento da solo non è sufficiente a creare un atleta, ma è necessaria una predisposizione genetica, almeno per alcune discipline.

L'allenamento, oltre a indurre un aumento della massima gittata cardiaca (Q<sub>max</sub>) (Saltin et al., 1968), determina un incremento della densità capillare, della massa complessiva dei mitocondri nei muscoli e dell'attività degli enzimi ossidativi (Andersen et al., 1977; Henriksson et al., 1977): tali cambiamenti determinano un aumento del VO<sub>2</sub>max di circa il 20% (di Prampero et al., 1990).

Una grossa importanza sul VO<sub>2</sub>max ha l'età: i più alti valori di VO<sub>2</sub>max normalizzati rispetto al peso corporeo si raggiungono nella seconda decade di vita per poi diminuire lentamente ma costantemente durante tutta l'esistenza.

## 5.2- Fattori limitanti il $VO_2\max$

Si è discusso a lungo su quali fossero i fattori che limitano il massimo consumo di ossigeno. I ricercatori si sono divisi tra chi sosteneva che il principale meccanismo limitante fosse a livello *periferico* e chi affermava invece che dovevano essere fattori *centrali* a limitare il  $VO_2\max$ .

I **fattori centrali** si distinguono in:

- capacità di assunzione dell'ossigeno (ventilazione polmonare e diffusione dell'ossigeno dagli alveoli polmonari al sangue dei capillari polmonari),
- capacità di trasporto dell'ossigeno (legame dell' $O_2$  con il suo vettore emoglobina, concentrazione dell'emoglobina nel sangue, capacità del cuore di pompare sangue ossigenato ai muscoli).

Il **fattore periferico** è dato dalla capacità di utilizzazione dell'ossigeno (capillarizzazione, diffusione dell' $O_2$  dai capillari muscolari ai mitocondri, capacità dei mitocondri di utilizzare l' $O_2$ ).

Normalmente, tutti questi fattori intervengono, nell'esecuzione dell'esercizio fisico, a limitare il  $VO_2\max$ . Alcuni ricercatori (di Prampero & Ferretti, 1990) hanno cercato di capire dove risiedesse la maggiore resistenza, stabilendo che il fattore che maggiormente incide è la capacità di trasporto dell'ossigeno, quindi la capacità del cuore di pompare sangue ricco di ossigeno ai muscoli che lavorano. Secondo loro, in condizioni fisiologiche, a livello del mare e durante un lavoro con grandi gruppi muscolari (corsa, cicloergometro, ecc.), il 70-75% dei fattori limitanti è appunto costituito dalla capacità di trasporto dell'ossigeno, mentre gli altri fattori (perfusione muscolare, capacità ossidativa dei mitocondri, ventilazione e diffusione alveolo-capillare dell' $O_2$ ) influiscono per il restante 25-30%. Tuttavia, in condizioni patologiche, in alta quota, o durante un lavoro con piccoli gruppi muscolari (armoergometro), il peso dei fattori cardiocircolatori diminuisce, mentre aumenta in uguale misura il peso dei fattori respiratori (in alta quota, o in alcune patologie polmonari) o dei fattori periferici (durante il lavoro con piccoli gruppi muscolari). Quando si afferma che la massima capacità di trasportare sangue ossigenato alla periferia ha un peso del 75%, si intende che, qualora fosse possibile aumentare del 100% il trasporto di  $O_2$ ,  $VO_2\max$  aumenterebbe del 75%. E' evidente quindi che tanto più alta è la percentuale limitante attribuita a una singola grandezza fisiologica, tanto più critico è quel fattore nello stabilire  $VO_2\max$ . Se questo dipendesse da una sola grandezza, il peso di quest'ultima corrisponderebbe, ovviamente, al 100%.

### 5.3- VO<sub>2</sub> di picco

La definizione del VO<sub>2</sub> max lo individua come il massimo consumo di ossigeno ottenibile da un soggetto.

Tuttavia, nell'esecuzione di test incrementali con diversi ergometri, i valori di VO<sub>2</sub> raggiunti dalla stessa persona sono sempre differenti e sono in genere superiori nel treadmill, leggermente inferiori (5-10%) al cicloergometro, molto inferiori (anche il 50%) all'armoergometro. Tali dati si riferiscono a soggetti normali; infatti, un ciclista potrà raggiungere un VO<sub>2</sub> superiore al cicloergometro piuttosto che al treadmill, in un fondista la differenza tra i due valori massimi di VO<sub>2</sub> (treadmill e cicloergometro) sarà molto maggiore rispetto al 5-10% ricordato. Pertanto, si preferisce parlare di VO<sub>2</sub> di picco specifico per quell'ergometro (VO<sub>2</sub>peak), che non necessariamente corrisponde al massimo consumo di ossigeno di quel soggetto.

A parità di potenza espressa, la Fc, la Ve, il VO<sub>2</sub> e la lattatemia sono più bassi negli esercizi svolti con ergometri per gli arti superiori rispetto a quelli per gli arti inferiori (Astrand et al., 1965). Il VO<sub>2</sub>max generalmente è, per esercizi con arti superiori, intorno al 64-80% del VO<sub>2</sub>max registrato con gli arti inferiori nei due sessi. La gittata cardiaca, al contrario, si può considerare simile nei due casi (Asmussen and Nielsen, 1955), mentre la pressione arteriosa è il solo parametro con valori più alti riscontrato negli esercizi con le braccia; questo perché le resistenze vascolari periferiche che entrano in gioco sotto sforzo sono sicuramente maggiori (Stenberg et al., 1967).

Le cause di queste differenze stanno nell'utilizzo di maggiori masse muscolari in certi esercizi piuttosto che in altri (con l'armoergometro si usano solamente le braccia), oppure di masse muscolari più allenate e quindi con un maggior volume di mitocondri e un letto capillare più diffuso (questo spiega perché un atleta ottiene valori di VO<sub>2</sub> elevati solo usando un ergometro che riproduca fedelmente il gesto tipico della sua specialità).

## 6 – CINETICA DEL CONSUMO DI OSSIGENO

L'osservazione degli scambi respiratori durante i primi minuti dell'esercizio può fornire preziose informazioni sulla regolazione del metabolismo ossidativo nei muscoli scheletrici: infatti, un veloce adeguamento del metabolismo alle aumentate richieste riduce la necessità di "disturbare" il metabolismo lattacido, con riflessi positivi sulla tolleranza all'esercizio e sulla fatica muscolare.

Tale osservazione può essere riportata per ogni variazione in aumento dell'intensità del carico. Limitandosi a considerare tali variazioni, si può ritenere che la rapidità con la quale il meccanismo aerobico è capace di adeguarsi a una variazione di richiesta energetica proveniente dai muscoli può essere un fattore non trascurabile ai fini della prestazione, perché un'eccessiva inerzia del metabolismo aerobico, per esempio, può comportare un conseguente incremento della quota di energia anaerobica.

Gli studi sulle cinetiche degli scambi gassosi in cominciarono già nei primi decenni del XX secolo, quando Hill e Lupton (1923) definirono la curva di adeguamento del consumo di ossigeno all'inizio di un esercizio con una funzione monoesponenziale con tempo di dimezzamento ( $t_{1/2}$ ) di 25 o 30 secondi.

La maggior parte delle funzioni cardiorespiratorie mostrano una tipica risposta monoesponenziale alle aumentate richieste energetiche, fino a raggiungere un nuovo stato di equilibrio. Tale fenomeno è particolarmente evidente nelle fasi iniziali di uno sforzo e assume il termine convenzionale di *onset del  $VO_2$* . L'incremento del  $VO_2$  avviene secondo una funzione esponenziale; in realtà il fenomeno non è così lineare. Il  $VO_2$  aumenta con un andamento caratteristico che presenta un primo aggiustamento rapido (fase I) di breve durata, seguito da una seconda fase (fase II) che rappresenta il vero e proprio *onset*. Il  $VO_2$  raggiunge uno stato stazionario, tipico delle funzioni esponenziali, solo per carichi di intensità inferiore alla soglia anaerobica.

Per carichi superiori, ma inferiori al  $VO_{2max}$ , il  $VO_2$  tende progressivamente ad aumentare anche se il carico esterno rimane costante; questo fenomeno si definisce fase lenta del  $VO_2$  (fase III).

## 6.1- Fase I del consumo di ossigeno

La fase I è l'immediato incremento degli scambi gassosi che si verifica all'inizio dell'esercizio. Dura circa 15 secondi ed è dovuto all'improvviso incremento del flusso sanguigno nei polmoni (Linnarson, 1974; Weissman et al., 1982), conseguente a sua volta all'aumento della Fc che si verifica immediatamente all'inizio di un lavoro muscolare. In questo periodo, il sangue proveniente dai muscoli in esercizio e modificato dal metabolismo cellulare, non è ancora arrivato ai polmoni. Poiché la composizione del sangue che vi si trova in questi primi secondi è determinata da condizioni di riposo, il valore di QR non subisce modifiche.

Dato che questa parte della curva del  $VO_2$ -on è considerata priva di implicazioni metaboliche, è normalmente esclusa dalle analisi.

## 6.2- Fase II del consumo di ossigeno

La fase II, che ha inizio dopo 15 secondi circa dall'inizio dell'esercizio e dura fino al 3° minuto, ha un andamento molto simile ad una funzione monoesponenziale:

$$VO_2(t) = (VO_2 \text{ basale} + A) * (1 - e^{-(t-TD)/\tau})$$

Dove:

$VO_2(t)$  =  $VO_2$  al tempo t;

$VO_2$  basale =  $VO_2$  all'inizio del test;

A = ampiezza della variazione, cioè differenza tra il  $VO_2$  allo stato stazionario e  $VO_2$  basale;

TD = time delay o ritardo, che identifica il momento in cui comincia la curva esponenziale;

$\tau$  = costante di tempo; identifica il tempo necessario perché il  $VO_2$  raggiunga il 63% del  $VO_{2ss}$  ( $VO_2$  di stato stazionario).

La costante di tempo è l'indice che viene normalmente utilizzato come espressione della minore o maggiore velocità di salita del  $VO_2$ . Essa viene facilmente calcolata dai dati raccolti durante il test mediante programmi dedicati o fogli di calcolo elettronici, e così pure il tempo di semireazione o  $t_{1/2}$ ; quest'ultimo è il tempo necessario a coprire il 50% della variazione tra il  $VO_2$  basale e il  $VO_{2ss}$ .

Il valore della tau nella maggioranza dei casi è di circa 30-40 s. Ciò corrisponde a un tempo di dimezzamento di 20-30 s e significa che dopo 100-150 s dall'inizio del lavoro il consumo di  $O_2$  ha raggiunto il 97% di  $VO_{2ss}$ .

La fase II è considerata la più importante, quella che ci dà le maggiori informazioni sul funzionamento del metabolismo ossidativo del soggetto. Essa riflette il periodo di maggior incremento nella respirazione cellulare ed è in questa fase che si determina il deficit di  $O_2$ . L'incremento degli scambi gassosi è dovuto sia all'aumento della gittata cardiaca, sia alla maggiore differenza nel contenuto in  $O_2$  (e  $CO_2$ ) nel sangue venoso rispetto alla concentrazione dello stesso negli alveoli polmonari.

Il presupposto perché possa essere correttamente elaborato l'algoritmo mono-esponenziale è che il  $VO_2$  raggiunga uno stato stazionario: ciò si verifica con certezza solo per carichi di lavoro inferiori alla soglia anaerobica. Quindi, lo studio dell'onset del  $VO_2$  si effettua correttamente sottoponendo il soggetto ad un test a carico costante e inferiore a quello della soglia anaerobica (Cerretelli, 1973).

Se invece l'esercizio è di intensità superiore alla AT, lo *steady state* verrà raggiunto più tardi o non sarà affatto raggiunto prima che la fatica interrompa il lavoro del soggetto, rendendo inapplicabile l'algoritmo sopra riportato, per l'impossibilità di determinare il fattore A (ampiezza della curva da  $VO_2$  basale a  $VO_{2ss}$ ).

### 6.3- Fase III del consumo di ossigeno

La fase III, che, per definizione, ha inizio dal terzo minuto dopo l'inizio del lavoro, si individua negli esercizi eseguiti al di sopra della AT e indica la velocità di incremento del  $VO_2$ , spesso correlata col grado di incremento del lattato. Tale fenomeno è denominato **componente lenta** del  $VO_2$  ed il suo significato è ancora un problema irrisolto. Su di esso si sono cercate diverse spiegazioni: esso è stato associato a fenomeni fisici (aumento della temperatura corporea), variazioni metaboliche (risintesi di glucosio a partire dal lattato prodotto) e, particolarmente, un maggiore reclutamento di fibre veloci (tipo II) (Gaesser and Poole, 1996).

La componente lenta quindi si evidenzia quando il soggetto è sottoposto a un carico di lavoro di intensità superiore a quella della soglia anaerobica. Essa si quantifica misurando di quanto è aumentato il  $VO_2$  rispetto all'atteso valore di steady state. Poiché si assume che tale stato di equilibrio si raggiunga entro 3 minuti dall'inizio del test, il valore del  $VO_2$  al terzo minuto viene considerato come punto di riferimento per determinare la componente lenta del  $VO_2$ . Questa è data per convenzione dalla differenza tra il  $VO_2$  al 6° minuto e il  $VO_2$  al 3° minuto (Gerbino et al., 1996).

E' necessario, per una corretta determinazione del carico, che il soggetto venga preventivamente sottoposto a un test per la determinazione della soglia anaerobica al fine di poter identificare il carico ottimale per la componente lenta.

Secondo alcuni Autori, la componente lenta del  $VO_2$  avrebbe un andamento del tutto simile alle due fasi che la precedono e cioè di tipo esponenziale (Barstow et al., 1996). Essa dovrebbe, perciò, essere meglio identificata come un algoritmo di tale tipo. Tuttavia la metodica di elaborazione in tal caso non appare essere ancora di facile utilizzazione.

La componente lenta può aumentare fino ad 1 l/min il consumo di ossigeno portandolo al  $VO_{2max}$  (Poole et al., 1988). Ciò significa che, sopra la soglia anaerobica, il costo energetico per unità di lavoro aumenta e l'efficienza del lavoro diminuisce in funzione del tempo. Sulle cause di questo fenomeno sono state avanzate ipotesi che prendono in considerazione fattori quali catecolamine, acido lattico, idrogenioni che potrebbero fare da stimolatori metabolici con effetti in varie sedi, a livello periferico (sugli arti che lavorano) o centrale (sul resto del corpo). I possibili fattori periferici includono il reclutamento di fibre veloci, dallo scarso potere ossidativo, l'aumento della temperatura dei muscoli attivi, una diminuita efficienza del lavoro dovuta all'accumulo di cataboliti (potassio, idrogenioni). Tra i fattori centrali vi sono un aumento del consumo di  $O_2$  associato ad un incremento nella

ventilazione, nella frequenza cardiaca, nella temperatura corporea, nel metabolismo del fegato. Riguardo il legame tra aumento della  $V_e$  e crescita della  $VO_2$ , vi sono però chiari esempi che negherebbero tale relazione, mostrando una progressiva crescita della ventilazione nonostante la curva della  $VO_2$  fosse ormai stabile, in esercizi intensi ( $>AT$ ) (Poole et al., 1988; Rowell, 1971). Allo stesso modo, studi condotti da Koga et al. (1997) avrebbero dimostrato come l'aumento di temperatura corporea non sarebbe la causa della crescita del  $VO_2$ .

La componente lenta del  $VO_2$  sembra essere molto legata alla concentrazione del lattato nel sangue:

- essa infatti si ritrova solo in esercizi nei quali vi sia una sostenuta acidosi nel sangue (Whipp et al., 1972);
- l'ampiezza della componente lenta è quantitativamente legata al grado di acidosi del sangue (Roston et al., 1987);
- il profilo temporale del  $VO_2$  e del lattato nel sangue in esercizi sopra la AT sono fortemente correlate (Poole et al., 1988); in particolare, Barstow (1994) ha dimostrato che la componente lenta del  $VO_2$  comincerebbe ad essere presente dopo 80-120 secondi dall'inizio di un esercizio ad intensità  $>AT$ , quando il lattato nel sangue ha già raggiunto una elevata concentrazione.

Secondo Brooks (1986), oltre il 70% del lattato prodotto durante un esercizio intenso viene ossidato all'interno degli stessi muscoli in lavoro, mentre la parte rimanente viene rimossa attraverso la gluconeogenesi epatica o in altro modo. Il processo biochimico dell'ossidazione del lattato determinerebbe un lento incremento di  $VO_2$  durante l'esercizio. Uno studio di Poole et al. (1991) ha invece suggerito che la componente lenta del  $VO_2$  sarebbe associata a fattori interni al muscolo stesso. Il muscolo scheletrico comprende due tipi di fibre: le fibre di *tipo I* e quelle di *tipo II*; a loro volta, le seconde possono essere ulteriormente divise in fibre di *tipo II a* e di *tipo II b*. Le ultime hanno un potenziale ossidativo molto minore delle fibre di tipo I: esse consumano molto più  $O_2$  delle fibre del tipo I per il medesimo lavoro effettuato (Willis and Jackman, 1994). Diversi studi hanno dimostrato come il reclutamento di fibre di tipo II aumenta in proporzione all'intensità dell'esercizio (Vollestad and Blom, 1985), mentre Barstow et al. (1996) hanno riportato una correlazione negativa tra l'ampiezza della componente lenta del  $VO_2$  e la percentuale di fibre del tipo I nei muscoli in esercizio (vasto laterale), indicando che la diversa composizione di fibre di un muscolo ha una grande influenza nella componente lenta del  $VO_2$  durante un esercizio. Da questi studi quindi sembra possibile affermare che il

reclutamento di fibre di tipo II b sarebbe il principale fattore della componente lenta del  $\text{VO}_2$ .

L'allenamento riduce l'ampiezza della componente lenta della  $\text{VO}_2$  proporzionalmente alla riduzione del lattato ematico (Casaburi et al., 1987); l'allenamento però determina anche una riduzione della ventilazione e dell'adrenalina prodotta alla stessa intensità di lavoro, per cui non si può affermare che sia la riduzione di lattato ematico a ridurre l'ampiezza della componente lenta. Gaesser and Poole (1996) hanno suggerito che l'allenamento può far variare il reclutamento delle fibre: dopo un periodo di allenamento, verrebbero reclutate meno fibre di tipo II b, contribuendo così a diminuire la componente lenta del  $\text{VO}_2$ .

#### **6.4- Cinetica del consumo di ossigeno nella fase di recupero ( $\text{VO}_2$ -off)**

Alla fine di un lavoro, il consumo di  $\text{O}_2$  ritorna ai valori di riposo secondo una funzione più complessa di quella che descrive la fase -on, in cui è possibile identificare almeno tre componenti:

- a) una componente rapida, esponenziale semplice, con costante di tempo ( $\tau$ ) di circa 40 s, che corrisponde alla resintesi di PCr idrolizzata all'inizio del lavoro;
- b) una componente lenta, con costante di tempo di circa 15 min, generalmente attribuita a un non meglio identificato aumento del metabolismo di riposo dovuto all'esercizio precedente;
- c) un'ulteriore componente lenta, con costante di tempo di circa 20 min, associata alla eliminazione dell'acido lattico dal sangue. L'entità di questa terza componente dipende, ovviamente, dalla quantità di acido lattico accumulato nel corso dell'esercizio. Essa è comunque molto variabile da soggetto a soggetto e dipende dal grado di allenamento e dal tipo di ristoro: ad esempio, essa è notevolmente ridotta se, alla fine dell'esercizio, il soggetto compie un esercizio moderato.

Con l'eccezione degli esercizi molto deboli, il valore del deficit di  $\text{O}_2$  è molto maggiore del corrispondente debito di ossigeno, indipendentemente dal carico di lavoro e dalla posizione. Ciò è evidente soprattutto negli esercizi eseguiti con le braccia in posizione supina. Questi risultati sono necessariamente accompagnati da un  $\text{VO}_2$ -on più lento del  $\text{VO}_2$ -off e da una momentanea produzione di lattato anche a livelli di carico relativamente bassi. La determinazione dei  $t_{1/2}$  della fase di recupero nel  $\text{VO}_2$  ( $\text{VO}_2$ -off) ha fornito valori sempre minori della fase -on e compresi tra i 20 e i 30 secondi indipendentemente dalla

posizione di lavoro, tipo di esercizio e abbastanza costanti tra i diversi soggetti con varie condizioni di allenamento (Hughson et al., 1982; Hughson and Tschakovsky, 1999).

## **6.5- La cinetica del consumo di ossigeno: meccanismi centrali e periferici**

Esiste un generale accordo riguardo al fatto che la cinetica del  $VO_2$  sia un indice delle condizioni generali dell'integrità dei sistemi polmonare, cardiovascolare e muscolare ed esso risulta da un delicato intreccio tra i vari meccanismi di regolazione del rilascio di  $O_2$  e del suo utilizzo da parte dei muscoli (Cerretelli et al., 1987; Whipp et al., 1980; Whipp et al., 1990).

E' necessario conoscere innanzitutto i complessi meccanismi che determinano e limitano le fasi iniziali della cinetica del consumo di ossigeno ( $VO_{2-on}$ ); tali meccanismi sono stati a lungo studiati e dibattuti; vi è chi considera il fattore limitante essere principalmente legato alla rapidità nell'aggiustamento del rilascio dell' $O_2$  a livello dei muscoli in esercizio (Hughson, 1990; Hughson et al., 1996; MacDonald et al., 1997) e chi sostiene il concetto secondo il quale il fattore limitante sarebbe soprattutto l'inerzia del metabolismo ossidativo dei muscoli (Cerretelli et al., 1980; Whipp et al., 1980).

La cinetica del  $VO_{2-on}$  (primi minuti dell'esercizio) e del  $VO_{2-off}$  (quella che segue la fine del carico) nell'uomo è costantemente più lenta dell'aggiustamento della gittata cardiaca (Cerretelli et al., 1966; Pendergast et al., 1980). Tale scoperta potrebbe significare che il trasporto dell'ossigeno ai muscoli in esercizio nella fase di passaggio dal riposo al lavoro non è il fattore limitante della cinetica del  $VO_2$ . Questa asserzione è applicabile anche durante il passaggio da un certo carico di lavoro ad uno più intenso (Davies et al., 1972).

In contrasto con queste ricerche, altri studi (Hughson et al., 1982; Hughson and Tschakovsky, 1999) sembrano indicare che, in particolari condizioni, nel caso specifico esercizi eseguiti con le braccia dalla posizione supina, i fattori circolatori possono diventare responsabili di parte del ritardo dell'adeguamento del  $VO_2$  durante la fase *on*.

La cinetica di adeguamento del flusso sanguigno nei muscoli impegnati nell'esercizio, definita come il tempo necessario per raggiungere un flusso costante dopo l'inizio del lavoro, entro l'80% della massima potenza aerobica, è, in molti casi, minore di 30 secondi (con un tempo di dimezzamento minore di 5 secondi), in esercizi eseguiti sia con le braccia sia con le gambe dalla posizione supina. Tale adattamento è quindi dalle 3 alle 4

volte più rapido del  $\text{VO}_2\text{-on}$  (Pendergast et al., 1980). Da ciò si deduce che anche a livello muscolare il flusso sanguigno è in molti casi adeguato.

Questa affermazione è stata poi supportata da altre ricerche (Grassi et al., 1996) le quali hanno mostrato che durante i primi 15 secondi circa dell'esercizio (al cicloergometro), l'adeguamento del rilascio dell'ossigeno ai muscoli è molto più rapido dell'aumento del suo utilizzo da parte dei muscoli stessi. Ricerche effettuate sui cani, hanno anch'esse evidenziato come, per carichi di lavoro all'incirca del 70% del  $\text{VO}_2\text{peak}$ , il rilascio dell'ossigeno ai muscoli non sia il fattore limitante la cinetica del  $\text{VO}_2\text{-on}$  (Grassi et al., 1998). Lo stesso non può dirsi per carichi di lavoro superiori alla AT, per i quali invece il rilascio dell'ossigeno ai muscoli pare essere uno dei fattori limitanti la cinetica del  $\text{VO}_2\text{-on}$  (Gerbino et al., 1996; MacDonald et al., 1997).

Un altro fattore limitante il consumo di ossigeno sarebbe l'ingresso dell'ossigeno nei mitocondri, ingresso che avviene, come per qualsiasi gas, per diffusione. Oltre a influenzare la cinetica, tale processo limiterebbe il  $\text{VO}_2\text{max}$  (Wagner, 1996).

Gli studi condotti da Grassi e dai suoi collaboratori (Grassi et al., 1998a), però, su soggetti che respiravano una miscela iperossica, non hanno evidenziato variazioni nella cinetica del  $\text{VO}_2\text{-on}$ , portando alla conclusione secondo cui, per carichi di lavoro al di sotto della AT, neppure fattori periferici sarebbero i primi responsabili della lentezza degli adeguamenti al consumo di ossigeno nelle prime fasi dell'esercizio. La conclusione, secondo tali Autori (Grassi et al., 1998a; Grassi et al., 1998b), è che fino al 70% circa del  $\text{VO}_2\text{peak}$ , la cinetica del consumo di ossigeno nei primi 3 minuti di un esercizio è maggiormente determinata da una intrinseca inerzia del metabolismo ossidativo. Il ritardo potrebbe essere dovuto ad alcuni controllori metabolici e/o all'attivazione di determinati enzimi, tra i quali l'attività del piruvato-deidrogenasi giocherebbe un importante ruolo (Timmons et al., 1997; Timmons et al., 1998).

La cinetica del  $\text{VO}_2\text{-on}$  sarebbe accelerata quando il carico di lavoro si aggiunge ad un altro lavoro già presente ed eseguito con gli stessi oppure con altri muscoli (Davies et al., 1972; di Prampero et al., 1989). Questa sarebbe una ulteriore conferma dell'"inerzia metabolica" quale causa principale del ritardo nell'adeguamento del  $\text{VO}_2$  alle richieste energetiche, anche se va riportato come altri studiosi (Casaburi et al., 1977; Hughson and Morrissey, 1982) non siano stati in grado di confermare tali scoperte.

## 6.6- Cinetica del consumo di ossigeno in esercizi eseguiti con gli arti superiori

Numerosi studi dimostrano che la cinetica del consumo di ossigeno durante i minuti iniziali di un esercizio eseguito all'armonometro è sensibilmente più lenta rispetto ad un esercizio di pari intensità eseguito dagli stessi individui al cicloergometro (Cerretelli et al., 1979; Cerretelli et al., 1977; Pendergast et al., 1980). Per spiegare tale fenomeno sono state proposte limitazioni metaboliche e circolatorie (Cerretelli et al., 1979; Pendergast et al., 1980). In particolare, Hughson e Morrissey (1983) sostengono sia il trasporto di ossigeno il principale fattore limitante l'onset del  $\text{VO}_2$  in esercizi a carico costante eseguiti con le braccia, ipotesi che trova riscontro anche nei test eseguiti da Hughson and Imman (1986) su soggetti testati con e senza occlusione della circolazione negli arti inferiori: la cinetica della  $\text{VO}_2$  risultava costantemente e significativamente più rapida quando fosse stato bloccato il flusso sanguigno nelle gambe (mean response time  $66.0 \pm 26.4$  vs  $81.2 \pm 37.5$  s).

Anche la posizione in cui viene svolto l'esercizio ha una grande importanza: infatti, se l'esercizio è svolto in posizione supina, la gravità ha una influenza negativa e rallenta la cinetica del  $\text{VO}_2$  rispetto allo stesso esercizio eseguito in piedi (Cerretelli et al., 1977). In particolare, il tempo di dimezzamento ( $t_{1/2}$ ) del  $\text{VO}_2$ -on in esercizi eseguiti con le braccia dalla posizione supina risulta essere maggiore rispetto a simili livelli di lavoro (in valore assoluto e relativo) eseguiti con gli arti inferiori nella stessa posizione (Cerretelli et al., 1977). Poiché i fattori gravitazionali sono gli stessi nella posizione supina per tutti gli arti, fattori meccanici locali associati all'impugnatura sembrerebbero indebolire il precoce flusso sanguigno nelle braccia.

## 6.7- Influenza dell'età sulla cinetica del consumo di ossigeno

**Bambini:** confrontati agli adulti, i bambini hanno un minor peso corporeo, una dimensione inferiore, un minor  $\text{VO}_2\text{max}$  e un più alto metabolismo basale. Questi fattori però non sembrano influenzare la cinetica del  $\text{VO}_2$  durante esercizi moderati, che sembra essere la stessa nei bambini come negli adulti, a differenza della cinetica della  $F_c$  che sarebbe più lenta nei bambini (Cooper et al., 1985). Vi sono invece differenze durante esercizi ad elevata intensità: Armon et al. (1991) hanno osservato che quasi il 50% dei bambini del loro studio non mostravano alcuna componente lenta durante un esercizio intenso, mentre

in quelli che la evidenziavano la stessa aveva una ampiezza espressa in l/min e in ml/kg/min sempre minore rispetto agli adulti; inoltre l'ampiezza non variava all'aumentare dell'intensità dell'esercizio. E' risaputo che i bambini hanno una minore capacità di sfruttare la glicolisi anaerobica rispetto agli adulti e quindi non sono in grado di produrre elevati livelli di lattato durante esercizi intensi (McArdle et al., 1996); l'assenza della componente lenta nei bambini può essere legata quindi alla loro scarsa abilità a produrre lattato (Armon et al., 1991), anche se abbiamo visto prima (cap. 6.3) come le cause della componente lenta sarebbero da ricercare soprattutto nel maggior reclutamento di fibre di tipo II.

**Anziani:** l'invecchiamento è associato al declino nelle funzioni cardiorespiratorie e nella capacità ossidativa dei muscoli (Paterson, 1992). Di conseguenza è influenzata la cinetica del  $VO_2$ : la fase II di un esercizio moderato eseguito al cicloergometro risulta essere più lenta in funzione dell'età (Babcock, 1994). La lentezza della cinetica del  $VO_2$  è associata ad una più lenta risposta di adattamento della Fc (Chilibeck, 1996). Lo stesso non si può dire invece per esercizi condotti con muscoli utilizzati durante la vita di tutti i giorni (Chilibeck, 1996), il cui potenziale ossidativo rimarrebbe invariato nel corso degli anni. Quindi, buona parte della variabilità nella cinetica del  $VO_2$  che si riscontra in generale tra i soggetti sarebbe dovuta al livello di allenamento. Il cambiamento di stile di vita, soprattutto la riduzione delle attività giornaliere, possono causare il declino della forma fisica negli anziani. I molti studi effettuati hanno ampiamente dimostrato come un allenamento alla resistenza possa produrre significativi adattamenti a livello cardiorespiratorio e muscolare sia nei giovani sia negli adulti; meno si sa invece sul miglioramento delle cinetiche grazie all'allenamento. Recentemente, Phillips et al. (1995) hanno osservato come la cinetica del  $VO_2$  migliori in seguito all'allenamento (vedi anche cap. 6.9) nei giovani, ma resta ancora da chiarire se tali osservazioni possono essere fatte anche per gli anziani.

## **6.8- Cinetica del consumo di ossigeno in condizioni patologiche**

Condizioni patologiche che riguardano le funzioni cardiopolmonari e la capacità ossidativa dei muscoli possono alterare la cinetica del  $VO_2$ . Se comparati con individui sani, soggetti con problemi cardiaci congeniti mostrano una fase II più lenta e un minor incremento del  $VO_2$  durante la fase I (Sietsema et al., 1986) e così pure pazienti con cronici problemi

ostruttivi polmonari (Nery et al., 1982). Le elevate resistenze vascolari nei polmoni, che riducono la possibilità di aumentare il flusso sanguigno all'inizio dell'esercizio, sono la principale causa della riduzione della fase I del  $VO_2$  (Whipp and Ward, 1990).

Soggetti che abbiano subito un trapianto di cuore mostrano una cinetica del consumo di ossigeno molto più lenta rispetto ai soggetti di controllo (Cerretelli et al., 1988; Grassi et al., 1997). Le cause sarebbero da attribuirsi al "disallenamento" dovuto al periodo trascorso in ospedale ed al trattamento farmacologico subito.

## **6.9- Effetti dell'allenamento sulla cinetica del $VO_2$**

E' facile aspettarsi che non tutti mostrino la medesima cinetica nel raggiungere il nuovo stato stazionario all'inizio di un esercizio; l'efficienza del sistema cardiorespiratorio, che consentirà di raggiungere tale stadio più velocemente, è legata soprattutto ad una predisposizione genetica e allo stato di allenamento del soggetto.

La cinetica del  $VO_2$  nella fase iniziale dell'esercizio inoltre appare essere più sensibile all'allenamento rispetto alla massima potenza aerobica ( $VO_{2max}$ ) o alla AT (Fukuoka et al., 1999. Phillips et al., 1995) e può quindi essere utilizzata come sistema per valutare il livello di "condizionamento aerobico" in pazienti, soggetti in salute, atleti. E' infatti dimostrato (Hickson et al., 1978) che individui allenati riducono sensibilmente il tempo di cui l'organismo necessita per adeguarsi a diversi livelli di lavoro e tale differenza è più evidente più il lavoro è elevato. Tali differenze sono state studiate sia per quanto riguarda l'assunzione di ossigeno nei polmoni, sia sulla frequenza cardiaca ed hanno entrambe mostrato un andamento parallelo.

L'allenamento quindi influenza positivamente la cinetica della  $VO_{2-on}$  (e, in misura minore, anche la fase  $-off$ ) riducendo l'accumulo di lattato (Cerretelli et al., 1979), con benefici effetti sulla contrazione del debito di ossigeno.

A loro volta, individui sedentari possono ottenere quegli adattamenti fisiologici che consentono di rispondere prontamente all'aumento della richiesta di energia che si verifica nei muscoli all'inizio di un esercizio fisico. Una regolare e moderata attività fisica, infatti (2h/g, 60% di  $VO_{2peak}$ ), consente di raggiungere più velocemente lo stato stazionario già dopo soli 4 giorni di allenamento, eseguendo non solo esercizi allo stesso carico assoluto, ma anche allo stesso carico relativo (Hickson et al., 1978) (tab. 3), nonostante sia dimostrato che il tempo richiesto per raggiungere lo stato stazionario nella  $VO_2$  sia

maggiore nei carichi di lavoro più elevati (Wasserman et al., 1967). Nei primi giorni di attività invece non sembrano subire modifiche apprezzabili il  $VO_{2peak}$  e il potenziale ossidativo dei mitocondri; prolungando l'attività fisica per diverso tempo, anche il  $VO_{2peak}$  subirebbe un incremento significativo ( $10,5 \pm 3,2\%$  dopo 30 giorni), mentre la  $V_e$  massima e la  $F_c$  massima non subiscono modifiche apprezzabili (Wasserman et al., 1987).

$VO_{2MAX}$	Pre-Training.	Post-Training	Post-Training
		Stessa Intensità relativa	Stessa intensità assoluta
%	Sec	Sec.	Sec.
50 %	$32.4 \pm 3.2$	$27.5 \pm 1.4$	$33.1 \pm 0.7$
60 %	$38.1 \pm 2.1$	$30.1 \pm 1.3$	$31.9 \pm 1.1$
70%	$41.8 \pm 1.6$	$34.0 \pm 1.2$	$34.5 \pm 1.2$

**Tab. 3:** Effetti dell'allenamento sul tempo necessario per raggiungere il 50% del totale aumento di  $VO_2$  durante un esercizio della durata di 5 minuti a diverse intensità di lavoro (Hickson et al., 1978).

Sembra che il meccanismo responsabile, almeno in parte, di tale fenomeno sia un più rapido incremento nella gittata cardiaca e/o flusso sanguigno nei muscoli durante i primi minuti di esercizio (Phillips et al., 1995, Shoemaker et al., 1996). Prolungando l'allenamento nel tempo, cresce anche la concentrazione degli enzimi ossidativi nei muscoli e anche questo può contribuire a velocizzare la cinetica del consumo di ossigeno (Hickson et al., 1978; Spina et al., 1996; Yoshida et al., 1994). In parallelo con le modifiche nella cinetica della  $VO_2$ , vi sono cambiamenti anche nella cinetica della frequenza cardiaca.

L'allenamento ha influenza anche sulla concentrazione di lattato nel sangue, che si riduce già dopo 4 giorni di allenamento (2 ore/giorno) (Phillips et al., 1995). Alla stessa conclusione sono giunti Karlsson et al. (1972), evidenziando come la concentrazione di lattato subisce un minor incremento in risposta alla stessa intensità di lavoro dopo l'allenamento. Quindi, nei soggetti allenati la disponibilità di ossigeno copre più velocemente la sua domanda da parte dei muscoli rispetto ai soggetti non allenati, con conseguente minor ipossia degli stessi muscoli nei soggetti allenati alla stessa intensità di lavoro (Hickson et al., 1978).

La variazione della cinetica del  $VO_2$  nella fase iniziale dell'esercizio, comunque, riguarda solamente la fase II della cinetica e non la fase I (primi 15-20 secondi), la quale non sembra essere influenzata da alcun programma di allenamento. Ciò è messo in discussione da altri studi, secondo i quali la durata della fase I dopo soli 4 giorni di

allenamento subirebbe una diminuzione media del 38%, restando poi invariata al 30° giorno, mentre la fase II, più rapida già dopo 4 giorni, continuerebbe a diminuire di durata col proseguire dell'allenamento (Phillips et al., 1995).

Così come l'allenamento condiziona positivamente la cinetica del  $VO_2$ , il decondizionamento forzato quale può essere il riposo a letto di un paziente provoca una serie di conseguenze opposte, quali una cinetica più lenta e una diminuzione del  $VO_{2max}$  (Convertino et al., 1984).

## 6.10- Modelli di valutazione delle cinetiche

Abbiamo già osservato come nella cinetica degli scambi gassosi all'inizio di un esercizio moderato (<AT) siano distinguibili due distinte fasi: la fase I, o "cardiodinamica", attribuita all'incremento quasi istantaneo della perfusione polmonare e la fase II, che segue di una ventina di secondi l'inizio dell'esercizio e che è attribuita all'arrivo ai polmoni del sangue dai muscoli impegnati nel lavoro.

La distinzione di queste fasi è netta in particolare quando si passa da una situazione di riposo assoluto ("no-load") al carico prestabilito, mentre è molto meno evidente se si passa, come prevedono molti protocolli, tra cui quello da noi utilizzato, da un lavoro a carico nullo (free-well) a quello previsto (Whipp et al., 1982).

Ciò che è interessante notare è che il tipo di curva che descrive il consumo di ossigeno ( $VO_2$ ), la ventilazione ( $V_e$ ) e l'output di anidride carbonica ( $VCO_2$ ), descritta con una funzione esponenziale, è identica sia partendo dal riposo assoluto sia dal carico nullo (Whipp et al., 1982).

L'esponenziale che segue  $V_e$ ,  $VO_2$  e  $VCO_2$  in risposta ad un esercizio moderato è meglio descritta da un modello che incorpora la sola fase II della risposta stessa, quella che corrisponde ai cambiamenti che stanno avvenendo nel metabolismo dei muscoli impegnati nell'esercizio. Infatti, mentre il consumo di ossigeno nei suddetti muscoli è descritto, nel caso di lavoro a carico costante, da una funzione monoesponenziale senza *ritardo* o *time-delay* (TD), misurando a livello della bocca i diversi parametri respiratori e calcolando ad esempio il consumo di ossigeno si osserva appunto un ritardo dovuto al tempo che impiegano i gas a transitare dai muscoli all'aria alveolare dopo esservi stati trasportati dal torrente circolatorio.

Esistono quindi diversi modelli per valutare la risposta dell'organismo nei primi minuti di un lavoro a carico costante, tra i quali noi abbiamo preso in considerazione il *modello 1* e il *modello 3*:

- nel **modello 1**, la risposta monoesponenziale viene fatta coincidere con l'inizio del carico di lavoro, senza distinguere le due fasi (I e II) della cinetica;
- nel **modello 3**, la curva monoesponenziale parte dopo un certo ritardo, **time delay (TD)**, nel momento in cui si verificano le prime variazioni negli scambi gassosi dovute all'arrivo nei polmoni del sangue proveniente dai muscoli in esercizio. A questo punto, infatti, il contenuto in  $O_2$  del sangue nei capillari degli alveoli inizia a diminuire, da un valore prossimo ai 100 mmHg ad un valore che raggiungerà un equilibrio tanto inferiore più intenso è l'esercizio, causa un suo maggiore utilizzo nei muscoli. Viceversa, la  $CO_2$ , che presenta a riposo una pressione parziale nel sangue venoso di circa 40 mmHg, causa una maggiore produzione, comincia ad aumentare.

Prove sperimentali effettuate (Whipp et al., 1982) evidenziano come l'adozione del modello 1 per adattare i punti corrispondenti ai valori ottenuti durante la prova, disegnandovi una linea di tendenza, non dà risultati soddisfacenti, a differenza del modello 3, utilizzando il quale si ottiene una curva che si avvicina molto di più ai dati raccolti. A conferma della maggiore "bontà" del modello 3 per la descrizione della curva monoesponenziale della ventilazione ( $V_e$ ) e degli scambi gassosi, vi è anche la grande costanza dei valori dei parametri ottenuti nelle diverse situazioni (partenza da carico nullo o da riposo) nei test eseguiti al cicloergometro: in entrambi i casi, il valore di  $\tau$  ottenuti per  $VO_2$ ,  $VCO_2$  e  $V_e$  sono praticamente identici: una media di 29 s per  $\tau VO_2$  con partenza da riposo o da carico nullo,  $\tau VCO_2$  di 51 s in entrambi i casi,  $\tau V_e$  media di 55 e 54 s. Il modello 1, che prevede che la risposta monoesponenziale abbia inizio fin dall'inizio del carico (escludendo il *time delay*) evidenzia significative differenze nella cinetica della risposta tra i due tipi di esercizio. La media della costante di tempo  $\tau VO_2$  va dai 32 s per la partenza da riposo ai 42 per partenza da carico nullo,  $\tau CO_2$  da 49 a 64 s,  $\tau V_e$  da 48 a 66. Concludendo, quindi, possiamo affermare che il modello 3 è preferibile per una più accurata descrizione della curva monoesponenziale della  $V_e$  e degli scambi gassosi, mentre il modello 1 può avere una certa utilità nello studio dell'energetica dell'esercizio, ad esempio nel calcolo del deficit di  $O_2$  ( $O_{2def}$ ), contratto durante la fase iniziale di un esercizio a carico moderato. Esso è uguale al prodotto dell'incremento del consumo di ossigeno intercorso dalla partenza al terzo minuto (*steady state*) per la costante di tempo  $\tau VO_2$  (Whipp, 1971)

$$O_{2def} = \tau VO_2(ss) * \tau VO_2$$

In tal caso, la costante di tempo per il  $VO_2$  ottenuta dal modello 3 non può essere utilizzata per stimare il deficit di  $O_2$ , perché non considera i dati raccolti durante il *time delay*. Il modello 1 invece, descrivendo una curva che parte dall'istante in cui interviene il carico di lavoro, fornisce un valido aiuto nel calcolo del deficit di  $O_2$ .

### 6.11- Mean Response Time

Una semplice misura della velocità di aggiustamento di una variabile ( $VO_2$ , Fc, ecc.) è il *mean response time (MRT)*. Nelle funzioni monoesponenziali esso è dato dalla somma del *time delay* e della costante di tempo (**TD +  $\tau$** ) (Linnarson, 1974). Esso ci può dare una indicazione del tempo necessario al metabolismo ossidativo per attivarsi.

Per definizione, il deficit di  $O_2$  è uguale all'area tra il livello stazionario di  $VO_2$  (steady state) e la curva del  $VO_2$ -on nei primi 3 minuti dell'esercizio, purchè sia svolto a intensità tale da permettere il raggiungimento dello stato stazionario entro i tre minuti, quindi ad intensità <AT. Tale area può essere calcolata mediante il prodotto dell'ampiezza della curva per il mean response time (Whipp, 1971).

## **7 – GLI STRUMENTI PER LA REALIZZAZIONE DEI TEST**

### **7.1- Cicloergometro**

Il cicloergometro, se opportunamente adattato, è l'ergometro specifico per il ciclismo. Conformemente al sistema con cui viene realizzato il carico di lavoro esistono tre tipi di cicloergometri: a *resistenza fissa* (potenza dipendente dalla frequenza di pedalata o RPM); a *potenza fissa* (resistenza variabile al variare della RPM); a *resistenza e potenza variabili* (esponenzialmente con il variare della RPM). La scelta dell'ergometro da utilizzare dipende, oltre che dalla disponibilità, dal tipo di test che si deve effettuare. Gli ergometri a resistenza fissa sono validi quando si deve misurare la potenza meccanica espressa dal soggetto; quelli a potenza costante sono validi quando il carico è stabilito dal ricercatore e i parametri da misurare sono quelli metabolici. Nel secondo caso si può utilizzare anche un ergometro a resistenza fissa purché il soggetto mantenga una frequenza di pedalata costante. Gli ergometri a freno aerodinamico (resistenza e potenza variabili) sono teoricamente utilizzabili in entrambi i casi. Va sottolineato, infine, che il cicloergometro è lo strumento che presenta le minori variazioni interindividuali nel rendimento muscolare (5%).

### **7.2- Armoergometro**

L'esercizio all'armoergometro utilizzato nei test da noi svolti (Technogym Top-XT) si esegue dalla posizione seduta agendo su una coppia di braccia che ruotano intorno ad un perno con una resistenza regolabile.

E' accertato che le risposte fisiologiche dei test eseguiti con le braccia sono percentualmente inferiori a quelle dei test eseguiti con le gambe se riferiti a soggetti non allenati all'utilizzo delle masse muscolari superiori: questo perché l'efficienza meccanica dei gruppi muscolari messi in moto e la spesa calorica sono sicuramente inferiori.

### **7.3- Il cardiofrequenzimetro: il Polar Vantage NVTM**

Durante l'esecuzione dei test, ci siamo avvalsi dell'utilizzo del Polar Vantage NV (fig. 26), probabilmente il cardiofrequenzimetro in commercio più avanzato e sofisticato del mondo, poiché possiede caratteristiche e prestazioni che superano quelle di qualsiasi altro cardiofrequenzimetro. Soprattutto è in grado di registrare continuamente l'intervallo R-R, ovvero l'intervallo che intercorre tra due picchi R del tracciato elettrocardiografico. Inoltre ha la possibilità di memorizzare in un numero illimitato di files ogni registrazione. In modalità RR la memoria è limitata a 4000 cicli cardiaci mentre se si registra il battito ogni 60 secondi l'autonomia della memoria è di 134 ore. Abbinandolo all'interfaccia Polar Advantage ed al software Precision Performance è possibile trasferire i dati di una registrazione su un computer per una successiva dettagliata analisi dei medesimi.

Il cardiofrequenzimetro (fig. 6) è costituito da:

- una *fascia-trasmittitore*, che nel caso del Polar Vantage NV è in grado di codificare il segnale in maniera che il segnale di un altro trasmettitore vicino possa creare interferenze.
- un *ricevitore* da polso.

Il Polar Vantage NV ad ogni registrazione crea un file che viene archiviato nelle memoria del ricevitore. A registrazione conclusa, grazie all'interfaccia e al software di analisi in dotazione, è possibile scaricare su un computer con sistema operativo Windows la serie temporale.



**Fig. 6:** Il Polar Vantage NV™

#### **7.4- Metabolimetro Vmax29c (Sensormedics)**

Il metabolimetro è una tra le principali apparecchiature per la valutazione funzionale dell'atleta. Esso trova la sua più specifica indicazione nelle discipline con componente aerobica, permettendo di misurare la ventilazione polmonare, il consumo di ossigeno ( $VO_2$ ), la produzione di anidride carbonica ( $VCO_2$ ) e quindi tutti gli indici correlati a questi tre misure fondamentali, durante l'esecuzione di un test da sforzo in laboratorio o sul campo.

Il metabolimetro da noi utilizzato, il Vmax29c della Sensormedics, è basato su un flussimetro, che permette di misurare la quantità di aria inspirata ad ogni atto respiratorio e sugli analizzatori di  $O_2$  e  $CO_2$ , che calcolano la concentrazione dei due gas nell'aria espirata. Il soggetto, con maschera e boccaglio muniti di sistema valvolare in/espilatorio, inspira aria ambiente ed espira attraverso il flussimetro; un campione di tale aria espirata viene inviata agli analizzatori, il cui risultato appare subito sottoforma grafica nel monitor del computer grazie ad un programma elaborato dalla Sensormedics stessa. I dati, respiro per respiro, vengono inoltre memorizzati in un file cui si può successivamente accedere per ulteriori elaborazioni.

# PARTE SPERIMENTALE

## **8 - PROTOCOLLO SPERIMENTALE**

### **8.1- Soggetti**

Gli esperimenti sono stati condotti su 5 volontari maschi e due femmine di età compresa tra i 20 e i 37 anni. Tutti erano informati sulle modalità di svolgimento dell'esperimento e avevano accordato il loro consenso per iscritto. Il reclutamento dei soggetti è stato eseguito escludendo chi praticava regolarmente attività sportive con impegno superiore a cinque ore settimanali di allenamento.

### **8.2- Protocollo**

Ogni soggetto è stato sottoposto a due sessioni sperimentali più una sessione preliminare in cui venivano calcolate le soglie anaerobiche (AT) individuali al cicloergometro e all'ergometro a braccia. Le sessioni sperimentali consistevano in una serie di 8 esercizi della durata di 6 minuti ciascuno, 4 da compiersi all'ergometro a braccia e 4 al cicloergometro. Per ogni ergometro venivano eseguite 2 ripetizioni sottosoglia (80% AT) e 2 ripetizioni sopra soglia (110% AT).

I test sono stati eseguiti presso il laboratorio di Fisiologia dell'Esercizio del Corso di Laurea in Scienze Motorie dell'Università di Verona, in un locale spazioso, ben aerato ed illuminato, tra le 9:00 e le 17:00. I soggetti erano invitati a consumare una leggera colazione, caffè escluso, almeno 2 ore prima del test o un pranzo leggero almeno 3 ore prima dello stesso. Essi venivano preparati per la registrazione dei parametri respiratori e della frequenza cardiaca collegandoli alle varie apparecchiature, come di seguito descritto. Durante l'esecuzione delle prove, si evitava qualsiasi disturbo (rumori o altre forme di interferenza), i soggetti dovevano rimanere tranquilli ed evitare, per quanto possibile, sospiri e respiri irregolari. Durante i recuperi, i soggetti non svolgevano alcuna attività fisica e rimanevano seduti.

La temperatura del laboratorio era di 20-23°C ed era previsto un periodo iniziale di ambientamento in cui veniva verificata la stazionarietà dei parametri cardiorespiratori.

### **8.2.1- Test preliminari**

I 2 test preliminari sono serviti per determinare le soglie anaerobiche individuali sia al cicloergometro che all'ergometro a braccia. Ogni soggetto ha eseguito un test a carichi incrementali al cicloergometro (Bikerace Technogym) ed uno all'ergometro a braccia (Top-XT Technogym).

#### **Preparazione**

Dopo un iniziale periodo di ambientamento in cui ai soggetti venivano spiegate le modalità di esecuzione dei test, i soggetti si sedevano sull'apposito ergometro che veniva opportunamente regolato adattandolo all'altezza del soggetto. A questo punto si applicava la fascia-trasmittitore del cardiofrequenzimetro (Polar Vantage NV) ed il boccaglio collegato al metabolimetro (Sensormedics).

Dopo mezz'ora dall'accensione, il metabolimetro veniva calibrato sia per quanto riguarda il flusso d'aria, facendo passare nel flussometro una quantità di aria nota (3 Litri), sia per quanto riguarda l'analisi dei gas (O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>) grazie a due bombole a concentrazione nota (una al 12% di O<sub>2</sub> e 5% di CO<sub>2</sub>, l'altra al 26% di O<sub>2</sub> e 0% di CO<sub>2</sub>).

Passati 10 minuti dalla calibrazione si procedeva ad una verifica della calibrazione. Se l'errore di misura era maggiore del 3% si ripeteva la calibrazione. La verifica della calibrazione veniva fatta anche dopo ogni test e anche in questo caso se l'errore eccedeva il 3% si procedeva a ricalibrare lo strumento.

#### **Esecuzione**

Tutti i soggetti eseguivano prima il test con le braccia e poi quello con le gambe. Prima di ogni test venivano motivati a cercare di dare il massimo e durante i carichi più intensi venivano continuamente incitati dall'operatore a resistere alla fatica.

I due test sono stati separati l'uno dall'altro da almeno 30 minuti di riposo.

#### *Ergometro a braccia*

- esecuzione di un esercizio a carico incrementale con aumenti di carico di 10 Watt ogni 90 secondi fino ad esaurimento (carico iniziale 40 Watt).

#### *Cicloergometro*

- esecuzione di un esercizio a carico incrementale con aumenti di carico di 25 Watt ogni 90 secondi fino ad esaurimento (carico iniziale 50 Watt).

### **8.2.2- Test sperimentali**

A distanza di almeno un giorno dai test preliminari, sono stati eseguiti (in due giorni diversi) i test sperimentali, consistenti in 2 ripetizioni di ciascun esercizio ai due ergometri, per ciascuna delle due intensità di lavoro utilizzate.

#### **Preparazione**

La preparazione per l'esecuzione dei test sperimentali è stata la stessa utilizzata nei test preliminari.

#### **Esecuzione**

Sia al cicloergometro sia all'ergometro a braccia è stata seguita la seguente procedura:

- 1 minuto di riposo;
- 2 minuti a carico nullo;
- 6 minuti di lavoro al carico prestabilito;
- 5 minuti finali di recupero.

Nel momento esatto in cui avveniva un cambio di fase gli operatori fissavano un marker nelle registrazioni dei parametri respiratori (metabolometro) e cardiaci (cardiofrequenzimetro).

Per ogni carico di lavoro venivano effettuate due ripetizioni esattamente uguali.

Il riposo tra le ripetizioni era di almeno 10 minuti per l'esercizio all'80% e 15 minuti per l'esercizio al 110%. In ogni caso l'esercizio successivo non iniziava prima che i parametri misurati non fossero ritornati ai livelli di riposo.

Nel periodo di attesa tra le registrazioni i soggetti dovevano evitare di assumere cibo, caffè, bevande alcoliche e di effettuare sforzi.

La frequenza di pedalata durante i due minuti a carico nullo doveva poi essere mantenuta durante tutto il tempo di esecuzione dell'esercizio.

Tale frequenza poteva essere scelta dal soggetto esaminato, purché rientrasse tra le 60 e le 80 pedalate/minuto al cicloergometro e tra i 45 e i 60 giri/minuto all'ergometro a braccia.

**8.2.3- Schema seguito per la randomizzazione dei test sperimentali da parte dei soggetti esaminati.**

**1° GIORNO**

	1° soggetto	2° soggetto	3° soggetto	4° soggetto
1° esercizio	Cicloergometro 70% AT	Armoergometro 70% AT	Cicloergometro 110% AT	Armoergometro 110% AT
2° esercizio	Cicloergometro 70% AT	Armoergometro 70% AT	Cicloergometro 110% AT	Armoergometro 110% AT
3° esercizio	Cicloergometro 110% AT	Armoergometro 110% AT	Cicloergometro 70% AT	Armoergometro 70% AT
4° esercizio	Cicloergometro 110% AT	Armoergometro 110% AT	Cicloergometro 70% AT	Armoergometro 70% AT

**2° GIORNO**

	1° soggetto	2° soggetto	3° soggetto	4° soggetto
1° esercizio	Armoergometro 110% AT	Cicloergometro 110% AT	Armoergometro 70% AT	Cicloergometro 110% AT
2° esercizio	Armoergometro 110% AT	Cicloergometro 110% AT	Armoergometro 70% AT	Cicloergometro 110% AT
3° esercizio	Armoergometro 70% AT	Cicloergometro 70% AT	Armoergometro 110% AT	Cicloergometro 70% AT
4° esercizio	Armoergometro 70% AT	Cicloergometro 70% AT	Armoergometro 110% AT	Cicloergometro 70% AT

## 9 – METODI

### 9.1- Strumenti di acquisizione

**Cardiofrequenzimetro** per la registrazione della frequenza cardiaca (Fc) attraverso un **Polar Vantage NV™** in modalità RR.

**Metabolimetro Vmax29c (Sensormedics)** per la determinazione, respiro per respiro, dei seguenti parametri:

#### Parametri misurati

- concentrazione di ossigeno ed anidride carbonica nell'aria espirata ( $FE_{O_2}$  e  $FE_{CO_2}$ );
- concentrazione di ossigeno ed anidride carbonica nell'aria inspirata ( $FI_{O_2}$  e  $FI_{CO_2}$ );
- volume corrente (VT): volume di gas inspirato durante ciascun atto respiratorio (ml o l)
- pressione parziale della  $CO_2$  espirata ( $P_{et}CO_2$ );
- pressione parziale della  $O_2$  espirata ( $P_{et}O_2$ );

#### Parametri calcolati

- quoziente respiratorio (QR) ( $V_{CO_2}/V_{O_2}$ );
- consumo di ossigeno ( $V_{O_2}$ ) globale e normalizzato per kg di peso corporeo ( $V_{O_2}/Kg$ );
- ventilazione espiratoria ( $V_e$ ): prodotto di VT per la frequenza respiratoria, espressa in l/min.

### 9.2- Registrazione dei parametri cardiorespiratori

La registrazione dei parametri cardiorespiratori e quindi il test aveva inizio solo quando veniva verificato che i valori del QR erano inferiori a 0.9, dato che, come abbiamo visto, il QR a riposo è normalmente intorno al valore di 0.83. Terminato il test con i 5 minuti di

pedalata a carico nullo, terminavano contemporaneamente le registrazioni dei parametri cardiorespiratori.

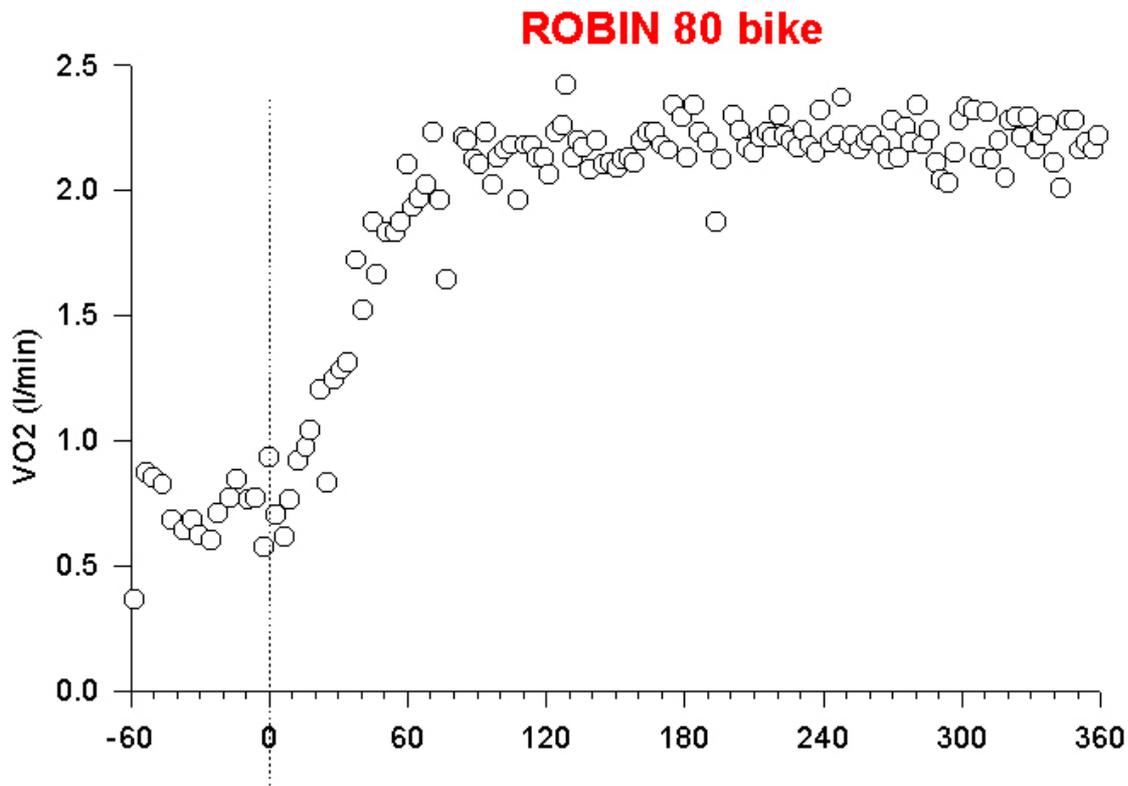
La successiva ripetizione dell'esercizio avveniva, come da protocollo, solo quando i parametri previsti erano ritornati ai valori iniziali di riposo.

I dati acquisiti respiro per respiro dal *Sensormedics Vmax29* venivano registrati direttamente su un computer. L'apposito software (*Vmax 4.0*) consentiva di visualizzare graficamente alcuni parametri respiratori, potendo scegliere tra una vasta combinazione di più parametri acquisiti direttamente (VT, PetO<sub>2</sub>, PetCO<sub>2</sub>) e calcolati (VO<sub>2</sub>, VCO<sub>2</sub>, Ve ecc.), oltre a riportarne il valore respiro per respiro in alcune finestre.

Contemporaneamente, il cardiofrequenzimetro provvedeva a registrare la Fc in modalità R-R (battito per battito), memorizzando un file che successivamente veniva scaricato nel disco fisso del computer, grazie al software in dotazione con il cardiofrequenzimetro.

### 9.3- Elaborazione dei dati

I dati acquisiti dal *Sensormedics Vmax29* venivano esportati creando un file di testo. Con l'utilizzo di *Exce (Microsoft inc.)*, e di *Sigma Plot (Jandel Scientific inc.)*, si è provveduto dapprima a interpolare linearmente a un secondo i dati; venivano cioè calcolati i valori dei parametri in quei secondi nei quali non era stata fatta alcuna registrazione.



**Fig. 7:**  $VO_2$  durante un esercizio al cicloergometro. Nelle ascisse è indicato il tempo (s). Sono stati utilizzati i dati ottenuti dall'analisi respiro per respiro (dati grezzi).

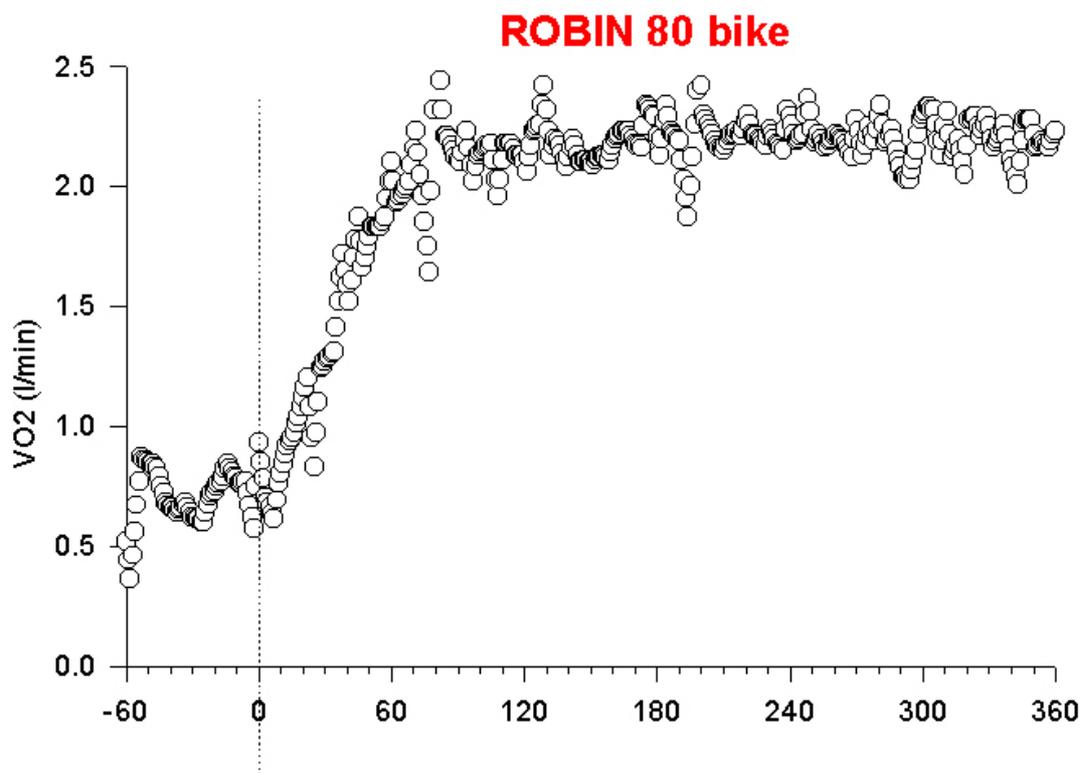


Fig. 8: Lo stesso esercizio della fig.7 dopo interpolazione lineare ad un secondo.

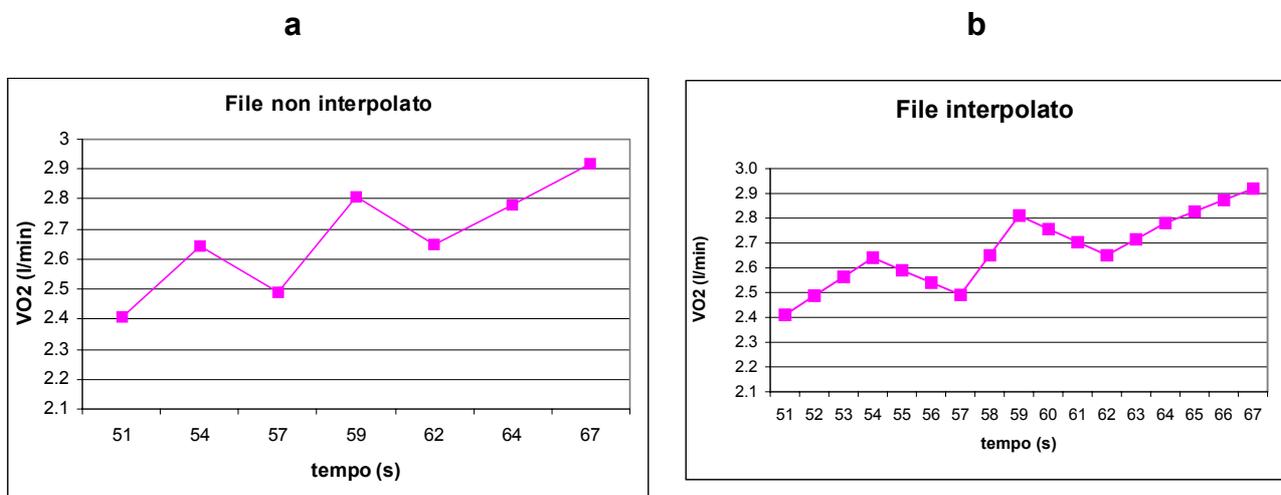


Fig. 9: VO<sub>2</sub> durante l'esercizio in un arco di tempo di 16 secondi, prima (a) e dopo (b) l'interpolazione lineare.

In fig. 9 è stato isolato un arco di tempo molto inferiore, di soli 16 secondi (dal secondo 51 al secondo 67) per potere meglio apprezzare l'effetto dell'interpolazione: nel primo caso (figura a sinistra), i dati a disposizione per costruire il grafico sono solamente 7, tanti quanti sono stati gli atti respiratori in quell'arco di tempo e sono quelli evidenziati dai quadrati disegnati sulla linea viola. Dopo l'interpolazione (figura a destra), abbiamo a

disposizione molti più dati, uno per ogni secondo, ma la linea che congiunge i dati è identica a quella prima dell'interpolazione.

Successivamente abbiamo mediato i dati unendo i due files (fig. 10 e 11) ottenuti dalle due ripetizioni eseguite dai soggetti per ciascun esercizio. Tali files, opportunamente sovrapposti in modo che l'inizio del lavoro (momento 0) coincidesse perfettamente, davano origine ad un unico file di dati che aveva il vantaggio di avere una minore dispersione (fig. 12), come suggerito da Whipp (Whipp et al., 1982). La dispersione dei dati è evidente nei soggetti non abituati al laboratorio e a lavorare collegati al metabolimetro con un boccaglio, in quanto questo influenza la loro respirazione rendendola irregolare. In particolare, in esercizi eseguiti con piccoli gruppi muscolari, quali quelli degli arti superiori, l'ampia dispersione dei dati si combina alla scarsa ampiezza della variazione del  $VO_2$ , rendendo ancora più necessaria la mediazione di più esercizi uguali.

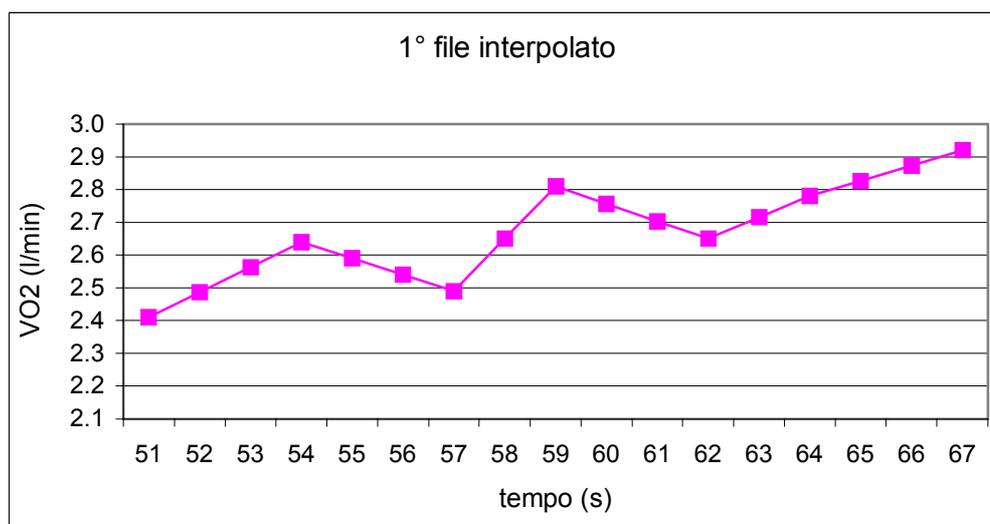


Fig. 10: 1° file interpolato

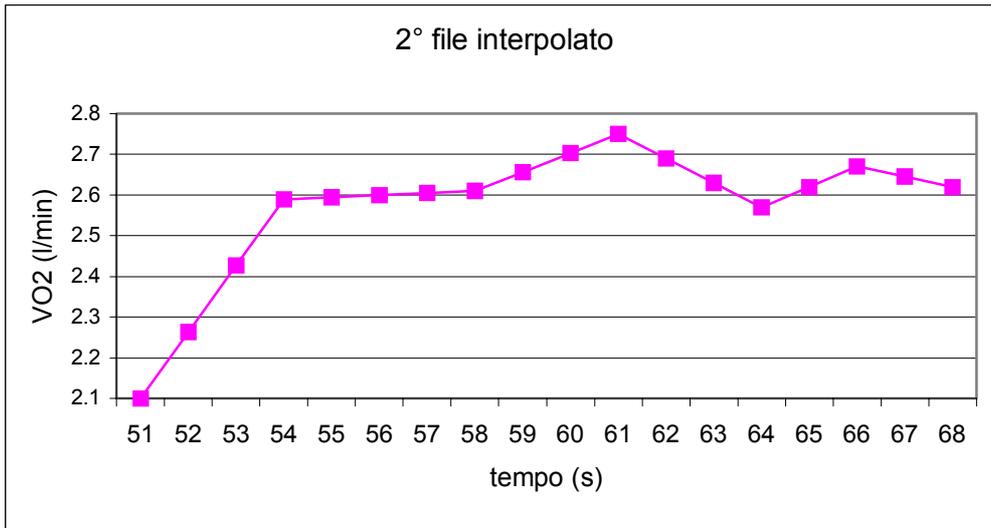


Fig. 11: 2° file interpolato

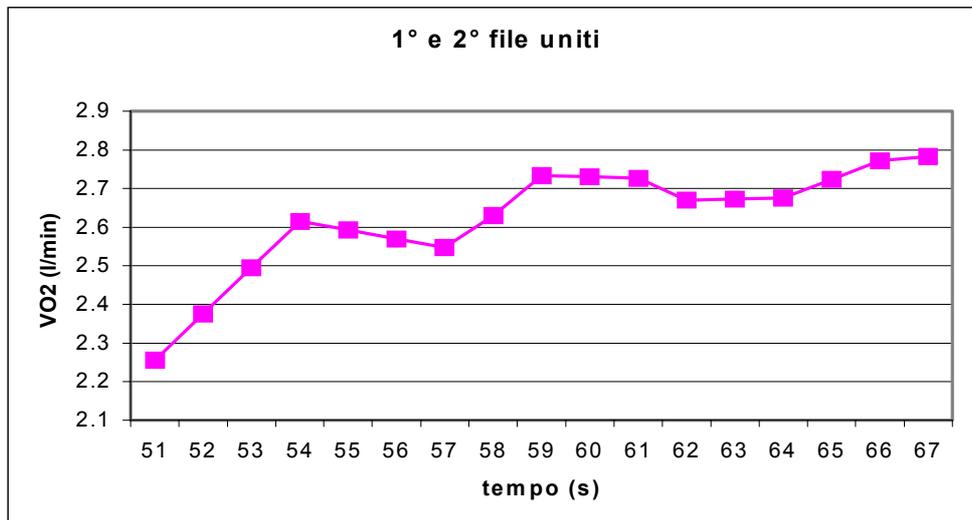


Fig. 12: I due files precedenti sono stati uniti, dando origine ad un file caratterizzato da una minore dispersione dei dati.

Per ridurre ulteriormente la dispersione, i valori venivano mediati a 5 secondi, rendendo più omogenea la successione (fig. 13).

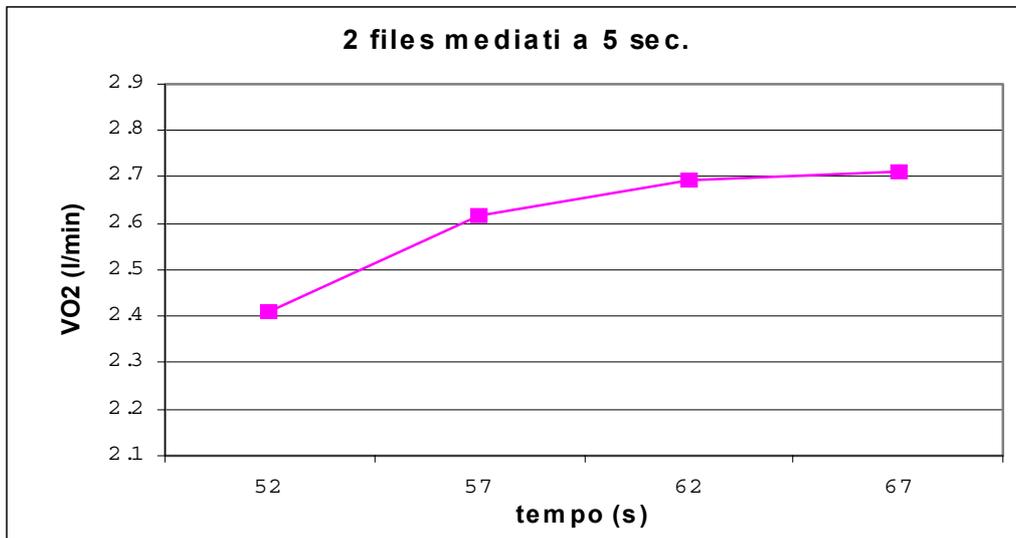


Fig. 13: Il file di fig. 12 mediato a 5 secondi.

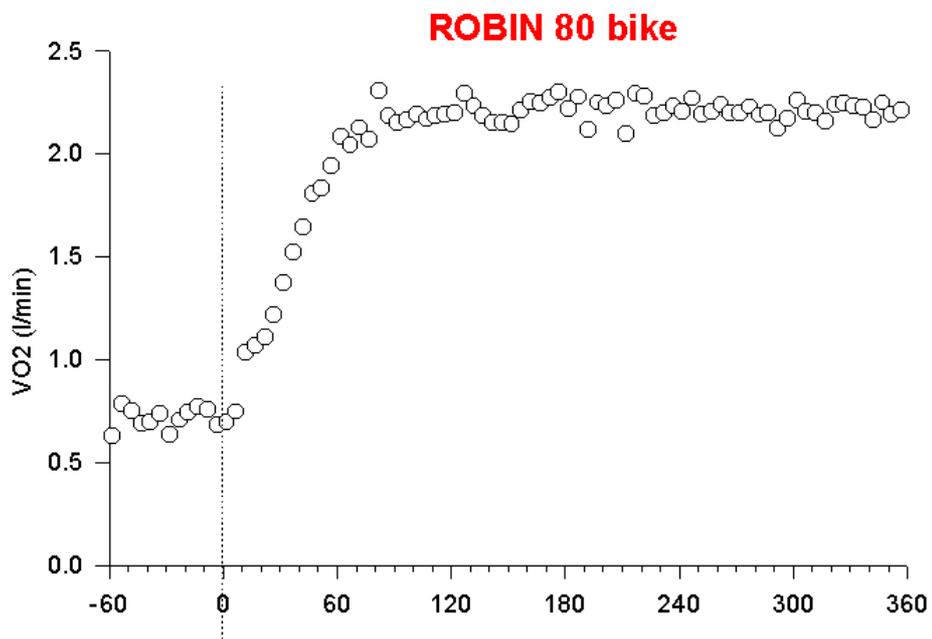
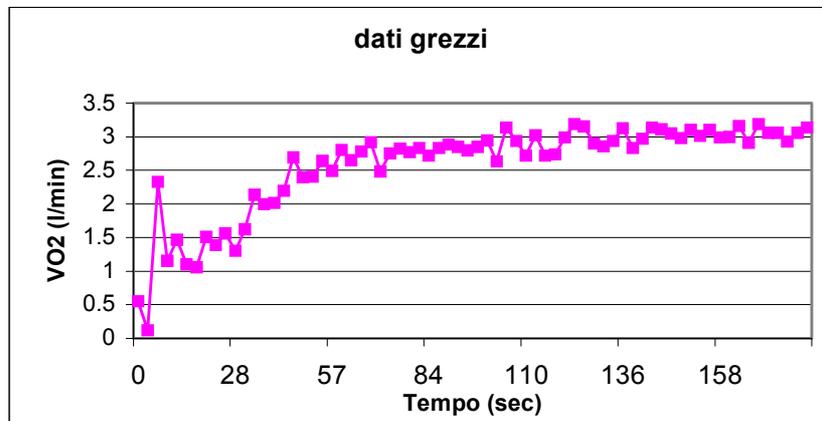
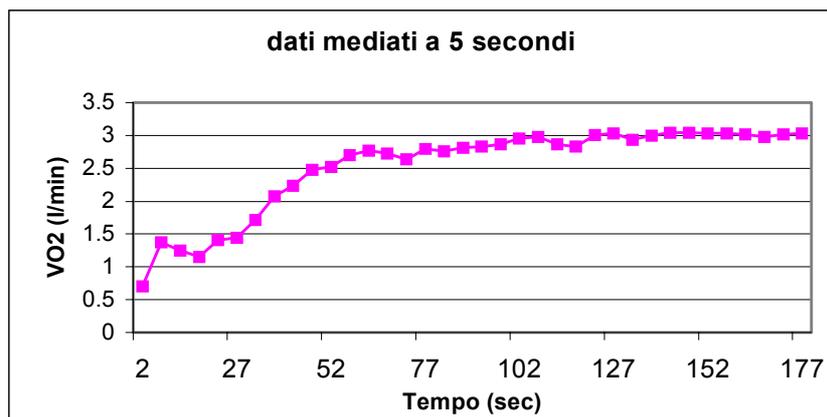


Fig. 14: L'esercizio di fig. 8 dopo essere stato unito con il file della seconda ripetizione mediato a 5 secondi.

A titolo di esempio, viene anche riportato un grafico (fig. 15) realizzato con i dati raccolti da un solo file senza alcuna elaborazione (A) confrontato con lo stesso file dopo averlo mediato a 5 secondi (B).



**A**



**B**

**Fig. 15:** A: grafico disegnato partendo da dati grezzi; B: i dati sono stati mediati a 5 secondi, senza ulteriori elaborazioni.

La curva, diminuendo la dispersione dei dati, diventa più omogenea.

Ai dati ottenuti veniva quindi applicata la seguente funzione monoesponenziale:

$$VO_{2t} = (VO_2 \text{ basale} + A) * (1 - e^{-(t-TD)/\tau})$$

Dove:

$VO_{2t}$  =  $VO_2$  al tempo  $t$ ;

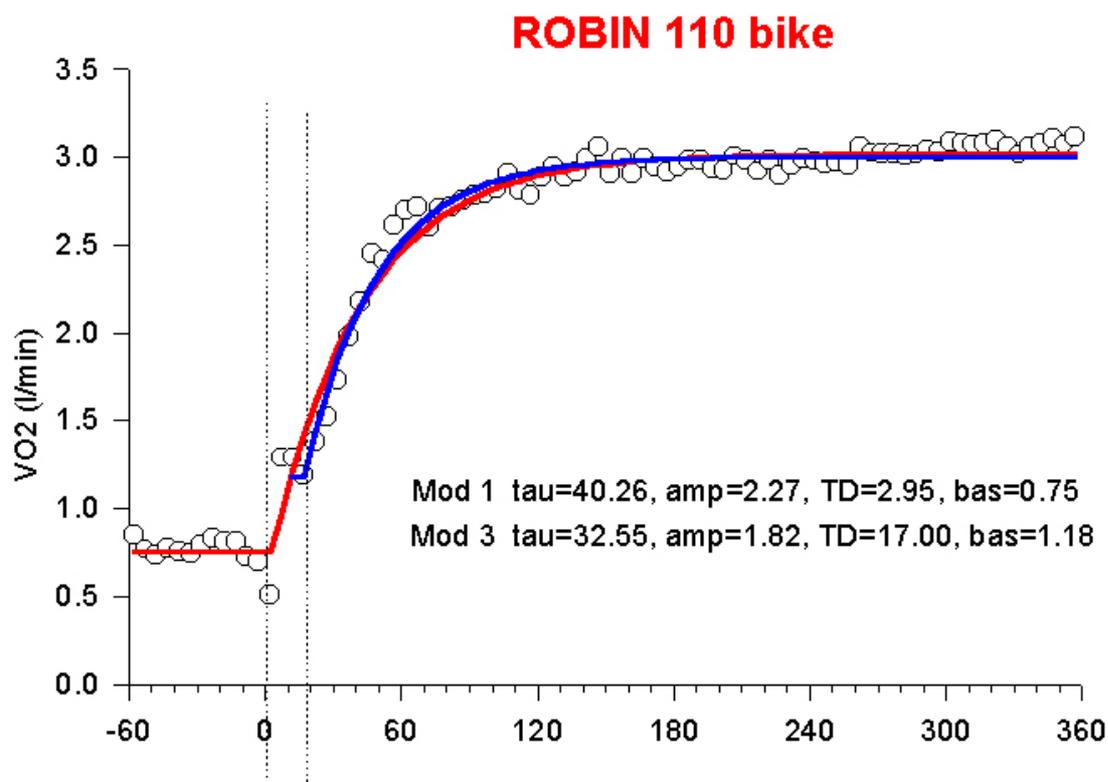
$VO_2$  basale =  $VO_2$  all'inizio del test;

$A$  = ampiezza della curva, cioè differenza tra il  $VO_2$  allo stato stazionario e  $VO_2$  basale;

$TD$  = time delay o ritardo, che identifica il momento in cui comincia la curva esponenziale;

$\tau$  = costante di tempo; identifica il tempo necessario perché il  $VO_2$  raggiunga il 63% del  $VO_{2ss}$  ( $VO_2$  di stato stazionario).

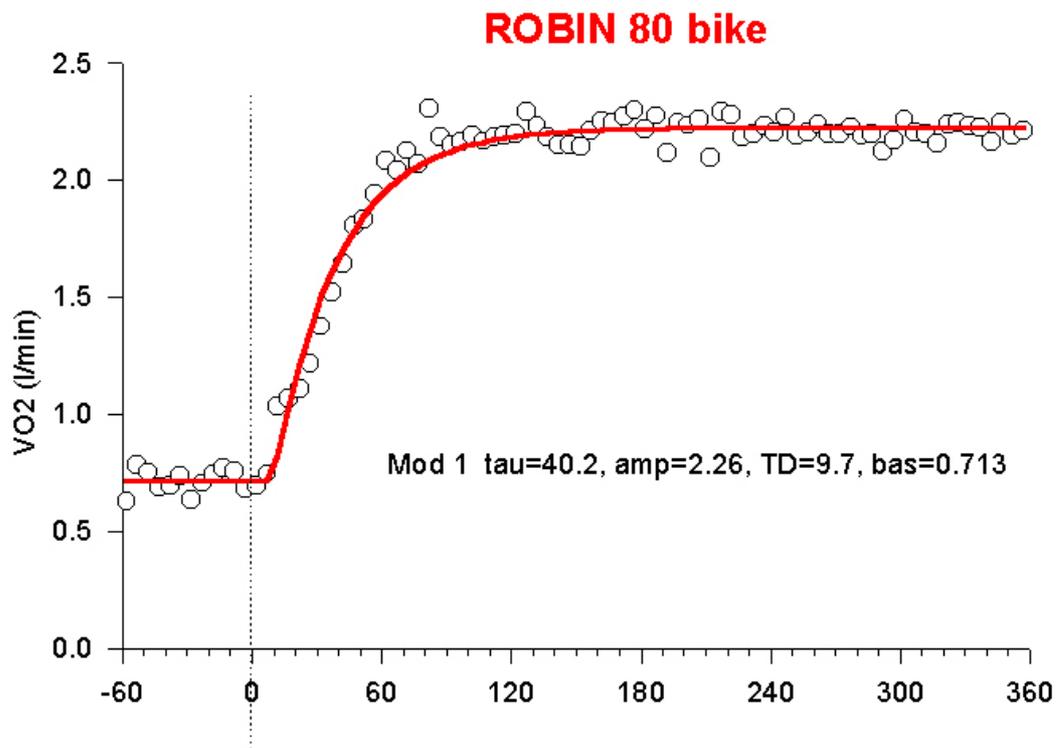
Il software quindi calcolava i valori di Tau, ampiezza, time delay (TD) e  $VO_2$  basale nell'algoritmo che maggiormente si avvicinava ai dati raccolti, in base anche alle limitazioni da noi imposte, prima fra tutte l'assegnazione di un TD da cui far partire l'esponenziale in base all'osservazione di altri parametri (QR, PetO<sub>2</sub>, PetCO<sub>2</sub>). Nella descrizione della fase *-on* della cinetica del  $VO_2$  abbiamo infatti utilizzato i due modelli di riferimento già descritti nel cap. 6.10: il *modello 1* e il *modello 3* (Whipp et al., 1982).



**Fig. 16:** Applicazione dei modelli 1 e 3 per il calcolo dei diversi parametri della funzione monoesponenziale  $\text{VO}_2 t = (\text{VO}_2 \text{ basale} + A) * (1 - e^{-(t-\text{TD})/\tau})$  (vedi testo).

Dai valori delle variabili ricavate, venivano quindi disegnate le curve riportate in figura 16, curve che si sovrapponevano fedelmente ai dati in nostro possesso testimoniando la validità dei modelli utilizzati. In particolare, come già osservato in precedenza (cap 6.10), si può vedere come il *modello 3* ricalchi in maniera migliore i dati in nostro possesso.

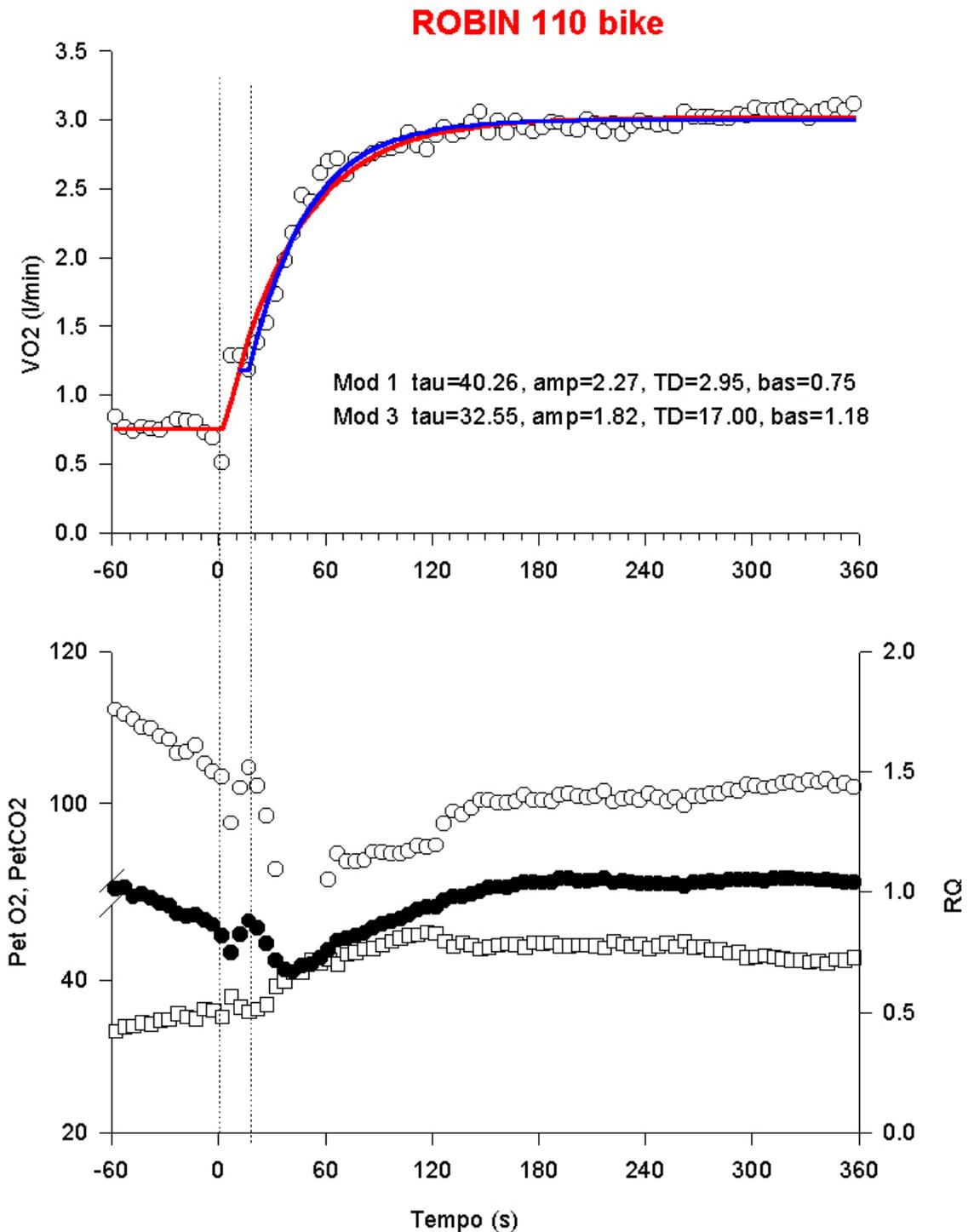
La differenza tra i due modelli consiste appunto nel ritardo (TD) imposto al computer per la partenza dell'esponenziale; nel *modello 1* (fig. 17) la condizione imposta è  $\text{TD} > 0$ : in tal modo il programma individua dove, dal momento 0 (inizio del carico di lavoro), il  $\text{VO}_2$  comincia a crescere. In quel punto inizia ad adattare ai dati i tre parametri della funzione esponenziale precedentemente descritta ricavando l'equazione della curva che meglio descrive i dati in nostro possesso.



**Fig. 17:** Applicazione ai dati dell'equazione secondo il *modello 1*. La condizione imposta è  $TD > 0$ : in questo caso il computer ha calcolato un ritardo di 9.7 secondi, un'ampiezza di 2.26 e una costante di tempo ( $\tau$ ) di 40.2 sec..

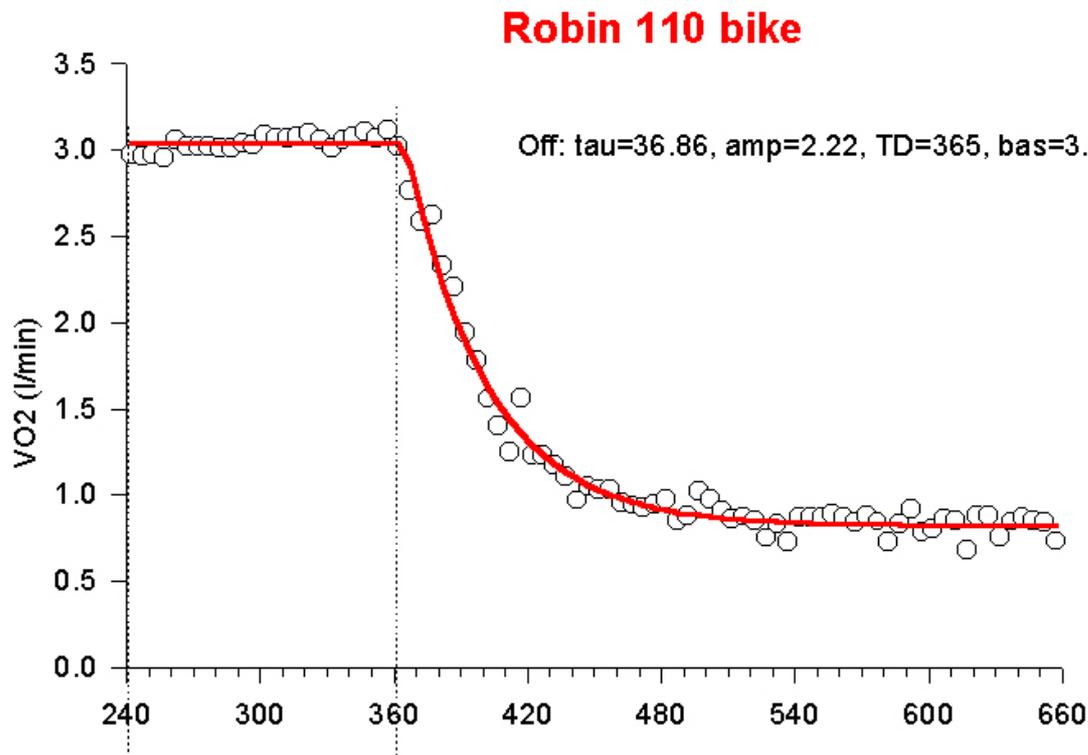
Nel *modello 3* (fig. 18) la curva parte dopo un TD imposto dall'operatore in base all'osservazione dei seguenti parametri:

- termine della *fase I* del  $\text{VO}_2$  e inizio della *fase II*: come già visto in precedenza (cap.6), la cinetica del  $\text{VO}_2$  nelle fasi iniziali del carico di lavoro ha un andamento caratteristico descrivendo un piccolo aumento immediato che poi tende a esaurirsi in pochi secondi (*fase I* appunto) cui segue un aumento più marcato, il cui inizio viene considerato il TD da utilizzare nell'algoritmo, che corrisponde al momento in cui si verificano le prime variazioni negli scambi gassosi dovute all'arrivo nei polmoni del sangue proveniente dai muscoli in esercizio.
- $\text{PetO}_2$ : a volte, causa la dispersione dei dati, non è facile individuare il TD dalla sola osservazione della cinetica del  $\text{VO}_2$ ; in tal caso, ma anche per confermare la valutazione fatta su tale curva, risulta molto utile osservare la cinetica di  $\text{PetO}_2$  e  $\text{PetCO}_2$ .  $\text{PetO}_2$  infatti inizia improvvisamente a diminuire nel momento in cui affluisce ai polmoni il sangue proveniente dai muscoli in attività: il tempo che è trascorso dall'inizio dell'esercizio a questo istante viene imposto dall'operatore come TD.
- $\text{PetCO}_2$ : ha un andamento opposto rispetto a  $\text{PetO}_2$ : il valore inizia a crescere al termine del TD.
- QR: all'inizio della *fase II* il quoziente respiratorio inizia a diminuire rapidamente, per poi risalire ad un ritmo più lento verso valori che dipendono dall'intensità di lavoro.



**Fig. 18:** applicazione del *modello 3*: il termine della *fase I* viene determinato anche dall'osservazione delle variazioni nelle cinetiche di  $\text{PetO}_2$  (pallini bianchi),  $\text{PetCO}_2$  (quadrati bianchi), QR (pallini neri).

Anche la fase *-off* della cinetica del  $\text{VO}_2$ , come già visto (cap. 6.4) ha un andamento monoesponenziale, quindi per il suo studio è stato utilizzato lo stesso procedimento visto in precedenza, semplificato dall'assenza di due fasi distinte (fig. 19).



**Fig. 19:** Cinetica del consumo di ossigeno nella fase di recupero ( $VO_{2\text{-off}}$ )

Nell'analisi dei dati durante i 6 minuti di esercizio si è provveduto a mediare i valori ottenuti dal minuto 2,5 al minuto 3 (i 30 secondi centrali) e quelli ottenuti dal minuto 5,5 al minuto 6 (30 secondi conclusivi). Basandosi su quanto affermato da Cerretelli (Cerretelli, 1973), abbiamo così potuto quantificare, dove vi fosse stata, la componente lenta nel consumo di ossigeno: infatti, se la differenza tra questi due valori tendeva a zero, non vi era componente lenta (caso di un esercizio condotto sotto la AT); diversamente, se il valore medio di  $VO_2$  nei 30 secondi conclusivi eccedeva quello dei 30 secondi centrali significava che il  $VO_2$  non aveva ancora raggiunto lo stato stazionario, quindi l'esercizio era certamente condotto ad una intensità superiore alla AT. La componente lenta veniva appunto quantificata dalla differenza tra la  $VO_2$  al 6° minuto e la  $VO_2$  al 3° minuto (Gerbino et al., 1996).

Per semplicità, nell'esposizione dei risultati, i 30 secondi centrali e i 30 secondi conclusivi sono stati chiamati rispettivamente "3min" e "6min".

Per l'elaborazione dei dati raccolti dal cardiofrequenzimetro è stato utilizzato *Excel*, provvedendo a trasformare i dati raccolti (durata dell'intervallo R-R) in frequenza cardiaca ad ogni battito.

## 10 – RISULTATI

La tabella 4 illustra i valori di età, peso, altezza, consumo di ossigeno complessivo ( $VO_2$ ) e normalizzato per kg di peso corporeo ( $VO_2/kg$ ), ventilazione ( $V_e$ ) e quoziente respiratorio (QR) a riposo, con relativa media e deviazione standard, dei 7 soggetti che hanno partecipato ai test.

**Tabella 4:** età, peso, altezza, consumo di ossigeno a riposo complessivo ( $VO_2$ ) e normalizzato per kg di peso corporeo ( $VO_2/kg$ ), ventilazione ( $V_e$ ) e quoziente respiratorio (QR) a riposo dei soggetti esaminati.

<b>Soggetto</b>	<b>Età</b>	<b>Peso</b>	<b>Altezza</b>	<b>VO2</b>	<b>VO2/kg</b>	<b>Ve</b>	<b>QR</b>
	anni	kg	cm	l/min	ml/min/ Kg	l/min	
<b>Federico</b>	24	72	180	0.35	4.86	11.77	0.88
<b>Filippo</b>	37	87	180	0.42	4.83	15.02	0.89
<b>Giorgia</b>	22	45	163	0.20	4.44	9.41	0.93
<b>Mario</b>	34	84	191	0.43	5.12	11.70	0.79
<b>Nadia</b>	23	52	163	0.23	4.42	8.55	0.86
<b>Paolo</b>	30	78	180	0.35	4.49	11.41	0.87
<b>Robin</b>	29	85	179	0.31	3.65	10.52	0.91
<b>Media</b>	28.4	71.9	177	0.33	4.54	11.20	0.88
<b>DEV.st.</b>	5.7	16.8	10.1	0.09	0.47	2.08	0.04

Il consumo di ossigeno medio a riposo è di 0.33 l/min, con una ventilazione di 11.2 l/min, anche se le variazioni individuali sono notevoli. Per avere dati più omogenei bisogna normalizzarli per kg di peso corporeo; una volta normalizzati, i dati del consumo di ossigeno sono simili, con una media di 4.54 ml/min/kg ed una deviazione standard (SD) di 0.47.

La tabella 5 indica i valori di soglia anaerobica calcolati e il carico di lavoro mantenuto dai soggetti durante i 6 minuti di esercizio con carico.

**Tabella 5:** valori individuali, medi e relative deviazioni standard (DEV.st.) dei valori di soglia anaerobica calcolati al cicloergometro (AT bike) e all'ergometro a braccia (AT top) e dei carichi di lavoro mantenuti durante i test eseguiti all'80 ed al 110% della soglia stessa sia al cicloergometro (rispettivamente B80 e B110) e all'ergometro a braccia (rispettivamente T80 e T110).

<b>Soggetto</b>	<b>AT bike</b>	<b>B80</b>	<b>B110</b>	<b>AT top</b>	<b>T80</b>	<b>T110</b>
	Watt	Watt	Watt	Watt	Watt	Watt
<b>Federico</b>	205	180	225	100	80	110
<b>Filippo</b>	200	160	220	94	72	104
<b>Giorgia</b>	100	80	110	55	44	60
<b>Mario</b>	175	140	190	95	72	108
<b>Nadia</b>	105	84	115	55	48	60
<b>Paolo</b>	100	80	190	95	76	104
<b>Robin</b>	200	160	220	74	60	80
<b>Media</b>	155	121	181	81	65	89
<b>DEV.st.</b>	51	43.6	49.2	20	14.1	22.4

### 10.1- Consumo di ossigeno

La tabella 6 riporta i valori del consumo di ossigeno ( $VO_2$ ) negli ultimi 30 secondi di esercizio ( $VO_2$  6min) e dal minuto 2,5 al minuto 3 ( $VO_2$  3min) e il calcolo della componente lenta.

**Tabella 6:** consumo di ossigeno individuale con relative medie e deviazioni standard durante gli ultimi 30 secondi (VO<sub>2</sub> 6 min) e alla fine del 3 minuto di esercizio (VO<sub>2</sub> 3min). In rosso i valori della componente lenta calcolata (6min – 3min).

	BIKE				TOP				COMPONENTE LENTA			
	B80		B110		T80		T110		B80	B110	T80	T110
	3min	6min	3min	6min	3min	6min	3min	6min				
<b>Federico</b>	2.60	2.76	3.13	3.47	1.47	1.55	2.28	2.04	0.16	0.34	0.08	0.24
<b>Filippo</b>			3.19	3.45	1.42	1.41	2.16	1.96		0.26	-0.01	0.20
<b>Giorgia</b>	1.00	1.01	1.42	1.52	0.55	0.58	0.91	0.89	0.01	0.10	0.03	0.02
<b>Mario</b>	1.98	1.94	2.65	2.71	1.40	1.48	2.56	2.14	0.04	0.06	0.08	0.42
<b>Nadia</b>	1.24	1.29	1.55	1.64	0.77	0.79	1.08	0.98	0.05	0.09	0.02	0.10
<b>Paolo</b>	1.31	1.30	2.67	3.04	1.27	1.40	1.99	1.84	-0.01	0.37	0.13	0.15
<b>Robin</b>	2.23	2.22	2.94	3.07	1.06	1.07	1.41	1.31	-0.01	0.13	0.01	0.10
<b>Media</b>	1.73	1.75	2.51	2.70	1.13	1.18	1.77	1.59	0.02	0.19	0.05	0.18
<b>DEV.st.</b>	0.63	0.63	0.73	0.81	0.36	0.38	0.64	0.52	0.07	0.13	0.05	0.13

Possiamo notare grosse differenze tra soggetto e soggetto. Mediamente, come ci si poteva attendere, il consumo di ossigeno appare significativamente maggiore nei due esercizi a intensità maggiore (2.70 e 1.77 l/min rispettivamente per B110 e T110) rispetto ai corrispondenti esercizi a intensità minore (1.75 e 1.18 l/min rispettivamente per B80 e T80). Lo stesso dicasi per il confronto tra l'esercizio svolto alla stessa intensità ma con ergometri diversi: B80 e B110 sono sempre maggiori dei corrispondenti T80 e T110.

## 10.2- Componente lenta del $VO_2$

Confermando quanto riportato nella letteratura (Cerretelli, 1973), i test da noi eseguiti hanno potuto confermare che il consumo di ossigeno ( $VO_2$ ) si stabilizza entro i primi tre minuti di esercizio se lo stesso ha una intensità inferiore alla AT, mentre continua ad aumentare fino alla fine dello stesso quando l'intensità supera la AT.

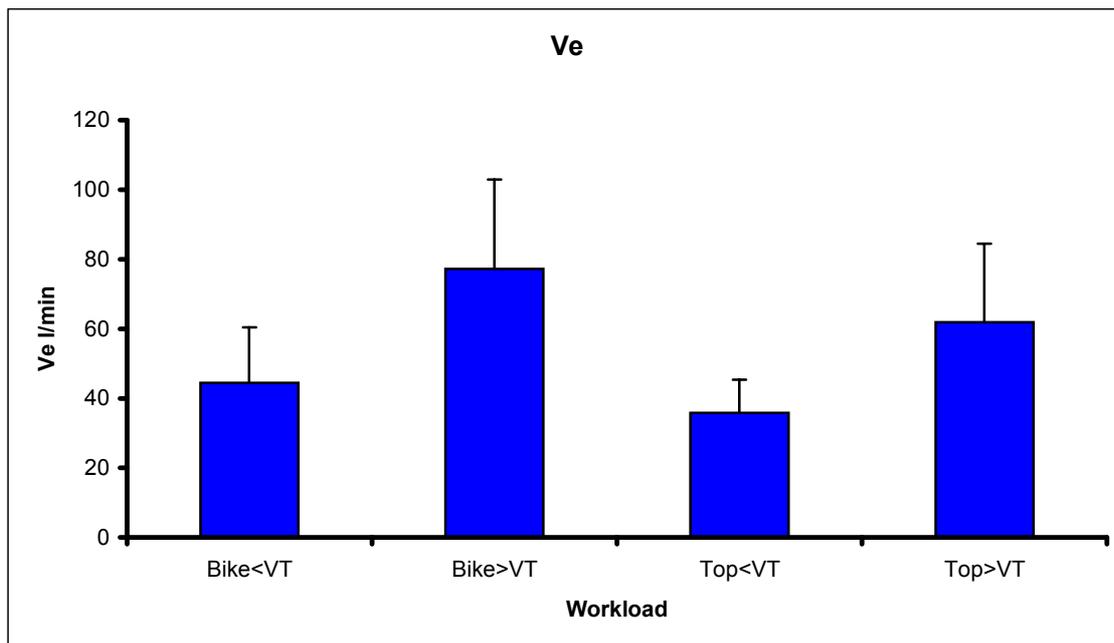
Nella prova al cicloergometro sopra la AT, tutti i soggetti hanno manifestato un aumento del  $VO_2$  (mediamente 0.19 l/min), anche se con una grande variabilità (da 0.06 a 0.37 l/min), ancora più accentuata nella prova all'ergometro a braccia, in cui la media è molto simile alla corrispondente prova al cicloergometro (0.18 l/min) ma si riscontrano grosse differenze tra i valori individuali, che vanno da un minimo incremento di 0.03 l/min ad un massimo di 0.42. Quest'ultimo dato così elevato è giustificato poiché ad una verifica dei carichi imposti abbiamo riscontrato che il soggetto aveva lavorato ad una intensità del 120% anziché del 110%. Escludendo quest'ultimo dato, notiamo che l'incremento medio del  $VO_2$  scende a 0.13 l/min contro 0.19 della prova sopra soglia al cicloergometro.

**Tabella 7:** Valori individuali, medi e relative deviazioni standard (Dev.St.) di: carico di lavoro (W), frequenza cardiaca (Fc), consumo di ossigeno (VO<sub>2</sub>) e ventilazione (Ve) divisi nei 4 diversi esercizi: cicloergometro sotto (B80) e sopra (B110) la AT e ergometro a braccia sotto (T80) e sopra (T110) la AT.

	<b>B80</b>				<b>B110</b>				<b>T80</b>				<b>T110</b>			
	<b>W</b>	<b>Fc</b>	<b>VO<sub>2</sub></b>	<b>Ve</b>	<b>W</b>	<b>Fc</b>	<b>VO<sub>2</sub></b>	<b>Ve</b>	<b>W</b>	<b>Fc</b>	<b>VO<sub>2</sub></b>	<b>Ve</b>	<b>W</b>	<b>Fc</b>	<b>VO<sub>2</sub></b>	<b>Ve</b>
	Watt	b/min	l/min	l/min	Watt	b/min	l/min	l/min	Watt	b/min	l/min	l/min	Watt	b/min	l/min	l/min
<b>Federico</b>	180	161	2.76	71.6	225	177	3.47	99.2	80	129	1.55	45.7	110	167	2.28	74.2
<b>Filippo</b>					220	142	3.45	95.7	72	82.4	1.41	39.8	104	110	2.16	67.4
<b>Giorgia</b>	80	112	1.01	31.6	110	147	1.52	48.2	44	93.1	0.58	22.8	60	119	0.91	34.8
<b>Mario</b>	140	129	1.94	42.7	190	155	2.71	55.3	72	161	1.48	41.4	108	183	2.56	93.2
<b>Nadia</b>	84	170	1.29	35.0	115	180	1.64	48.7	48	142	0.79	22.9	60	173	1.08	41.1
<b>Paolo</b>	80	112	1.30	31.6	190	181	3.04	109	76	119	1.40	44.3	104	162	1.99	80.1
<b>Robin</b>	160	112	2.22	54.7	220	141	3.07	84.4	60	83.5	1.07	33.5	80	97	1.41	42.8
<b>Media</b>	121	133	1.75	44.5	181	160	2.70	77.2	65	116	1.18	35.8	89.4	134	1.77	61.9
<b>Dev. St.</b>	44.9	26.5	0.63	15.9	49.2	18.2	0.81	25.8	14.1	30.5	0.38	9.65	22.4	34	0.64	22.4



### 10.3- Ventilazione

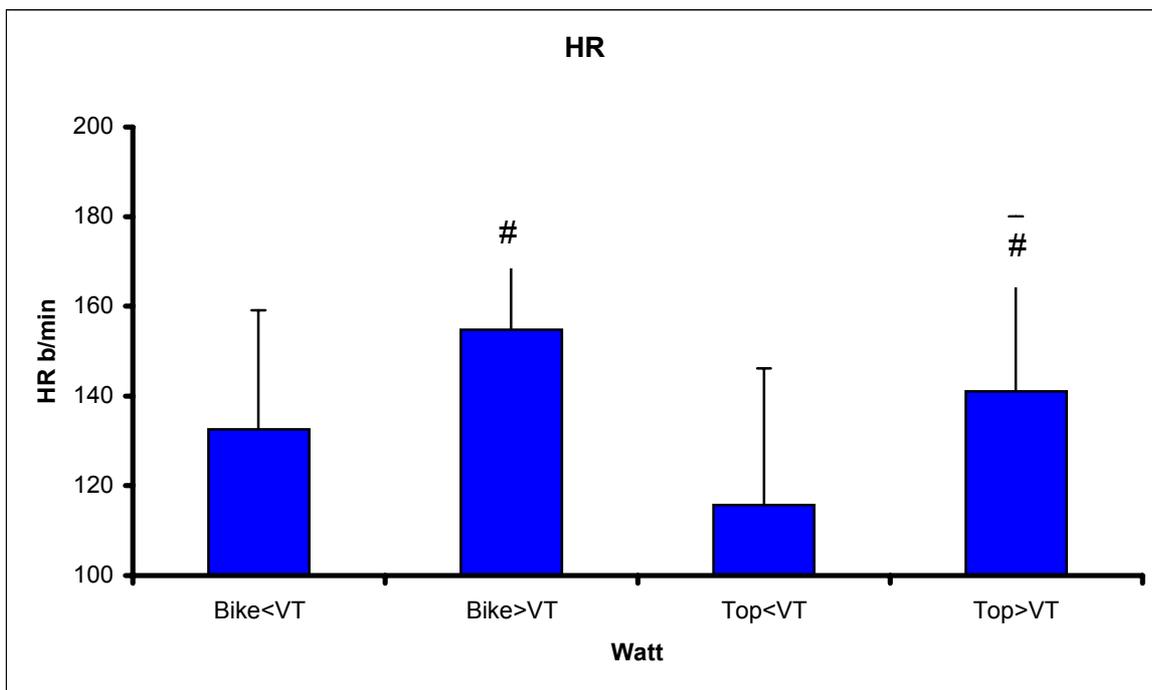


**Fig. 20:** Valori medi di Ve e relative deviazioni standard durante il lavoro nei 4 diversi esercizi svolti. Bike < VT e Bike > VT indicano rispettivamente i due esercizi al cicloergometro sotto e sopra AT, Top < VT e Top > VT indicano invece i corrispondenti esercizi all'ergometro a braccia.

La ventilazione aumenta con l'aumento dell'intensità di lavoro (fig. 37), passando da una media di  $44.5 \pm 15.9$  e  $35.8 \pm 9.6$  l/min rispettivamente nel lavoro al cicloergometro e all'ergometro a braccia all'80% a  $77.2 \pm 25.8$  e  $61.9 \pm 22.4$  l/min nel lavoro al 110%.

## 10.4- Frequenza cardiaca

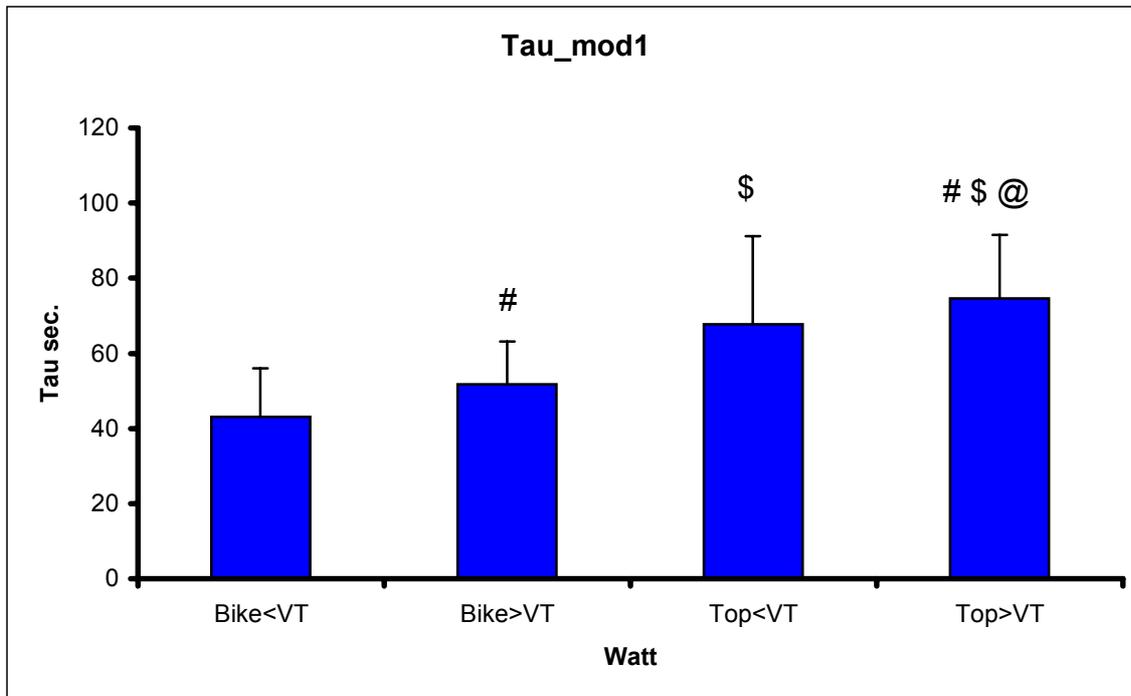
In tutti i soggetti i valori di frequenza cardiaca sono stati più alti nel carico più intenso. All'ergometro a braccia la frequenza media è stata di 118 b/min ( $\pm 30.5$ ) per il carico all'80% e di 134 b/min ( $\pm 34$ ) per il carico al 110%. Sul cicloergometro le frequenze, a parità di lavoro sono state più alte: 133 b/min ( $\pm 26.5$ ) per il carico sottosoglia e 160 b/min ( $\pm 18.2$ ) per il carico più intenso. Nel confronto tra i valori medi (fig. 21), è significativamente maggiore il valore di Fc ottenuto in entrambe le prove svolte sopra soglia rispetto ai corrispondenti esercizi con carico inferiore



**Fig. 21:** Valori medi di Fc e relative deviazioni standard durante il lavoro nei 4 diversi esercizi svolti. # = <VT vs. >VT; \$ = Bike Vs. Top; @ = Top 110 vs. Bike 80 ( $p < 0.05$ ).

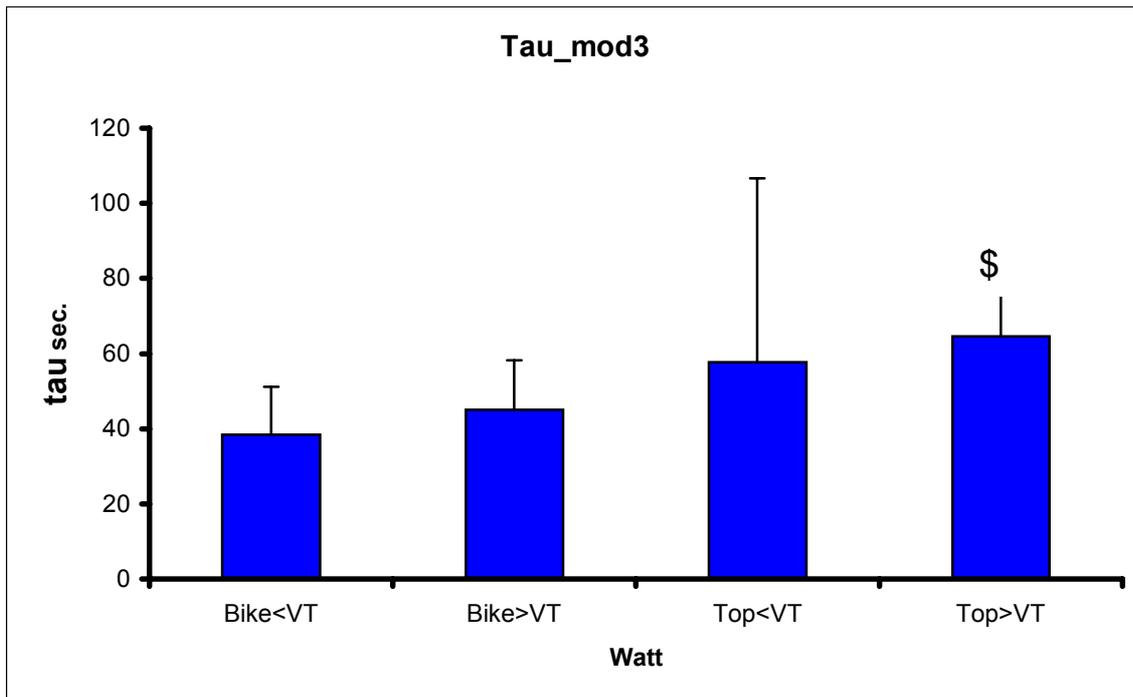
## 10.5- Tau

La fig. 22 illustra l'andamento dei valori medi della tau e le relative deviazioni standard durante i test svolti al cicloergometro all'80% (bike < VT) e al 110% (bike > VT) e all'ergometro a braccia all'80% (Top < VT) e al 110% (top > VT), seguendo il modello I.



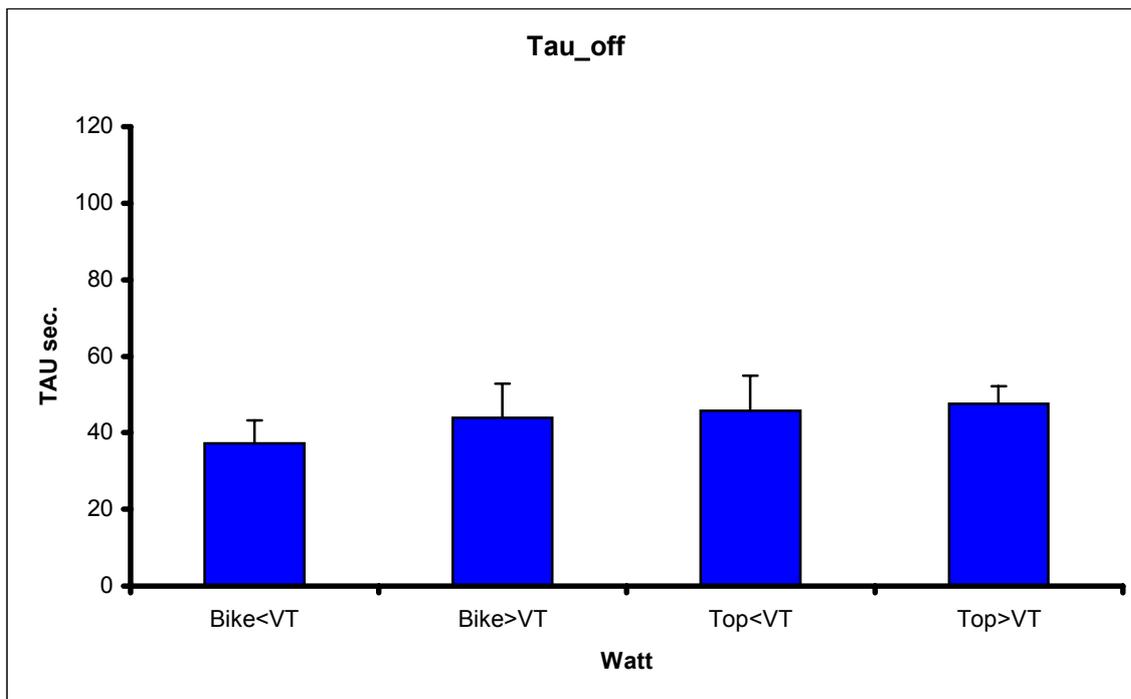
**Fig. 22:** Valori medi di Tau e relative deviazioni standard durante il lavoro nei 4 diversi esercizi calcolati in base al modello 1. I valori di Tau sono espressi in secondi. # = <VT vs. > VT; \$ = Bike Vs. Top; @ = Top 110 vs. Bike 80 (p<0.05).

A parità di intensità di lavoro, la tau è maggiore negli esercizi svolti al Top, a testimonianza della lentezza di adeguamento del consumo di ossigeno da noi riscontrata in questo tipo di esercizi e d'altra parte già documentata in letteratura (Cerretelli et al., 1979; Cerretelli et al., 1977; Pendergast et al., 1980). Significativamente maggiore appare poi la tau della Bike > VT contro Bike < VT ( $51.77 \pm 11.43$  vs  $43.09 \pm 12.86$ ), anche in questo caso confermando quanto riportato in letteratura circa la maggior durata dell'adeguamento negli esercizi a intensità maggiore (Wasserman et al., 1967). La differenza tra la tau nei due esercizi all'ergometro a braccia non appare invece significativa ( $67.71 \pm 23.47$  e  $74.68 \pm 16.88$  rispettivamente per Top < VT e Top > VT). È invece interessante notare la notevole differenza (quasi il doppio) tra Bike<VT e TOP>VT. Infatti mentre i due esercizi sono abbastanza simili dal punto di vista metabolico (quasi lo stesso consumo di ossigeno) i tempi di adeguamento delle cinetiche sono notevolmente diversi.



**Fig. 23:** Valori medi di Tau e relative deviazioni standard durante il lavoro nei 4 diversi esercizi calcolati in base al modello 3. I valori di Tau sono espressi in secondi. # = <VT vs. > VT; \$ = Bike Vs. Top; @ = Top 110 vs. Bike 80 (p<0.05).

Per quanto riguarda il modello 3 (fig. 23), un raffronto è possibile solo tra i due esercizi svolti al 110% AT, in quanto in 4 casi su 7 non è stato possibile individuare la fase II nell'esercizio al Top 80%. Anche analizzando i dati con il modello 3 la tau durante Bike > VT è maggiore di Bike < VT ( $45.07 \pm 13.14$  sec. vs  $38.39 \pm 12.72$  sec.) e il lavoro più intenso all'ergometro a braccia mostra una tau quasi doppia rispetto al lavoro sotto soglia al cicloergometro. La difficoltà nella distinzione tra fase I e fase II in un esercizio che inizia da un lavoro a carico nullo era già stata documentata in letteratura (Whipp et al., 1982).



**Fig. 24:** Valori medi di Tau e relative deviazioni standard durante la fase di recupero nei 4 diversi esercizi svolti. I valori di Tau sono espressi in secondi# = <VT vs. > VT; \$ = Bike Vs. Top; @ = Top 110 vs. Bike 80 ( $p < 0.05$ ).

La tau della fase di recupero (tau-off) (fig. 24) è significativamente maggiore al Top 80% rispetto alla Bike 80% ( $45.78 \pm 9.09$  sec. vs  $37.32 \pm 5.87$  sec.), mentre non si può dire la stessa cosa per i corrispondenti esercizi al 110% ( $47.53 \pm 4.59$ sec. vs  $43.89 \pm 8.94$  sec.). I nostri valori sono in linea con quelli riportati in precedenza (40 sec, cap. 6.4) per la componente rapida della fase *-off* del  $VO_2$ .

La tau-off inoltre è significativamente minore della tau della fase *-on* ( $47.53 \pm 4.59$  sec. vs  $74.68 \pm 16.88$  sec.) soltanto nell'esercizio al Top > VT, mentre in tutti gli altri casi, pur essendo la tau-off sempre minore della tau della fase on, tale differenza non appare significativa ( $p > 0.05$ ).

## 10.6- Time delay

Il time delay medio del modello 1 (fig. 25) non presenta differenze significative nei 4 esercizi svolti, andando da un minimo di  $4.36 \pm 3.29$  s (Top > VT) a  $7.57 \pm 2.29$  s (Bike < VT), mentre nel modello 3 (fig. 26) appare significativamente maggiore il TD del Top > VT ( $29.50 \pm 8.22$  s) rispetto alla Bike > VT ( $16.98 \pm 4.11$  s) e alla Bike 80% ( $20.34 \pm 5.16$  s).

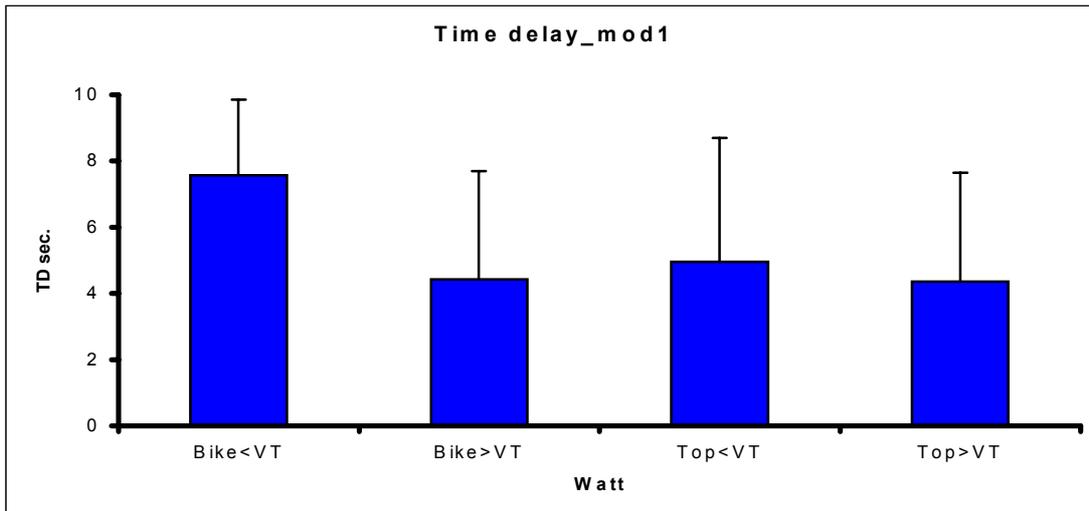


Fig. 25: Valori medi e relative deviazioni standard del TD nei 4 diversi esercizi svolti in base al modello 1.

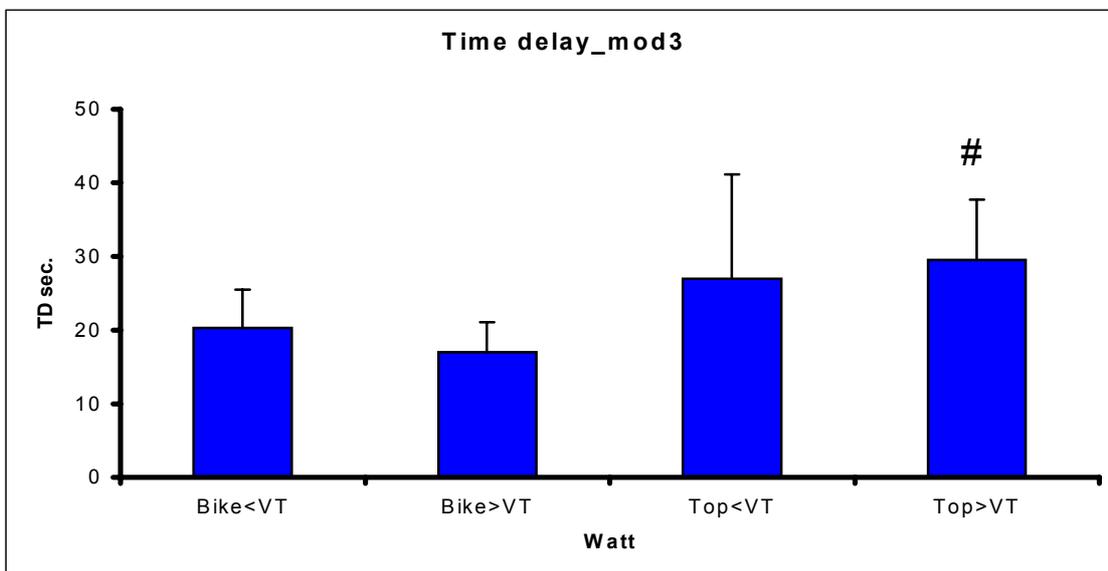
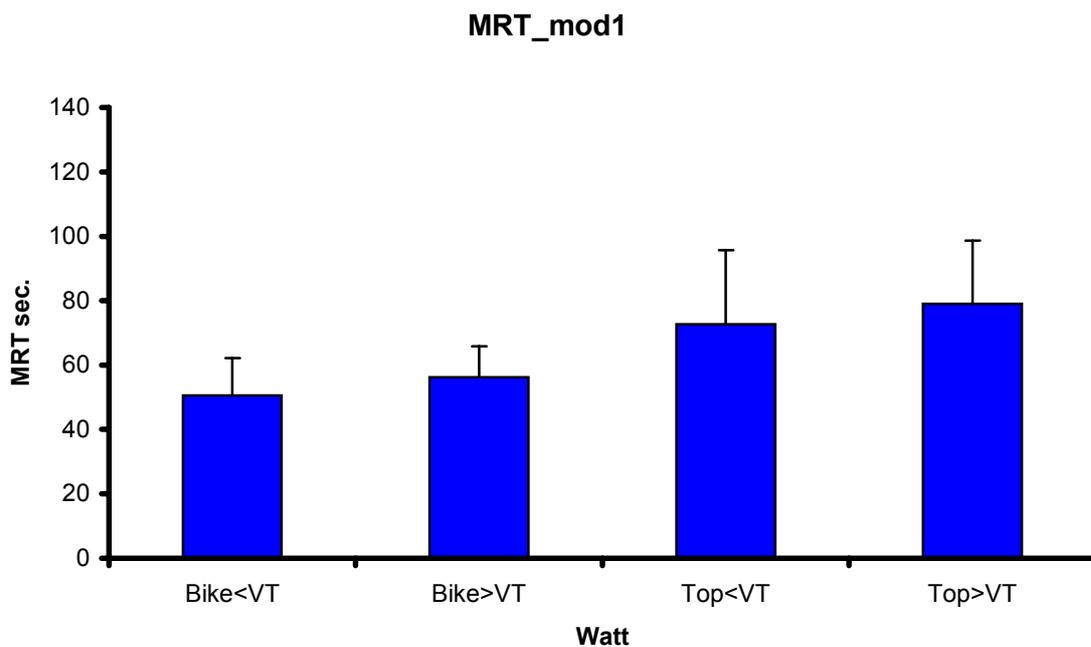


Fig. 26: Valori medi e relative deviazioni standard del TD nei 4 diversi esercizi svolti in base al modello 3. 3. # = <VT vs. >VT; \$ = Bike Vs. Top; @ = Top 110 vs. Bike 80 ( $p < 0.05$ )

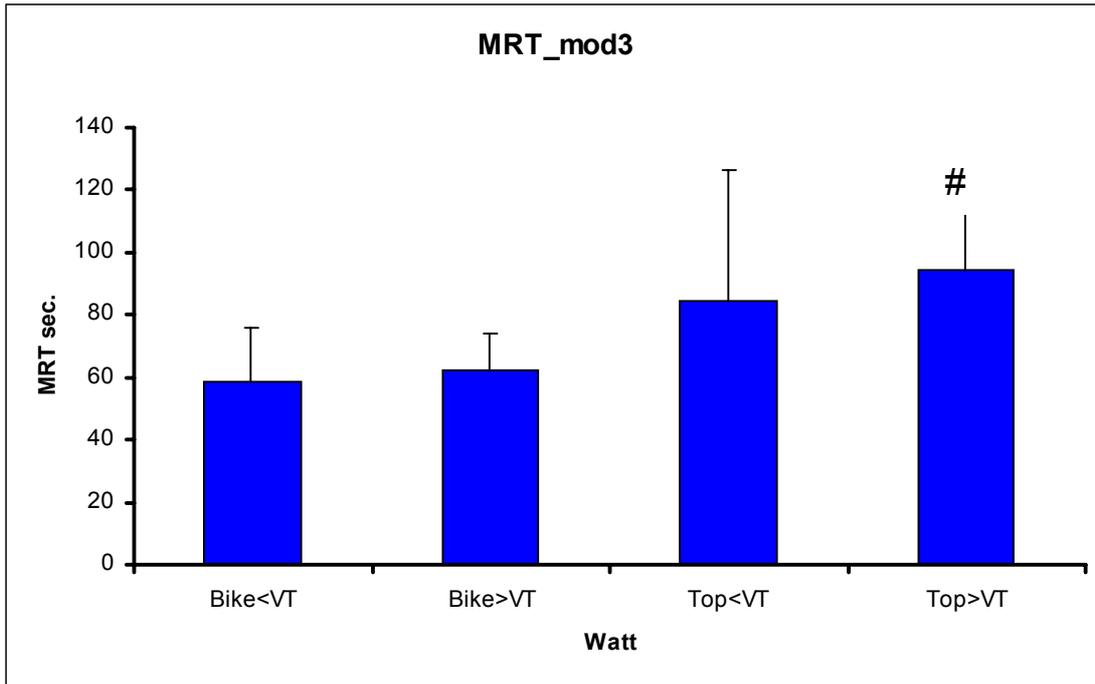
## 10.7- Mean response time

Modello 1 (fig. 27): il MRT appare sempre maggiore negli esercizi svolti all'ergometro a braccia rispetto a quelli svolti al cicloergometro, con valori medi di  $72.67 \pm 23$  s (Top < VT) e  $79.04 \pm 19.62$  s (Top > VT) vs  $50.66 \pm 11.54$  s (Bike <VT) e  $56.20 \pm 9.64$  s (Bike > VT). I valori di MRT ottenuti all'ergometro a braccia sono in linea con quelli riportati in letteratura da Hughson and Imman (1986) ( $81.2 \pm 37.5$ ).

Modello 3 (fig. 28): per i motivi già ricordati i dati medi nell'esercizio al Top < VT non sono stati presi in considerazione, per cui sono stati messi a confronto soltanto i restanti 3 esercizi. L'MRT è significativamente maggiore durante Top > VT ( $94.15 \pm 19.78$  s) rispetto ad entrambi gli esercizi al cicloergometro ( $58.72 \pm 16.95$  Bike < VT e  $62.05 \pm 11.76$  Bike > VT).



**Fig. 27:** Valori medi e relative deviazioni standard del del MRT nei 4 diversi esercizi in base al modello 1. # = <VT vs. > VT; \$ = Bike Vs. Top; @ = Top 110 vs. Bike 80 ( $p < 0.05$ )



**Fig. 28:** Valori medi e relative deviazioni standard del del MRT nei 4 diversi esercizi in base al modello 3. . # = <VT vs. > VT; \$ = Bike Vs. Top; @ = Top 110 vs. Bike 80 (p<0.05)

## 11 - DISCUSSIONE

Questa tesi è stata finalizzata ad indagare, attraverso l'approfondimento della letteratura scientifica ed una successiva indagine sperimentale, alcuni aspetti peculiari delle modalità con cui l'organismo umano è in grado di adeguare il metabolismo ossidativo alle mutate richieste che si verificano nel passaggio tra una condizione di riposo ed una attività fisica eseguita ad una intensità costante. In particolare sono state analizzate attraverso prove di laboratorio gli effetti di modalità ed intensità di esercizio fisico diversi sulle cinetiche del consumo di ossigeno in giovani adulti.

Fin dai primi studi nel 1913 (Krogh et al.) molti ricercatori hanno studiato la natura e i fattori limitanti le cinetiche del consumo di ossigeno. D'altra parte, sebbene le cinetiche del  $\text{VO}_2$  siano state studiate per quasi un secolo, sui meccanismi che controllano o limitano il grado di risposta del consumo di ossigeno vi è ancora sostanziale diversità di vedute tra i ricercatori: Se alcuni sostengono che le cinetiche del  $\text{VO}_2$  sono principalmente determinate dalla velocità di trasporto dell'ossigeno ai muscoli attivi (Hugson, 1990), altri credono che sia la capacità dei muscolari di utilizzare l' $\text{O}_2$  a rallentare l'adeguamento del  $\text{VO}_2$  (Whipp and Mahler, 1980).

Questi meccanismi di regolazione sembrano inoltre essere fortemente influenzati sia dall'intensità che dalla modalità di esercizio.

L'andamento della cinetica del consumo di ossigeno è funzione dell'intensità dell'esercizio. Durante esercizi con carichi di lavoro inferiori alla soglia ventilatoria il  $\text{VO}_2$  cresce in maniera esponenziale durante i primi 3 minuti di esercizio fino a raggiungere un livello stazionario che è in rapporto lineare con l'intensità assoluta del lavoro.

In esercizi svolti al di sopra della soglia ventilatoria la cinetica del consumo di ossigeno diviene più complessa. Infatti, dopo un primo incremento esponenziale fino al raggiungimento di livello intorno allo stato stazionario atteso, se l'esercizio si protrae oltre i tre minuti, si sviluppa una componente che fa aumentare il consumo di ossigeno verso il consumo massimo in maniera lineare (componente lenta del  $\text{VO}_2$ ).

Alcuni studi (Hughson et al., 1982; Hughson and Tschakovsky, 1999) indicano che in particolari condizioni (esercizi eseguiti con le braccia dalla posizione supina), i fattori circolatori possono diventare responsabili di parte del ritardo dell'adeguamento del  $\text{VO}_2$ . Ricerche effettuate sui cani, hanno anch'esse evidenziato come, per carichi di lavoro

intorno al 70% del  $VO_{2PEAK}$ , il rilascio dell'ossigeno ai muscoli non sia il fattore limitante la cinetica del  $VO_2$  (Grassi et al., 1998a). Lo stesso non può dirsi per carichi di lavoro superiori alla AT, per i quali invece la diffusione dell'ossigeno verso i muscoli pare essere uno dei fattori limitanti la cinetica del  $VO_{2-on}$  (Germino et al., 1996; MacDonald et al., 1997). Queste evidenze permettono di formulare l'ipotesi (Grassi et al., 1998a; Grassi et al., 1998b) che fino al 70% circa del  $VO_{2peak}$ , la cinetica del consumo di ossigeno nei primi 3 minuti di un esercizio svolto con grossi gruppi muscolari è maggiormente determinata da una intrinseca inerzia del metabolismo ossidativo.

La modalità di esecuzione del lavoro può tuttavia influenzare questa ipotesi: la quasi totalità degli studi sulle cinetiche del consumo di ossigeno riguarda sforzi svolti al cicloergometro mentre scarse sono le ricerche in cui è stato utilizzato il lavoro con le braccia. Alcune ricerche alla fine degli anni 70 hanno descritto cinetiche sensibilmente più lente all'ergometro a braccia rispetto ad un esercizio di pari intensità eseguito dagli stessi individui al cicloergometro (Cerretelli et al., 1979; Cerretelli et al., 1977; Pendergast et al., 1980).

La ricerca condotta per questa tesi conferma i risultati riportati negli studi precedenti indicando che indifferentemente dall'intensità dell'esercizio (sotto e sopra la soglia ventilatoria), la costante di tempo di adeguamento del consumo di ossigeno è sempre superiore nell'esercizio svolto con le braccia. Inoltre, è molto interessante notare che, confrontando l'esercizio più intenso con le gambe con quello sottosoglia all'ergometro a braccia (esercizi simili dal punto di vista metabolico), la costante di tempo è superiore durante l'esercizio all'ergometro a braccia.

Hughson and Morrissey (1983) sostengono che è il trasporto di ossigeno il principale fattore limitante l'onset del  $VO_2$  in esercizi a carico costante eseguiti con le braccia, ipotesi che trova riscontro anche nei test eseguiti da Hughson and Imman (1986) su soggetti studiati durante esercizio con e senza occlusione della circolazione negli arti inferiori. In questi soggetti la cinetica della  $VO_2$  risultava costantemente e significativamente più rapida quando fosse stato bloccato il flusso sanguigno nelle gambe ( $MRT 66.0 \pm 26.4$  vs  $81.2 \pm 37.5s.$ ) e quindi una maggiore massa ematica fosse disponibile per la circolazione dei distretti interessati al lavoro muscolare.

I nostri risultati, invece, avvalorano la tesi che sia la capacità di utilizzo periferico più che la capacità di trasporto dell'ossigeno il fattore limitante la cinetica del  $VO_2$ . Infatti, il confronto tra esercizi paragonabili dal punto di vista metabolico (stesso consumo di

ossigeno), ma svolti con masse muscolari differenti (braccia vs. gambe), fornisce tempi di adeguamento significativamente maggiori (con una MRT di quasi il doppio) quando il lavoro è svolto con le braccia invece che con le gambe. Questo è in accordo con Di Prampero e Ferretti (1990) i quali hanno dimostrato che durante un lavoro con piccoli gruppi muscolari (quale il lavoro all'ergometro a braccia), il peso dei fattori cardiocircolatori diminuisce, mentre aumenta in proporzione il peso dei fattori periferici

Possiamo quindi concludere che l'entità delle masse muscolari implicate in un esercizio sembrano avere un peso rilevante nella regolazione della cinetica del consumo di ossigeno nel soggetto adulto sano, per cui la limitazione temporale all'adeguamento è riferibile ad un bilancio complesso in cui il ruolo dei fattori centrali cresce con l'incremento delle masse muscolari utilizzate mentre al contrario il peso delle componenti periferiche acquisisce più rilievo se la quantità totale di muscoli attivi è più ridotta.

## **RINGRAZIAMENTI**

Questa tesi è frutto della collaborazione tra il Laboratorio di Fisiologia dell'Esercizio del Corso di Laurea in Scienze Motorie dell'Università di Verona e il CeBiSM di Rovereto.

Un ringraziamento particolare va alla ditta Technogym® che ha messo a disposizione le attrezzature utilizzate nell'esecuzione degli esperimenti.

# BIBLIOGRAFIA

- ANDERSEN, P., J. HENRIKSSON. *Capillary supply of the quadriceps femoris muscle of man: adaptive response to exercise*. J. Physiol. (London) 270: 677-690, 1977.
- ARMON, Y., D. M. COOPER, R. FLORES, S. ZANCONATO, T. Y. BARSTOW. *Oxygen uptake kinetics during high-intensity exercise in children and adults*. J. Appl. Physiol. 70:841-848, 1991.
- ASMUSSEN, E., M. NIELSEN, *Cardiac output during muscular work and its regulation*, Physiological Reviews, 35: 778-800, 1955.
- ASTRAND, P. O., B. EKBLUM, R. MESSIN, B. SALTIN, J. STENBERG, *Intra-arterial blood pressure during exercise with different muscle groups*, J. Appl. Physiol., 20: 253, 1965.
- BABCOCK, M. A., D. H. PATERSON, D. A. CUNNINGHAM, J. R. DICKINSON. *Exercise on-transient gas exchange kinetics are slowed as a function of age*. Med. Sci. Sports Exerc. 26:440-446, 1994.
- BARSTOW, T. J. *Characterization of VO<sub>2</sub> Kinetics during heavy exercise*. Med. Sci. Sports Exerc. 26: 1327-1334, 1994.
- BARSTOW, T. J., JONES A. M., NGUYEN P. H., CASABURI R., *Influence of muscle fiber type and pedal frequency on oxygen uptake kinetics of heavy exercise*, J. Appl. Physiol., 81: 1642-1650, 1996.
- BINZONI, T., CERRETELLI P., *Bioenergetic approach to transfer function of human skeletal muscle*. J. Appl. Physiol. 77: 1784-1789, 1994.
- BROOKS, G. A. *The lactate shuttle during exercise and recovery*. Med. Sci. Sports Exerc. 18: 360-368, 1986.
- CASABURI, R., T. W. STORER, I. BEN-DOV, K. WASSERMAN, *Effect of endurance training on possible determinants of VO<sub>2</sub> during heavy exercise*. J. Appl. Physiol. 62: 199-207, 1987.
- CASABURI, R., B. J. WHIPP, K. WASSERMAN, W. L. BEAVER, S. N. KOYAL. *Ventilatory and gas exchange dynamics in response to sinusoidal work*. J. Appl. Physiol. 42: 300-311, 1977.
- CERRETELLI, P., *Manuale di fisiologia dello sport e del lavoro muscolare*, SEU, Roma, 1973.
- CERRETELLI, P., B. GRASSI, A. COLOMBINI, B. CARU, C. MARCONI. *Gas exchange and metabolic transient in heart transplant recipients*. Respir. Physiol. 74: 355-371, 1988.
- CERRETELLI, P., P. E. DI PRAMPERO. *Gas exchange in exercise*. In: Handbook of Physiology. The Respiratory System. Gas Exchange, Sect. 3, Vol. IV, L. E. Fahri and S. M. Tenney (Eds.) Bethesda, MD: American Physiological Society, pp. 297-339, 1987.
- CERRETELLI, P., D. R. PENDERGAST, W. C. PAGANELLI, D. W. RENNIE. *Effects of specific muscle training on the VO<sub>2</sub> on-response and early blood lactate*. J. Appl. Physiol. 47:761-769, 1979.
- CERRETELLI, P., D. W. RENNIE, D. R. PENDERGAST. *Kinetics of metabolic transient during exercise*. In: *Exercise Bioenergetics and Gas Exchange*, P. Cerretelli and B. J. Whipp (Eds.). Amsterdam: Elsevier, pp. 187-209, 1980.
- CERRETELLI, P., D. SHINDELL, D. P. PENDERGAST, D. E. DI PRAMPERO, D. W. RENNIE. *O uptake transients at the onset of arm and leg work*. Respir. Physiol. 30: 81-97, 1977.
- CERRETELLI, P., R. SIKAND, L. E. FARHI. *Readjustments in cardiac output and gas exchange during onset of exercise and recovery*. J. Appl. Physiol. 21: 1345-1350, 1966.
- CHILIBECK, P. D., D. H. PATERSON, W. D. F. SMITH, D. A. CUNNINGHAM. *Cardiorespiratory kinetics during exercises of different muscle groups and mass in old and young*. J. Appl. Physiol. 81:1388-1394, 1996.
- CONVERTINO, D. A., D. J. GOLDWATER, H. SANDLER. *VO<sub>2</sub> kinetics of constant load exercise following bed-rest induced deconditioning*. J. Appl. Physiol. 57:1545-1550, 1984.
- COOPER, D. M., C. BERRY, N. LAMARRA, et al., *Kinetics of oxygen uptake and heart rate at onset of exercise in children*. J. Appl. Physiol. 59: 211-217, 1985.
- DAIMOND, L. B., R. CASABURI, K. WASSERMAN, B. J. WHIPP. *Kinetics of gas exchange and ventilation in transition from rest or prior exercise*. J. Appl. Physiol.: Respirat. Environ. Exercise Physiol. 43: 704-708, 1977.
- DAVIES, C. T. M., P. E. DI PRAMPERO, P. CERRETELLI. *Kinetics of cardiac output and respiratory gas exchange during exercise and recovery*. J. Appl. Physiol. 32: 618-625, 1972.
- DEL MONTE A., FAINA M., *Valutazione dell'atleta*, UTET Torino, 1999.
- DI PRAMPERO, P. E.. *Metabolic and circulatory limitations to VO<sub>2</sub>max at the whole animal level*. J. Exp. Biol. 115: 319-331, 1985.

- DI PRAMPERO, P. E., G. FERRETTI, *Factors limiting maximal oxygen consumption in humans*, Respiration Physiology, 80, 1990.
- DI PRAMPERO, P. E., C. L. LAFORTUNA. *Breath-by-breath estimate of alveolar gas transfer variability in man at rest and during exercise*. J. Physiol. Lond. 415: 459-475, 1989.
- FUKUOKA, Y., B. GRASSI, M. CONTI, et al., *Early effects of exercise training on VO<sub>2</sub>-on and off-kinetics in 50 year-old subjects*. Med. Sci. Sports Exerc. 31:S382, 1999.
- GAESSER, G. A., D. C. POOLE, *The slow component of oxygen uptake kinetics in humans*. In: Exercise and Sport Sciences Reviews, Vol. 24, J. O. Holloszy (Ed.). Baltimore: Williams & Wilkins, pp. 35-70, 1996.
- GERBINO, A., WARD S. A., WHIPP B. J., *Effects of prior exercise on pulmonary gas-exchange kinetics during high-intensity exercise in humans*, J. Appl. Physiol., 80: 99-107, 1996.
- GRASSI, B., *Skeletal muscle VO<sub>2</sub> on-kinetics: set by O<sub>2</sub> delivery or by O<sub>2</sub> utilization? New insights into an old issue*. Med. Sci. Sports Exerc., Vol. 32, N° 1, pp. 108-116, 2000.
- GRASSI, B., L. B. GLADDEN, M. SAMAJA, C. M. STARY, M. C. HOGAN. *Faster adjustment of VO<sub>2</sub> delivery does not affect VO<sub>2</sub> on-kinetics in isolated in situ canine muscle*. J. Appl. Physiol. 85: 1394-1403, 1998a.
- GRASSI, B., L. B. GLADDEN, C. M. STARY, P. D. WAGNER, M. C. HOGAN. *Peripheral O<sub>2</sub> diffusion does not affect VO<sub>2</sub> on-kinetics in isolated in situ canine muscle*. J. Appl. Physiol. 85: 1404-1412, 1998b.
- GRASSI, B., C. MARCONI, M. MEYER, M. RIEU, P. CERRETELLI. *Gas exchange and cardiovascular kinetics with different exercise protocols in heart transplant recipients*. J. Appl. Physiol. 82:1952-1962, 1997.
- GRASSI, B., D. C. POOLE, R. S. RICHARDSON, D. R. KNIGHT, B. K. ERICKSON, P. D. WAGNER. *Muscle O<sub>2</sub> uptake kinetics in humans: implications for metabolic control*. J. Appl. Physiol. 80: 988-998, 1996.
- GUYTON A., *Trattato di fisiologia medica*, Piccin, Padova, 1995.
- HAGBERG J. M., J. P. MULLIN, F. J. NAGLE, *Effect of work intensity and duration on recovery O<sub>2</sub>*, J. Appl. Physiol., 48: 540-544, 1980.
- HENRIKSSON, J., J. S. REITMANN. *Time course of changes in human skeletal muscle succinate dehydrogenase and cytochrome oxidase activities and maximal oxygen uptake with physical activity and inactivity*. Acta Physiol. Scand. 99: 91-97, 1977.
- HICKSON, R. C., H. A. BOMZE, J. O. HOLLOSZY, *Faster adjustment of O<sub>2</sub> uptake to the energy requirement of exercise in the trained state*. J. Appl. Physiol. 44: 877-881, 1978.
- HILL, A. V., LUPTON H., *Muscular exercise, lactic acid, and the supply and utilisation of oxygen*, Q. J. Med., 16: 135-171, 1923.
- HUGHSON, R. L., TSCHAKOVSKY M. E., *Cardiovascular dynamics at the onset of exercise*, Med. Sci. Sports Exerc., Vol. 31, No. 7, pp. 1005-1010, 1999.
- HUGHSON, R. L. *Exploring cardiorespiratory control mechanism through gas exchange dynamics*. Med. Sci. Sports Exerc. 22:72-79, 1990.
- HUGHSON, R. L., M. D. IMMAN, *Faster kinetics of VO<sub>2</sub> during arm exercise with circulatory occlusion of the legs*, Int. J. Sports Med., 7: 22-25, 1986.
- HUGHSON, R. L., M. A. MORRISSEY, *Delayed kinetic of respiratory gas exchange in the transition from prior exercise*. J. Appl. Physiol. 52: 921-929, 1982.
- HUGHSON, R. L., M. A. MORRISSEY, *Delayed kinetic of VO<sub>2</sub> in the transition from prior exercise. Evidence for O<sub>2</sub> transport limitation of VO<sub>2</sub> kinetics: a review*. Int. J. Sports Med., 4: 31-39, 1983.
- HUGHSON, R. L., SHOEMAKER J. K., TSCHAKOVSKI M. E., KOWALCHUCK J. M. *Dependence of muscle VO<sub>2</sub> on blood flow dynamics at onset of forearm exercise*. J. Appl. Physiol. 81:1619-1626, 1996.
- KAIJSER, L. *Limiting factors for aerobic muscle performance*. Acta Physiol. Scand. Suppl. 346: 1-96, 1970.
- KARLSSON, J., L.-O. NORDESJO, L. JORFELDT, B. SALTIN. *Muscle lactate, ATP, and CP levels during exercise after physical training in man*. J. Appl. Physiol., 33: 199-203, 1972.
- KOGA, S., T. SHIOJIRI, N. KONDO, et al., *Effect of increased muscle temperature on oxygen uptake kinetics during exercise*. J. Appl. Physiol., 83: 1333-1338, 1997.
- KROGH, A. AND LINDHART J., *The changes in respiration at the transition from work to rest*, J. Physiol., 53: 431-439, 1920.
- LAMB D. R., *Physiology of exercise*, MacMillan, New York, 1984.
- LINNARSON, D., *Dynamics of pulmonary gas exchange and heart rate changes at start and end of exercise*, Acta Physiologica Scandinavica, supplementum 415, Stockholm, 1974.

- MACDONALD, M., PEDERSEN P. K., HUGHSON R. L., *Acceleration of VO<sub>2</sub> kinetics in heavy submaximal exercise by hyperoxia and prior high-intensity exercise.* J. Appl. Physiol. 83:1318-1325, 1997.
- MCARDLE W. D., F. I. KATCH, V. L. KATCH, *Exercise physiology.* 4<sup>th</sup> ed. Baltimore (MD): William & Wilkins, 1996.
- MADER A., H. LIESEN, H. HECK et al., *Zur Beurteilung der sportartspezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit im Labor,* Sportarzt. Sportmed., 4: 80, 1976.
- NERY, L. E., K. WASSERMAN, J. D. ANDREWS, et al., *Ventilatory and gas exchange kinetics during exercise in chronic obstructive pulmonary disease.* J. Appl. Physiol. 53: 1594-1602, 1982.
- NIGEL A.S. TAYLOR, OSBORNE M.A., BUBE L.A., STOCKS J.M.. *Cardiorespiratory dynamics: sensitività of the on-transition to endurance-training status.* Eur J Appl Physiol 80: 505-507, 1999.
- PATERSON, D. H., *Effects of ageing on the cardiorespiratory system.* Can. Y. Sport Sci. 17: 171-177, 1992.
- PENDERGAST, D. R., D. SHINDELL, P. CERRETELLI, D. W. RENNIE, *Role of central and peripheral circulatory adjustment in oxygen transport at the onset of exercise.* Int J. Sports Med. 1: 160-170, 1980.
- PHILLIPS, S. M., H. J. GREEN, M. J. MACDONALD, R. L. HUGHSON. *Progressive effect of endurance training on VO<sub>2</sub> kinetics at onset of submaximal exercise.* J. Appl. Physiol. 79:1914-1929, 1995.
- PIIPER, J., DI PRAMPERO P. E., CERRETELLI P. *Oxygen debt and high-energy phosphates in gastrocnemius muscle of the dog.* Am. J. Physiol., 215: 523-531, 1968.
- POOLE, D. C., W. SCHAFFARTZIK, D. K. KNIGHT, T. DERION, B. KENNEDY, H. J. GUY, R. PREDILETTO, P. D. WAGNER, *Contribution of exercising legs to the slow component of oxygen uptake kinetics in humans,* J. Appl. Physiol. 71(4): 1245-1253, 1991.
- POOLE, D. C., S. A. WARD, G. W. GARDNER, B. J. WHIPP, *Metabolic and respiratory profile of the upper limit for prolonged exercise in man.* Ergonomics 31: 1265-1279, 1988.
- ROSTON, W. L., B. J. WHIPP, J. A. DAVIS, D. A. CUNNINGHAM, R. M. EFFROS, K. WASSERMAN. *Oxygen uptake kinetics and lactate concentration during exercise in humans.* Am. Rev. Respir. Dis. 135: 1080-1084, 1987.
- ROWELL, L. B. *Cardiovascular limitations to work capacity.* In: Physiology of Work Capacity and Fatigue, edited by E. Simonsen. Springfield, IL: Thomas, pp. 132-169, 1971.
- ROWELL, L. B. *Human circulation: regulation during physical stress.* New York: Oxford University Press, p. 282, 1986.
- SALTIN, B., C. G. BLOMQUIST, R. C. MITCHELL, R. L. JOHNSON, K. WILDENTHAL, C. B. CHAPMAN. *Response to exercise after bed rest and after training.* Circulation 38 (Suppl. 7): 1-78, 1968.
- SHOEMAKER, J.K., PHILLIPS, S. M., GREEN H. G., HUGHSON R. L. *Faster femoral artery blood velocity kinetics at the onset of exercise following short-term training.* Cardiovasc. Res., 31: 278-286, 1996.
- SIETSEMA, K. E., D. M. COOPER, M. H. ROSSO, et al., *Dynamics of oxygen uptake during exercise in adults with cyanotic congenital heart disease.* Circulation 73: 1137-1144, 1986.
- SPINA, R. J., M. M. Y. CHI, M. G. HOPKINS, P. M. NEMETH, O. H. LOWRY, J. O. HOLLOSZY. *Mitochondrial enzymes increase in muscle in response to 7-10 days of cycle exercise.* J. Appl. Physiol. 80: 2250-2254, 1996.
- STENBERG, G., P. O. ASTRAND, B. EKBLOM, J. ROYCE, B. SALTIN, *Hemodynamic response to work with different muscle groups, sitting and supine,* J. Appl. Physiol., 22: 61-70, 1967.
- TIMMONS, J. A., T. GUSTAFSSON, C. J. SUNDBERG, E. JANSSON, P. L. GREENHAFF. *Muscle acetyl group availability is a major determinant of oxygen deficit in humans during submaximal exercise.* Am. J. Physiol. 274 (Endocrinol. Metab. 37): E377-E380, 1998.
- TIMMONS, J. A., S. M. POUCHER, D. CONSTANTIN-TEODOSIU, I. A. MACDONALD, P. L. GREENHAFF. *Metabolic responses from rest to steady state determine contractile function in ischemic skeletal muscle.* Am. J. Physiol. 273 (Endocrinol. Metab. 36): E233-E238, 1997.
- VOLLESTAD, N. K., P. C. S. BLOM, *Effect of varying exercise intensity on glycogen depletion in human muscle fibres.* Acta Physiol. Scand. 125: 395-405, 1985.
- WAGNER, P. D. *Determinants of maximal oxygen transport and utilization.* Ann. Rev. Physiol. 58: 21-50, 1996.
- WASSERMAN K., HANSEN J., SUE D., WHIPP B., *Principles of exercise testing and interpretation,* Lea & Febiger, Philadelphia, 1987.
- WASSERMAN K., *The anaerobic threshold: definition, physiological significance and identification,* Adv. Cardiol. Vol. 35, pp. 1-23, 1986.
- WASSERMAN, K., A. L. VAN KESSEL, G. G. BURTON, *Interaction of physiological mechanism during exercise.* J. Appl. Physiol. 22: 71-85, 1967.
- WEISSMAN, M. L., P. W. JONES, A. OREN, N. LAMARRA, B. J. WHIPP, K. WASSERMAN. *Cardiac output increase and gas exchange at the start of exercise.* J. Appl. Physiol. 52: 236-244, 1982.
- WHIPP, B. J., *Rate constant for the kinetics of oxygen uptake during light exercise.* J. Appl. Physiol. 30: 261-263, 1971.

WHIPP, B. J., M. MAHLER. *Dynamics of pulmonary gas exchange during exercise*. In: Pulmonary gas exchange, Vol. II, J. B. West (Ed.). New York: Academic, pp. 33-95, 1980.

WHIPP, B. J., S. A. WARD. *Physiological determinants of pulmonary gas exchange kinetics during exercise*. Med. Sci. Sports Exerc. 22:62-71, 1990.

WHIPP, B. J., WARD S. A., LAMARRA N., DAVIS J. A., WASSERMANN K. *Parameters of ventilatory gas exchange dynamics during exercise*. J. Appl. Physiol.: Respirat. Environ. Exercise Physiol. 52(6) : 1506-1513, 1982.

WHIPP, B. J., K. WASSERMAN. *Oxygen uptake kinetics for various intensities of constant-load work*. J. Appl. Physiol. 33: 351-356, 1972.

WILLIS, W. T. R., M. R. JACKMAN, *Mitochondrial function during heavy exercise*. Med. Sci. Sports Exerc. 26: 1347-1354, 1994.

YOSHIDA, T., B. J. WHIPP, *Dynamic asymmetries of cardiac output transient in response to muscular exercise in man..* J. Physiol. (Lond.) 480: 355-359, 1994.