



Università degli Studi di Cagliari

DOTTORATO DI RICERCA

Biologia e Biochimica dell'uomo e dell'ambiente

Ciclo XXIV

TITOLO TESI

Specificità dei test cardio-polmonari nel nuoto: comparazione tra il nuoto
trattenuto e test aspecifici di laboratorio

Settore/i scientifico disciplinari di afferenza

BIO/09 M-EDF/02

Presentata da:	Marco Pinna
Coordinatore Dottorato	Angelo Cau
Tutor/Relatore	Alberto Concu

Esame finale anno accademico 2010 – 2011

Marco Pinna ha svolto la propria attività di studio e ricerca presso il Laboratorio di Fisiologia degli Sport del Dipartimento di Scienze Mediche.

Il dottorando ha sviluppato il piano di ricerca triennale in laboratorio e sul campo con nuotatori agonisti e master. Il tema principale del dottorato è rappresentato dalla realizzazione di nuovi metodi di ricerca applicabili al nuoto di superficie. Si è inoltre proceduto allo studio di nuove informazioni circa gli aggiustamenti e gli adattamenti cardio-metabolici del corpo umano in acqua, nonché all'individuazione di specifiche variabili funzionali che siano di aiuto nell'ottimizzazione dei protocolli di allenamento nel nuoto di superficie.

Coerentemente con gli obiettivi della ricerca, il candidato si è inizialmente dedicato all'analisi dello stato dell'arte sugli indicatori della performance natatoria, e, successivamente, alla definizione del protocollo sperimentale.

Lo scopo della ricerca è stato duplice. Da un lato, la realizzazione di un test incrementale specifico per il nuoto teso allo studio delle variabili cardio-metaboliche durante esercizio e dall'altro la sua comparazione con dei test aspecifici condotti in laboratorio con l'obiettivo di determinare se e quali test di laboratorio portano a risultati simili e intercambiabili con quelli ottenuti dal test specifico eseguito in acqua.

Il test specifico è stato realizzato in piscina, utilizzando uno speciale cavo elastico ed un dinamometro per la valutazione del parametro Forza, mentre per l'analisi dei gas per la valutazione delle variabili come il VO_2 e il VCO_2 è stato utilizzato uno snorkel frontale adattato per poter alloggiare al suo interno il pneumotacografo del metabolimetro portatile. Le analisi sono state effettuate mediante la metabolimetria con spettrometro di massa portatile (Modello VO_{2000} MedGraphics, variabili monitorate: VO_2 , VCO_2 , RER, HR, VT, RR, V_e), e si tratta della tecnica di riferimento per la valutazione dello stato metabolico. La metodica è quindi caratterizzata da una bassa invasività ed elevata accuratezza.

Lo studio ha coinvolto un gruppo di atleti e tecnici di alto livello regionale, ed è stato in parte finanziato dal CONI Regionale Sardegna, in quanto tale progetto è risultato vincitore del bando "Laboratorio dello Sport Sardegna", intravedendo possibili risvolti pratici per la metodologia di allenamento degli atleti.

L'analisi statistica dei risultati ha mostrato come l'utilizzo di test aspecifici condotti in laboratorio nella valutazione funzionale dei nuotatori possa portare facilmente ad incorrere in errori macroscopici di valutazione circa lo stato di performance degli atleti. Altresì, dai dati si può evidenziare che il test eseguito sul nastro trasportatore sia quello che maggiormente si avvicina come risultato a quello specifico condotto in acqua.

L'attività del dottorando si è inoltre soffermata su molteplici aspetti legati alla fisiologia sportiva in ambiente acquatico. A tale riguardo sono stati portati avanti tre filoni di ricerca aventi come obiettivo:

- Effettuare misure emodinamiche subacquee durante apnea statica e dinamica attraverso l'uso della cardiometria ad impedenza.
- Verifica della capacità di performance nei nuotatori prima e dopo l'assunzione di succo di rapa rossa come integratore alimentare di Nitrati
- Verifica di come a parità di volume e di intensità dell'esercizio proposto, l'uso della frequenza cardiaca, possa rappresentare un valido strumento per la determinazione del recupero passivo nel miglioramento della velocità corrispondente alla SAN.

I risultati preliminari della ricerca sono stati pubblicati come abstracts in due recenti congressi scientifici:

- Comparison between specific and unspecific testing in swimming; ; Pinna M., Milia R., Roberto S., Loi A., Migliaccio GM., Ortu M., Crisafulli A.; Accettato al XVI Congresso Internazionale dell' European College of Sport Science, 2011.
- Milia R., Pinna M., Roberto S., Loi A., Ortu M., Angius L., Migliaccio GM., Crisafulli A., Concu A.; Comparison between specific and unspecific testing in swimming; 5th Annual Meeting of Young Researchers in Physiology 8-10 June 2011.

Il dottorando Marco Pinna ha mostrato di possedere buone capacità di ricerca, con particolare riferimento agli aspetti applicativi in campo natatorio, come risulta dalla notevole quantità ed originalità di dati scientifici raccolti, il cui sviluppo potrebbe tradursi in una apprezzabile divulgazione scientifica. Ha inoltre dimostrato ottime capacità didattiche ed apprezzabili attitudini relazionali.

Il Direttore del Dottorato di Ricerca

Prof. Angelo Cau



Indice

Introduzione, pag. 6

Materiali e metodi, pag. 15

 Protocollo di studio, pag. 15

 Soggetti, pag. 20

 Analisi dei dati, pag. 20

Risultati, pag. 21

Discussione, pag. 24

Tabelle e grafici, pag. 27

Bibliografia, pag. 38

INTRODUZIONE

Il nuoto può essere definito uno sport ciclico, ad alta valenza coordinativa, caratterizzato dalla ricerca della maggior velocità possibile volta al raggiungimento della migliore performance ^(1,2).

Lo sviluppo scientifico-metodologico ha portato all'individuazione di 4 stili fondamentali, tre dei quali, il delfino, il dorso e la rana hanno delle regole tecniche imposte dalla federazione internazionale che devono essere seguite durante lo svolgimento delle competizioni, mentre il quarto stile, definito Freestyle o stile libero, consente la piena libertà regolamentare del gesto.

In tutti gli stili è possibile distinguere due fasi principali, una propulsiva e una di recupero, e in base alla coordinazione degli arti si possono suddividere in due categorie generali: la prima comprende la rana ed il delfino, dove le varie fasi delle nuotate sono eseguite contemporaneamente dagli arti superiori, coordinati con un movimento contemporaneo degli arti inferiori; la seconda comprende il dorso e lo stile libero, dove le fasi della nuotata sono eseguite in maniera coordinata e alternata dagli arti superiori con differenti ritmi della battuta di gambe ⁽³⁾, avendo quindi un momento in cui un arto esegue la fase propulsiva, mentre il suo controlaterale esegue il recupero.

Negli ultimi 10-15 anni sono state effettuate numerose ricerche scientifiche, orientate maggiormente sull'analisi dei fattori che influenzano maggiormente la performance natatoria ⁽⁴⁾. Questi fattori possono essere suddivisi in sette grandi gruppi:

- Fattori fisiologici, che comprendono lo studio degli aggiustamenti e degli adattamenti indotti dall'esercizio sul sistema cardio-polmonare;
- Fattori antropometrici, come per esempio le proporzioni corporee che giocano un ruolo fondamentale sul dispendio energetico;
- Fattori tecnico-coordinativi, caratterizzati dalla tecnica esecutiva che incide sull'economia della nuotata;
- Fattori psicologici, che consentono di capire meglio soprattutto l'intensità dello stress emotivo e i livelli d'ansia a cui è sottoposto il nuotatore;
- Fattori biomeccanici e bioenergetici, con particolare riferimento allo studio e alla valutazione del costo energetico e dell'efficienza propulsiva;
- Fattori ambientali, tra cui sono assolutamente da citare le caratteristiche del mezzo acqua, come per esempio l'alta resistenza che essa oppone al movimento;
- Fattori senso-percettivi, che rappresentano la base per lo sviluppo di quello che comunemente viene chiamato "scivolamento" che rappresenta la capacità dell'uomo di sfruttare a pieno l'inerzia del corpo immerso in acqua.

L'impegno metabolico e il costo energetico che ne deriva "nel nuoto è elevato, ma una sua considerevole riduzione ed un aumento della velocità di gara è il risultato di un regolare allenamento" ⁽⁵⁾.

Nel 1985 Di Prampero, nel suo famoso libro "La locomozione umana su terra, in acqua, in aria" evidenzia come il costo energetico per unità di percorso ($\text{KJ} \cdot \text{Km}^{-1}$) nel nuoto è superiore ad ogni altra forma di locomozione umana ⁽⁶⁾, per questo motivo, le velocità raggiunte dall'uomo in acqua ($2,09 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$, circa $7,5 \text{ Km} \cdot \text{h}^{-1}$ nei 100 stile

libero) sono notevolmente inferiori rispetto alla terra ferma ($10 \text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$, in altre parole $36 \text{ Km}\cdot\text{h}^{-1}$ nella gara dei 100 metri nell'atletica leggera).

Nonostante queste notevoli differenze di velocità la potenza muscolare dei vari gruppi d'atleti di alto livello (nuotatori, ciclisti, marciatori ecc.) è sostanzialmente identica ⁽⁶⁾. Da questo deriva che le velocità raggiunte non dipendono solo ed esclusivamente dalla macchina uomo, ma anche dalle caratteristiche intrinseche di ogni forma di locomozione umana che ne determina il costo energetico.

Il costo energetico (C) rappresenta la quantità di energia consumata per coprire una determinata distanza ($C = \text{kJ}\cdot\text{Km}^{-1}$) generalmente stimato soprattutto nello stile libero, come percentuale dello steady-state del consumo di ossigeno ($\text{VO}_{2\text{ss}}$) per la corrispondente velocità di nuotata ⁽⁷⁾.

Le variazioni del costo energetico, nella stessa forma di locomozione, in questo caso nel nuoto sono da mettere in relazione con le caratteristiche proprie del nuotatore o dello stile preso in considerazione.

Infatti, si è visto come in generale gli atleti d'élite, presentano un dispendio energetico che a parità di velocità è mediamente inferiore del 20% rispetto agli agonisti di livello medio-alto e di circa il 50% inferiore rispetto agli agonisti di livello medio-basso. Il che significa che i nuotatori d'élite possiedono una tecnica di progressione più economica che consente loro di raggiungere velocità maggiori.

Un altro fattore che influisce sul dispendio energetico è il sesso.

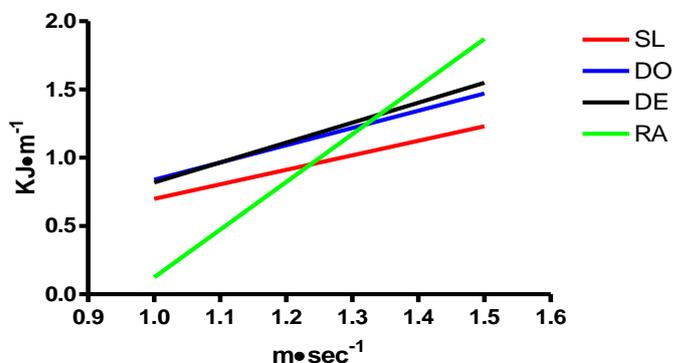
Le donne hanno un dispendio energetico che equivale a circa l'80% del valore osservato negli uomini, tale differenza è da mettere in relazione con le diverse

caratteristiche antropometriche e idrodinamiche dell'uomo rispetto alla donna. Infatti, a parità di altre condizioni, le donne presentano un minor dispendio energetico soprattutto per il mantenimento della posizione orizzontale in acqua.

Recenti ricerche hanno messo in evidenza come questo dispendio energetico, necessario a far rimanere in posizione orizzontale il nuotatore, influisca negativamente soprattutto per le basse velocità, con un indice di correlazione di $r=0.839$ per velocità che si aggirano intorno ai $1.2 \text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$, mentre aumentando la velocità questa correlazione diminuisce ⁽⁸⁾.

Come accennato in precedenza anche il tipo di stile eseguito influisce più o meno positivamente sul dispendio energetico. In alcune ricerche scientifiche si è rilevato come lo stile più economico è sicuramente lo stile libero, seguito subito dopo dal dorso. La rana presenta invece una particolarità, ha infatti un costo energetico inferiore allo stile libero per le basse velocità, mentre sale notevolmente, superando anche quello del delfino per velocità maggiori. Il costo energetico del delfino è superiore a quello del dorso e dello stile ^(9, 10).

energetic of swimming at maximal speed in humans



Nella nuotata la forza che si oppone maggiormente al movimento è la resistenza dell'acqua, con un valore che è circa 800 volte superiore a quella dell'aria ($1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ per l'acqua contro $1,27 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ d'aria).

Questa resistenza o forza viene anche chiamata Drag. Il Drag è il fattore prevalente nella formazione di un regime turbolento dietro al nuotatore.

Il primo autore che parlò di Drag fu Amar nel 1920 ^(11, 12), che mise in relazione la forza frenante con la velocità del nuotatore con la seguente legge:

$$F_d = K \cdot v^2$$

K è una costante che incorpora la densità dell'acqua, il coefficiente di drag e l'area frontale del nuotatore, v è la velocità del nuotatore, F_d è il Drag.

Amar trovò che il valore di K era approssimativamente 29.

Il Drag generalmente viene suddiviso in Drag attivo, cioè quello generato dallo spostamento del nuotatore durante la nuotata, e in Drag passivo, determinato dalla forza necessaria a trainare un soggetto immobile in acqua, a velocità costante ^(12, 13).

Generalmente il Drag passivo viene messo in relazione con la capacità di scivolamento del nuotatore dopo il tuffo o in uscita dalla virata.

La misurazione del Drag, soprattutto per quello attivo, non è di semplice realizzazione, ed in definitiva fino ad oggi si è riusciti solo a proporre una stima approssimativa.

Hollander e collaboratori ^(14, 12) elaborarono un sistema di misurazione del Drag attivo (M.A.D. system) che consentiva al nuotatore di appoggiare la mano durante la nuotata su delle piattaforme dinamometriche, che rilevavano la forza impressa. Dalla

risultante della forza con la velocità di percorrenza del nuotatore venne quantificato che il valore di K è 30 per gli uomini e 24 per le donne.

La conoscenza e la valutazione del Drag è importante perché chiarisce e quantifica il rendimento del nuotatore. Infatti conoscendo il valore del Drag ed il dispendio energetico ($E = C \cdot v$) corrispondente, è possibile calcolare il rendimento (η) utilizzando questa semplice equazione:

$$\eta = \frac{w_e}{E} = \frac{D \cdot v}{E}$$

(w_e è il lavoro esterno; in questa equazione il rendimento è comunque sottostimato, in quanto viene trascurato il lavoro interno w_i).

Il rendimento nel nuoto varia dal 4 all'8% in funzione della velocità di percorrenza.

Se si paragona questo valore con il rendimento della corsa che è di circa il 26%, si capisce bene come l'uomo non sia un animale acquatico.

Di recente è stato proposto un metodo per la stima dell'efficienza propulsiva utilizzando dei parametri molto più semplici da rilevare come la velocità di percorrenza del nuotatore (v) e la velocità di rotazione degli arti superiori rispetto al centro di massa (u), che sottolinea inoltre come l'efficienza di propulsione sia anche influenzata dalla distanza media spalla-mano durante la passata subacquea ⁽¹⁵⁾.

Altri due parametri molto importanti sono la frequenza e l'ampiezza della bracciata, dipendenti dalle caratteristiche antropometriche, condizionali e tecniche del nuotatore.

La frequenza rappresenta il numero di bracciate effettuate in relazione con il tempo, infatti è generalmente espressa in cicli/min o cicli/sec.

L'ampiezza si ottiene dividendo i metri percorsi per il numero di bracciate effettuate.

È fondamentale la forza che lega la frequenza e l'ampiezza con la velocità del nuotatore, infatti la velocità può calcolarsi secondo la seguente formula: $V = F \cdot A$, dove F è la frequenza e A l'ampiezza della bracciata ⁽¹⁶⁾.

La prima ricerca pubblicata sull'argomento è di East ^(14, 17) che definì i valori di frequenza e ampiezza filmando le diverse specialità sulla distanza delle 100 yard.

Particolarmente interessante è poi la ricerca di Wakayoshi ^(18, 17) soprattutto per i particolari risvolti applicativi. In un test a carichi crescenti egli ha individuato il momento di "rottura" dei parametri fisiologici di soglia. Con la richiesta di un incremento della velocità, incrementano anche la frequenza e l'ampiezza della bracciata fino a un punto in cui le ampiezze rimangono costanti, per poi incominciare a diminuire. All'incirca nelle stesse velocità anche i consumi metabolici registrano un trend di incremento superiore con evidenti segnali di passaggio di soglia.

Questo punto può non evidenziarsi in maniera così netta in tutti i nuotatori ma comunque nell'ambito di un continuo decremento della ampiezza.

In questi ultimi anni sono stati fatti molti studi per stabilire come poter aumentare la velocità del nuotatore basando principalmente l'allenamento sullo studio dei due parametri. È stato messo in evidenza come l'ampiezza della bracciata sia strettamente legata alla quantità di forza posseduta ed alle caratteristiche antropometriche, mentre la frequenza sia soprattutto legata a fattori energetici.

Generalmente alcuni parametri fisiologici come il massimo consumo di ossigeno (VO_{2max}), la frequenza cardiaca (HR), e la soglia anaerobica (AT) vengono utilizzati

per poter valutare le capacità di performance dell'atleta e per poter valutare meglio la progressione e la direzione del condizionamento causato dall'allenamento. Tuttavia, tali misure per poter avere una corrispondenza con ciò che realmente accade all'interno dell'organismo umano, hanno la necessità di essere eseguite in condizioni simili a quelle vissute dagli atleti durante gli allenamenti o le gare vere e proprie e la loro rilevazione deve avvenire attraverso l'utilizzo di ergometri specifici al gesto preso in considerazione, altrimenti i risultati possono essere fuorvianti. Tale ipotesi è particolarmente critica nel nuoto, dove l'ambiente acquatico rende sicuramente più complesso il rilevamento dei parametri fisiologici, e generalmente vi è la necessità di ricorrere ad apparecchiature create appositamente per resistere all'immersione, in quanto i test di laboratorio standard e maggiormente utilizzati nel campo della ricerca scientifica per la misurazione della capacità di lavoro sono il ciclo-ergometro, il tapis roulant, e il braccio-manovella, i quali oltre a non poter essere sicuramente utilizzabili in piscina, impongono movimenti che non sono correlate al nuoto. Per la misurazione del consumo di ossigeno (VO_2) nel nuoto di superficie sono stati sviluppati alcuni metodi:

- l'uso del sacchetto Douglas per la raccolta del gas espirato, valutando successivamente il VO_2 ^(19, 20, 21, 22, 23);
- Calcolo del VO_2 attraverso l'uso della back-extrapolation ^(24, 8, 7);
- e infine, recentemente, l'uso di boccagli respiratori disponibili in commercio in grado di potersi connettere con i sistemi di valutazione metabolimetrica portatili, in grado così di poter calcolare il VO_2 insieme

ad altri parametri respiratori come la ventilazione polmonare (VE) e la produzione di anidride carbonica (VCO_2) durante l'esecuzione del test (25, 26).

Attualmente, quest'ultimo metodo è probabilmente il più affidabile e comodo per nuotatori rispetto al metodo Douglas e la back-estrapolazione. Infatti il primo metodo ha come svantaggio sia l'ingombro del sacchetto stesso sia la difficoltà da parte dell'atleta di indossare l'apparato di raccolta dei gas. Il secondo metodo, trattandosi di un metodo indiretto, è sicuramente il meno accurato rispetto agli altri due.

Nel recente passato le poche ricerche che si sono concentrate sui metodi di valutazione fisica hanno riportato valori contrastanti.

I primi risultati su nuotatori esperti hanno evidenziato che il VO_{2max} durante il nuoto era simile o inferiore rispetto alla marcia (27, 19, 20). Inoltre, è stato trovato sui triatleti un valore di VO_{2max} più elevato sia in fase di ciclismo che di corsa rispetto alla fase di nuoto (28, 29), mentre queste differenze non erano presenti nei nuotatori (26). Inoltre, al meglio delle nostre conoscenze, nessuno ha finora valutato la specificità della misura di scambi gassosi nei nuotatori utilizzando il metodo con il boccaglio. In particolare, in nessuna ricerca si è messo a confronto la risposta del VO_2 nei nuotatori valutata con procedure standard di laboratorio, come il ciclo-ergometria, tapis roulant, e il braccio-manovella, rispetto all'andamento del VO_2 valutato direttamente sul campo. Data la relativa novità del dispositivo snorkel ed i risultati contrastanti derivanti dalla letteratura, l'obiettivo posto dalla presente tesi è stato quello di determinare se e quali

esami di laboratorio non specifici portino a risultati simili a quelli ottenuti dal test del nuoto specifico.

Materiali e metodi

Protocollo di studio.

La prima fase sperimentale (fase in laboratorio) si è svolta presso il laboratorio di Medicina dello Sport del Dipartimento di Scienze Mediche dell'Università degli studi di Cagliari, presso il Centro Universitario Sportivo "Sa Duchessa", mentre la seconda fase sperimentale si è svolta in piscina.

Ciascun soggetto ha eseguito il seguente protocollo di studio:

1) Fase in laboratorio:

prevedeva l'esecuzione di tre differenti test incrementali di tipo triangolare ad esaurimento con monitoraggio continuo dell'attività cardiaca e degli scambi gassosi:

- Test al cicloergometro a freno elettromagnetico (Tunturi EL 400, Finland); i carichi somministrati erano di $30\text{W}\cdot\text{min}^{-1}$, con partenza a $40\text{W}\cdot\text{min}^{-1}$ e una frequenza di pedalata di 60 rpm .
- Test al nastro trasportatore (Runrace, Technogym, Forlì, Italy); il test incrementale era progettato con incrementi di velocità di $1\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ogni minuto, con partenza da $5\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ e con una pendenza del 1%

- Test al armcrank (Tecnogym XTPRO/TOP600); i carichi somministrati erano di $10\text{W}\cdot\text{min}^{-1}$ con partenza da $20\text{W}\cdot\text{min}^{-1}$.

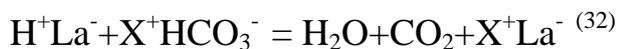
Tutti i test erano preceduti da tre minuti di campionamento in condizioni di riposo, e seguiti da cinque minuti di campionamento di recupero passivo.

Durante tutta la durata della prova il soggetto era connesso con un sistema metabolimetrico modello VO2000 prodotto dalla ditta Med Graphics. Tale strumento è costituito da una unità principale dove sono localizzate le unità di analisi dei gas; l'analisi dell'ossigeno viene eseguita per mezzo di una cella galvanica e l'analisi della CO_2 con sistema NDIR (Non-Dispersive InfraRed). La raccolta dei gas respiratori avviene attraverso una maschera posizionata sul volto del soggetto tra bocca e naso, a cui è applicato un pneumotacografo PreVentTM (Range: ± 18 L/sec, Accuratezza: $\pm 3\%$ o 50 ml) ⁽³⁰⁾. Il pneumotacografo viene collegato con l'unità di analisi tramite una linea di campionamento che utilizza un dispositivo di flusso a pressione differenziale bidirezionale che trasmette i flussi d'aria; l'ombelicale è costituito da tre vie, una diretta all'analizzatore dell' O_2 , una all'analizzatore per la CO_2 , e una via dedicata alla determinazione della ventilazione. Il VO2000 inoltre è in grado di rilevare la frequenza cardiaca tramite un sistema di rilevazione a fascia toracica tipo Polar. L'apparecchiatura è quindi in grado di misurare e registrare su supporto informatico in modalità "respiro per respiro" i seguenti parametri:

- ✓ Frequenza cardiaca (FC);
- ✓ Consumo d'ossigeno (VO_2);
- ✓ Produzione d'anidride carbonica (VCO_2);

- ✓ Ventilazione polmonare (V_e);
- ✓ Quoziente respiratorio (QR);
- ✓ Equivalente ventilatorio per l'ossigeno (V_e/V_{O_2});

Il QR è il rapporto tra V_{CO_2}/V_{O_2} , cioè il rapporto tra il volume di anidride carbonica prodotta ed il volume di ossigeno consumato. Un suo aumento durante l'esercizio fisico è da mettere in relazione con un accumulo d'acido lattico ⁽³¹⁾. In particolare, quando il QR supera il valore di 1 vi è sicuramente un accumulo ematico di tale metabolita, in quanto si viene a generare un eccesso di CO_2 che deriva dall'attività dei sistemi tampone ematici che contrastano l'eccesso di ioni H^+ provocato dall'accumulo di lattato che viene riversato in circolo. Infatti nel plasma i bicarbonati reagiscono con gli ioni H^+ secondo la seguente reazione chimica:



generando così un eccesso di CO_2 che viene eliminato con la respirazione e viene a sovrapporsi a quello normalmente prodotto dal metabolismo cellulare ⁽³³⁾.

Dal canto suo l'equivalente ventilatorio per l'ossigeno (V_e/V_{O_2}) è un indice altamente affidabile per il calcolo della soglia anaerobica (SA) ⁽³⁴⁾. Infatti un suo incremento durante carichi lavorativi incrementali è altamente correlato con l'accumulo di lattato nel sangue. In pratica, durante un test incrementale come quello da noi praticato, si individua il punto in cui tale variabile mostra un incremento, e tale punto corrisponde alla SA.

2) *Fase in piscina:*

Il test in piscina si è svolto in vasca coperta di 25 metri in condizioni ambientali controllate, con temperatura media dell'acqua di 27°C.

Il nuotatore durante il test era vincolato, tramite cintura posizionata all'addome, ad un elastico fissato all'altra estremità con il blocco di partenza della corsia della piscina.

La tensione dell'elastico era tarata mediante un dinamometro (PCE-FM1000). Tale apparecchiatura è dotata di interfaccia software per l'elaborazione su computer. Il campo di misura dello strumento è compreso tra 0 - 100 kg (0 - 981 N), con una risoluzione di 0,05 kg / 0,2 N, e precisione $\pm 0,5 \%$ (± 5 N).

La tensione dell'elastico era quindi costantemente monitorata sul display del dinamometro, e questo permetteva di fornire un feed-back vocale all'atleta. In pratica ogni minuto veniva richiesto all'atleta di incrementare il suo sforzo in modo da allungare l'elastico di una quantità tale da generare un incremento di carico di 1 kg. In tal modo abbiamo costruito un test incrementale con incrementi del carico lavorativo pari ad $1 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$.

L'atleta veniva istruito a nuotare seguendo un senale colorato posto davanti e in profondità. Lo spostamento di tale segnale veniva controllato da un operatore posto fuor dalla vasca. Questo consentiva di aggiustare il carico lavorativo costantemente in funzione dei dati rilevati dal dinamometro.

La partenza del test era fissata a 3 kg e incrementata progressivamente di $1 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$.

Tale metodologia consentiva quindi di costruire una “curva di carico” partendo dal punto di riposo del sistema elastico sino al punto di massima distensione sopportabile

dal soggetto. Si aveva così un test incrementale triangolare in vasca del tutto simile per metodologia al test in laboratorio.

Durante il test in piscina il nuotatore era connesso al sistema metabolimetrico VO2000 tramite un sistema snorkel adattato ad un boccaglio con ridotto spazio morto, avente un volume di circa 200cc.

La fase di raccolta dati in piscina è stata preceduta da una fase di valutazione in laboratorio del sistema snorkel per verificare l'incidenza dell'aumentato spazio morto sui parametri ventilatori.

Infatti, il dispositivo snorkel viene a costituire un'estensione artificiale delle vie aeree superiori dell'atleta; questo fa sì che si abbia un aumento fisiologico dell'impegno della muscolatura respiratoria che dovrà esprimere delle pressioni negative superiori per riuscire a raggiungere una adeguata ventilazione polmonare ⁽³⁵⁾.

Soggetti.

Sono stati studiati 12 soggetti maschi, i cui valori medi \pm deviazione standard (DS) di età, peso e altezza erano 19.25 ± 2.8 anni, 68.91 ± 5.7 Kg, e 177.3 ± 6.1 rispettivamente (Tab. 1). Tutti i soggetti erano agonisti e regolarmente coinvolti in competizioni a livello regionale e/o nazionale ed si allenavano per una media di 10-12 ore per settimana.

Tutti erano stati precedentemente giudicati idonei alla pratica dell'attività sportiva agonistica e sono stati sottoposti ad anamnesi ed esame medico per poter escludere eventuali controindicazioni alla partecipazione al protocollo.

I partecipanti hanno fornito il loro consenso informato a prendere parte allo studio ed il protocollo è stato approvato dal comitato etico locale.

Analisi dei dati

I vari parametri fisiologici studiati a riposo, durante l'esercizio ed al recupero nei test in laboratorio e piscina sono stati mediati per un minuto. Le risposte sono espresse come % del carico lavorativo massimo raggiunto nei test. I valori medi \pm DS sono stati utilizzati per il calcolo statistico. La comparazione tra i test è stata eseguita utilizzando l'analisi della varianza a una via per misure ripetute (ANOVA). La significatività statistica è stata assunta per un livello di $P < 0.05$ in tutti i casi. Per la comparazione tra i test è stato inoltre utilizzato il test per le comparazioni multiple di

Newman – Keuls. La significatività statistica è stata assunta per un livello di $P < 0.05$ in tutti i casi. L'analisi statistica è stata effettuata utilizzando un software disponibile in commercio (Graph-Pad Prism). Per la valutazione della corrispondenza tra il test in piscina e quelli eseguiti in laboratorio è stata effettuata l'analisi statistica di Bland ed Altman.

Risultati

I massimi carichi lavorativi raggiunti nei test sono stati di 312.5 (DS ± 9.3) $W \cdot \text{min}^{-1}$ al cicloergometro, 15.2 (DS ± 0.4) $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ al nastro trasportatore, 90.1 (DS ± 10.1) $W \cdot \text{min}^{-1}$ all'armcrank, e 8.9 (DS ± 0.3) $\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$ nel nuoto.

La comparazione statistica della FC e delle variabili metaboliche ha evidenziato differenze significative nelle differenti condizioni di studio (laboratorio e piscina). Tale andamento è descritto nelle figure da 1 a 6.

La figura 7a mostra il $\text{VO}_{2\text{max}}$ in laboratorio ed in piscina. Tale parametro (espresso in $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$) raggiungeva in laboratorio il valore medio di 3239 (DS ± 307.6), 3719 (DS ± 514.6), 3208 (DS ± 355.8), rispettivamente al cicloergometro, al nastro trasportatore e all'armcrank, mentre nel nuoto di 3625 (DS ± 371.9). L'analisi statistica ha evidenziato una differenza significativa tra due gruppi di test, il nuoto e il nastro trasportatore contro il cicloergometro e l'armcrank, con un valore di $P < 0.001$. Non vi è differenza significativa tra nuoto e nastro trasportatore, e tra cicloergometro e l'armcrank. La figura 7b mostra l'analisi statistica di Bland ed Altman che evidenzia come i limiti di confidenza tra il test eseguito in piscina rispetto a quelli di laboratorio

siano: +1117 e -1367 al nastrotrasportatore, +1012 e -241 al cicloergometro, +1212 e -380 mL•min⁻¹ all'armcrank.

La massima frequenza cardiaca (bpm) rilevata nei test (fig. 8a) raggiungeva il valore medio di 177 (DS ±8.4) al cicloergometro, di 189 (DS ±7.3) al nastrotrasportatore, di 183 (DS ±6.5) all'armcrank, e di 174 (DS ±8.7) nel nuoto. In questo caso l'analisi statistica ha evidenziato una differenza significativa tra nuoto verso il nastrotrasportatore e cicloergometro per un valore di P <0.001; tra il nuoto verso l'armcrank per un valore di P <0.01; ha inoltre evidenziato una differenza significativa anche tra cicloergometro verso l'armcrank (P <0.05); non vi è differenza significativa tra il nuoto vs cicloergometro e tra l'armcrank vs nastro trasportatore. La figura 8b mostra l'analisi statistica di Bland ed Altman che evidenzia come i limiti di confidenza tra il test eseguito in piscina rispetto a quelli di laboratorio siano: +2.66 e -32.2 al nastrotrasportatore, +17.7 e -24.9 al cicloergometro, +4.29 e -23.3 bpm all'armcrank.

La soglia anaerobica (SA) (fig. 9a) è stata calcolata per un % del carico lavorativo al 64.64 (DS ±9.2) al cicloergometro, al 65.6 (DS ±13.2) al nastrotrasportatore, al 69.5 (DS ±7.2) all'armcrank e 82.3 (DS ±14.1) nel nuoto. In questo caso vi è una differenza significativa tra il nuoto verso il cicloergometro e il nastro trasportatore (P <0.001) e tra il nuoto verso l'armcrank (P<0.01); non vi è differenza significativa tra i test eseguiti in laboratorio. La figura 9b mostra l'analisi statistica di Bland ed Altman che evidenzia come i limiti di confidenza tra il test eseguito in piscina rispetto

a quelli di laboratorio siano: +45.5 e -12.4, +43.4 e -8.1, +41.9 e -16.3 % del W_{\max} rispettivamente al nastrotrasportatore al cicloergometro e all'armcrank.

La FC alla SA (bpm) (fig. 10a) era di 149.3 (DS \pm 9) al cicloergometro, di 170.9 (DS \pm 9.2) al nastro trasportatore, di 160.6 (DS \pm 9.4) all'armcrank e di 163.1 (DS \pm 10) nel nuoto. Vi è una differenza significativa tra il cicloergometro vs nuoto e nastro trasportatore ($P < 0.001$), tra il cicloergometro e l'armcrank ($P < 0.01$), tra il nastrotrasportatore verso il nuoto e l'armcrank ($P < 0.05$).

Il VO_2 alla SA (fig. 10b) espresso in $ml \cdot min^{-1}$ era di 2130 (DS \pm 184) al cicloergometro, di 3051 (DS \pm 367) al nastro trasportatore, di 2049 (DS \pm 288) all'armcrank e di 3197 (DS \pm 510) nel nuoto. Vi è una differenza significativa tra nuoto e nastro trasportatore verso il cicloergometro e l'armcrank ($P < 0.001$).

Discussione

Lo scopo di questo studio era quello di verificare se dei test aspecifici condotti in laboratorio fossero assimilabili nei risultati ad un test specifico per il nuoto condotto in piscina.

Dall'analisi statistica si è riscontrato che il test eseguito al Nastrotrasportatore è sovrapponibile come risultati al test condotto in piscina nella misura del VO_{2max} , mentre vi è una differenza significativa fra questi due test e quelli condotti con il cicloergometro e l'armcranck. Anche i risultati di questi ultimi due test sono sovrapponibili tra loro, ma la loro esecuzione non consente ai nuotatori di raggiungere i valori di VO_{2max} ottenuti con il test eseguito in piscina e con il nastro trasportatore, per una differenza del 15% circa.

La nostra ipotesi è che la differenza tra i risultati sia da ricondurre alla quantità di masse muscolari reclutate nell'esecuzione dei test.

La segmentazione muscolare che deriva dall'esecuzione dei test al cicloergometro e all'armcranck non consente di raggiungere valori elevati nella valutazione del VO_{2max} . Da questo si può trarre un'altra conclusione, molto più pratica. Negli allenamenti in piscina si utilizzano spesso esercitazioni che prevedono l'uso solo degli arti superiori o solo di quelli inferiori. In queste esercitazioni si può prevedere infatti lo stesso comportamento del VO_2 rispetto al cicloergometro e all'armcranck. Da questo possiamo trarre la conclusione che l'esecuzione di tutte le esercitazioni

volte al miglioramento del VO_{2max} dovrebbero essere condotte evitando di utilizzare solo determinati distretti muscolari.

Una differenza ancora più marcata l'abbiamo nel VO_2 alla soglia anaerobica. Differenza che è nell'ordine del 25% circa tra il nuoto e il nastro trasportatore contro il cicloergometro e l'armcranck.

Una differenza significativa tra il nuoto e i test eseguiti in laboratorio si ha quando identifichiamo la soglia anaerobica rispetto al % di carico lavorativo raggiunto. In questo caso il gesto tecnico ha avuto la sua importanza, consentendo agli atleti di poter raggiungere i valori di soglia anaerobica a circa il 65% nei test eseguiti in laboratorio e l'80% nel nuoto.

La frequenza cardiaca massima è stata rilevata nel test eseguito al Nastrotrasportatore, a seguire all'armcranck, al Nastrotrasportatore ed infine nel nuoto. Questi dati confermano ciò che è scritto in letteratura ⁽⁵⁾. Infatti la frequenza cardiaca massima in acqua è in media di 7 battiti inferiore rispetto a quella rilevata sulla terra. Questo è dipeso dalla presenza dell'acqua, dal galleggiamento del corpo, e dal fatto che il nuoto si esegue in decubito, questi fattori determinano un miglior ritorno venoso del sangue al cuore determinando una maggiore efficienza del sistema cardiocircolatorio a frequenze cardiache inferiori.

Anche la FC alla soglia era superiore al Nastrotrasportatore rispetto a tutti gli altri test, mentre in questo caso quella più bassa è stata riscontrata al cicloergometro.

Da questi dati se ne deduce che i differenti tipi di test non sono interscambiabili nella misura del massimo consumo di ossigeno, della soglia anaerobica e la relativa

frequenza cardiaca nei nuotatori. Nella valutazione funzionale del nuoto vi è quindi l'esigenza di usare dei test specifici, con l'atleta che compia il suo gesto specifico nell'ambiente a lui congeniale, cioè la piscina. I test aspecifici, come i test da noi utilizzati, sono evidentemente poco simili al gesto atletico proprio di uno sport come il nuoto, e sono, a nostro avviso, utili solo come strumenti per la valutazione dello stato di salute dell'atleta, o al limite per dare un giudizio del tutto aspecifico sullo stato cardiometabolico dell'individuo.

Un'ultima considerazione riguarda la fattibilità del test in piscina da noi proposto. La sua utilizzazione dipende dalla possibilità di utilizzo di un metabolometro e di un dinamometro portatile, il cui costo non è trascurabile. Tali attrezzature sono evidentemente acquistabili solo da strutture che abbiano la possibilità di avere un ritorno economico oppure scientifico (come nel nostro caso). Tuttavia, a parte i problemi correlati con l'economicità dell'apparecchiatura, il test risulta facilmente attuabile, con minimo disagio da parte dell'atleta e limitato impegno temporale da parte degli operatori.

In conclusione, il nostro studio ha messo in evidenza come per la valutazione funzionale del nuoto sia raccomandabile l'utilizzo di test specifici che valutino l'atleta nel suo ambiente naturale mentre compie il suo gesto specifico.

Si ringraziano per la collaborazione e per l'impegno tutti gli atleti che hanno reso possibile questa ricerca, i tecnici Marco Cara, Corrado Sorrentino, Cesare Floris e le società sportive Atlantide Elmas, Rari Nantes Cagliari e l'Esperia Cagliari.

Tabelle e Grafici

Tab. 1. Nella tabella è descritto il gruppo degli atleti studiati

N°	ETA'	PESO	ALTEZZA
1	23	71	179
2	24	74	185
3	18	70	177
4	15	71	176
5	16	69	165
6	19	65	170
7	18	73	182
8	20	75	187
9	19	65	175
10	23	74	180
11	18	55	174
12	18	65	178
MEDIA	19,25	68,91667	177,3333
DEV.ST	2,800162	5,680242	6,095204

Figura 1. Andamento dei valori di frequenza cardiaca (FC) nelle quattro condizioni di lavoro. In ascissa è indicato il carico lavorativo espresso in percentuale del massimo carico lavorativo; in ordinata sono indicati i valori di frequenza cardiaca.

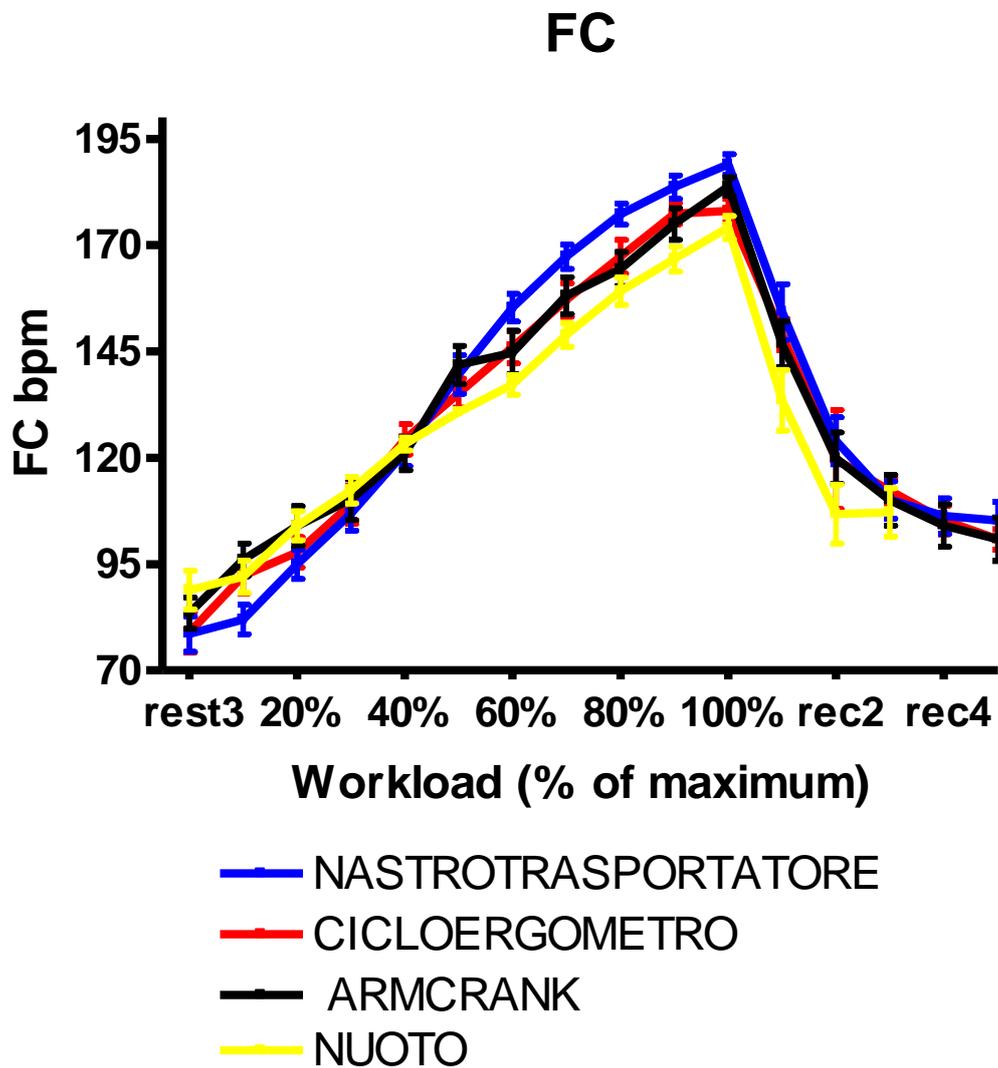


Figura 2. Andamento dei valori del consumo di ossigeno VO_2 nelle quattro condizioni di lavoro. In ascissa è indicato il carico lavorativo espresso in percentuale del massimo carico lavorativo; in ordinata sono indicati i valori del consumo di O_2 .

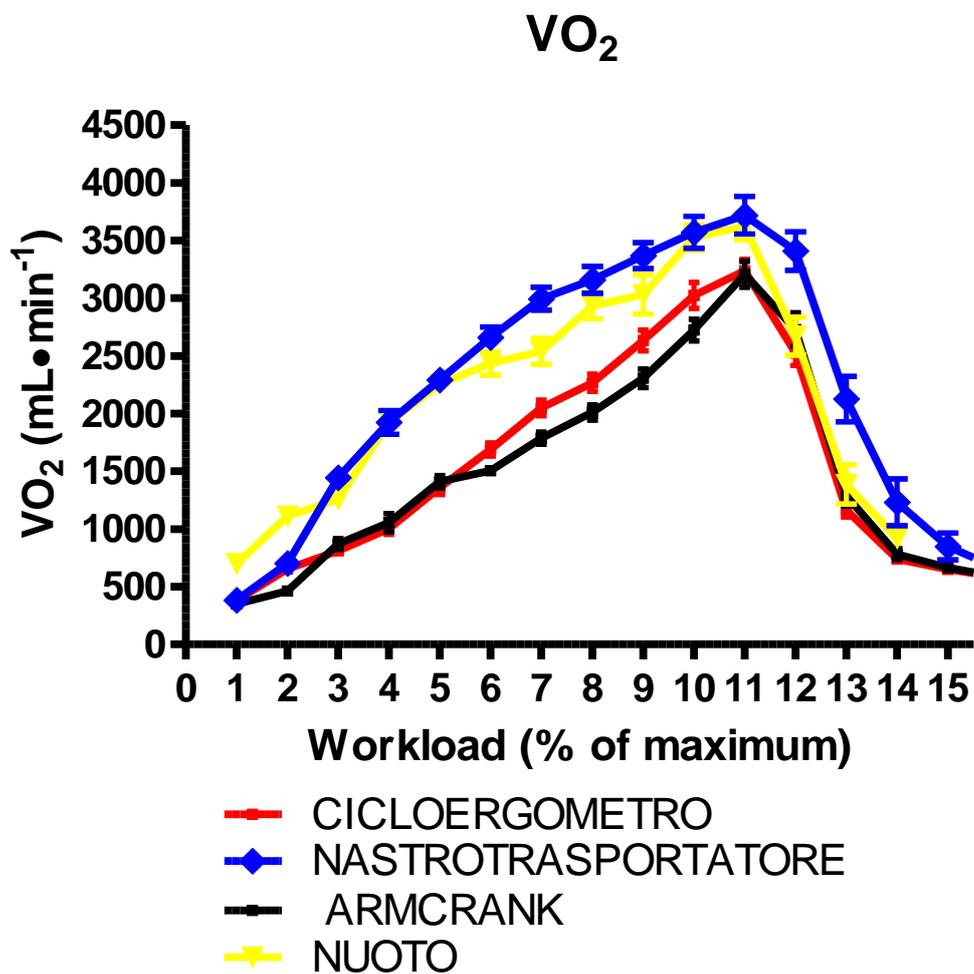


Figura 3. Andamento della produzione di anidride carbonica VCO_2 nelle quattro condizioni di lavoro. In ascissa è indicato il carico lavorativo espresso in percentuale del massimo carico lavorativo; in ordinata sono indicati i valori della VCO_2 .

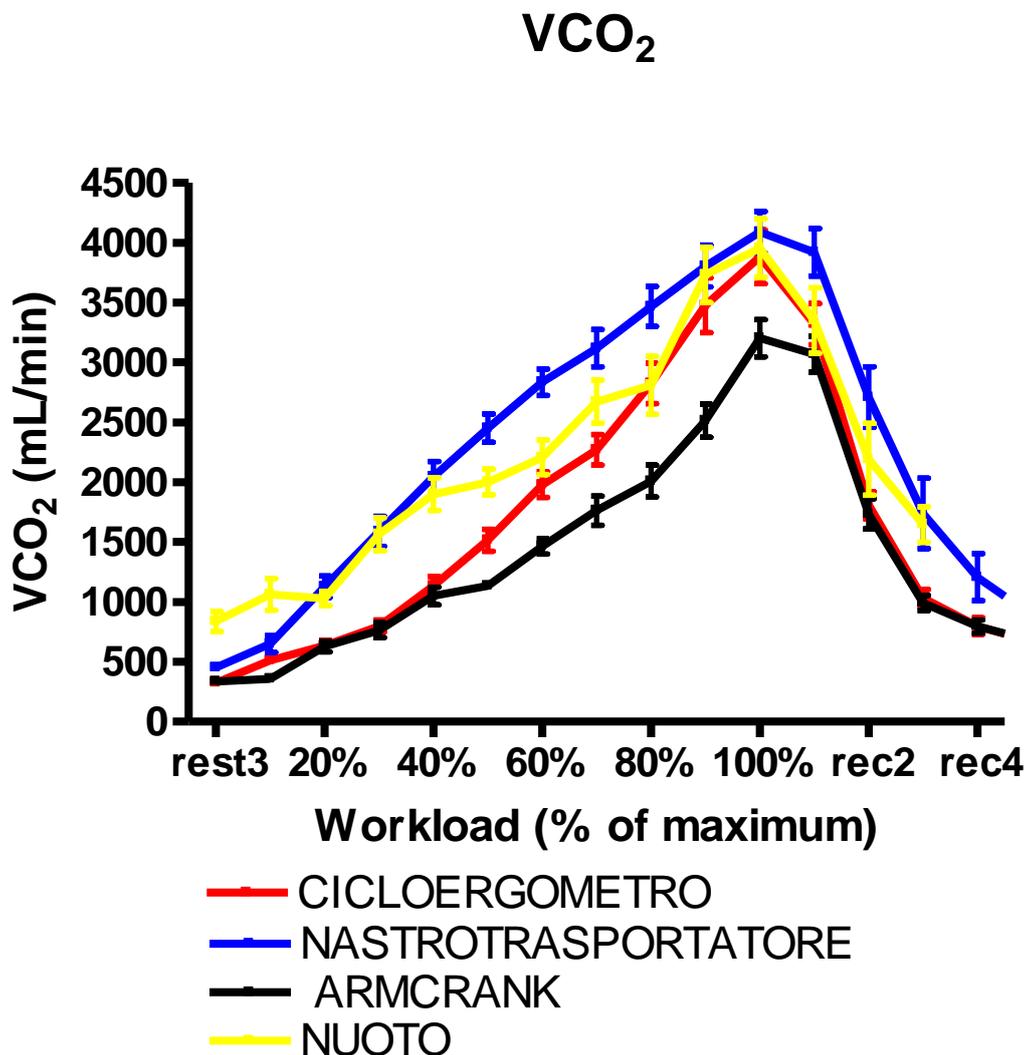


Figura 4. Andamento della ventilazione V_e nelle due condizioni di lavoro. In ascissa è indicato il carico lavorativo espresso in percentuale del massimo carico lavorativo; in ordinata sono indicati i valori della V_e .

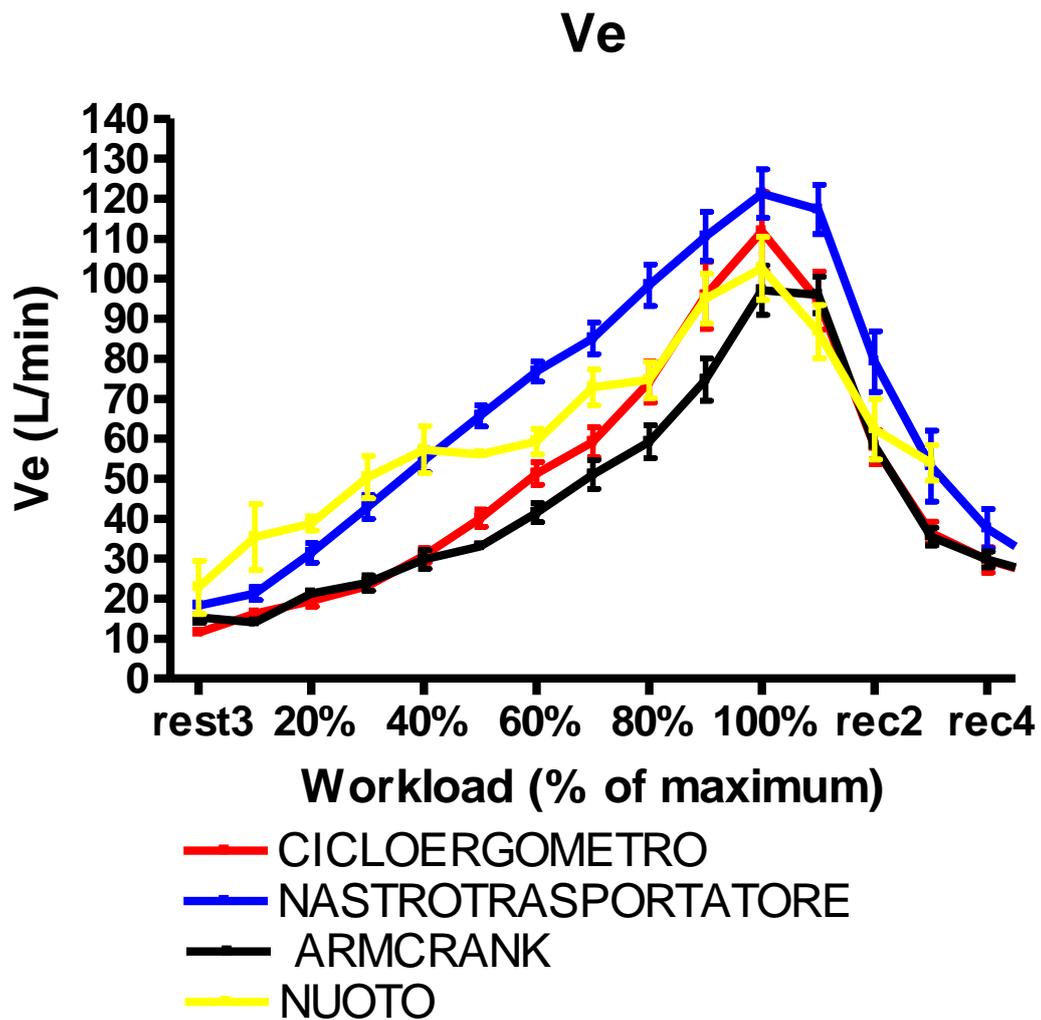


Figura 5. Andamento dei valori del quoziente respiratorio QR nelle quattro condizioni di lavoro. In ascissa è indicato il carico lavorativo espresso in percentuale del massimo carico lavorativo; in ordinata sono indicati i valori di QR.

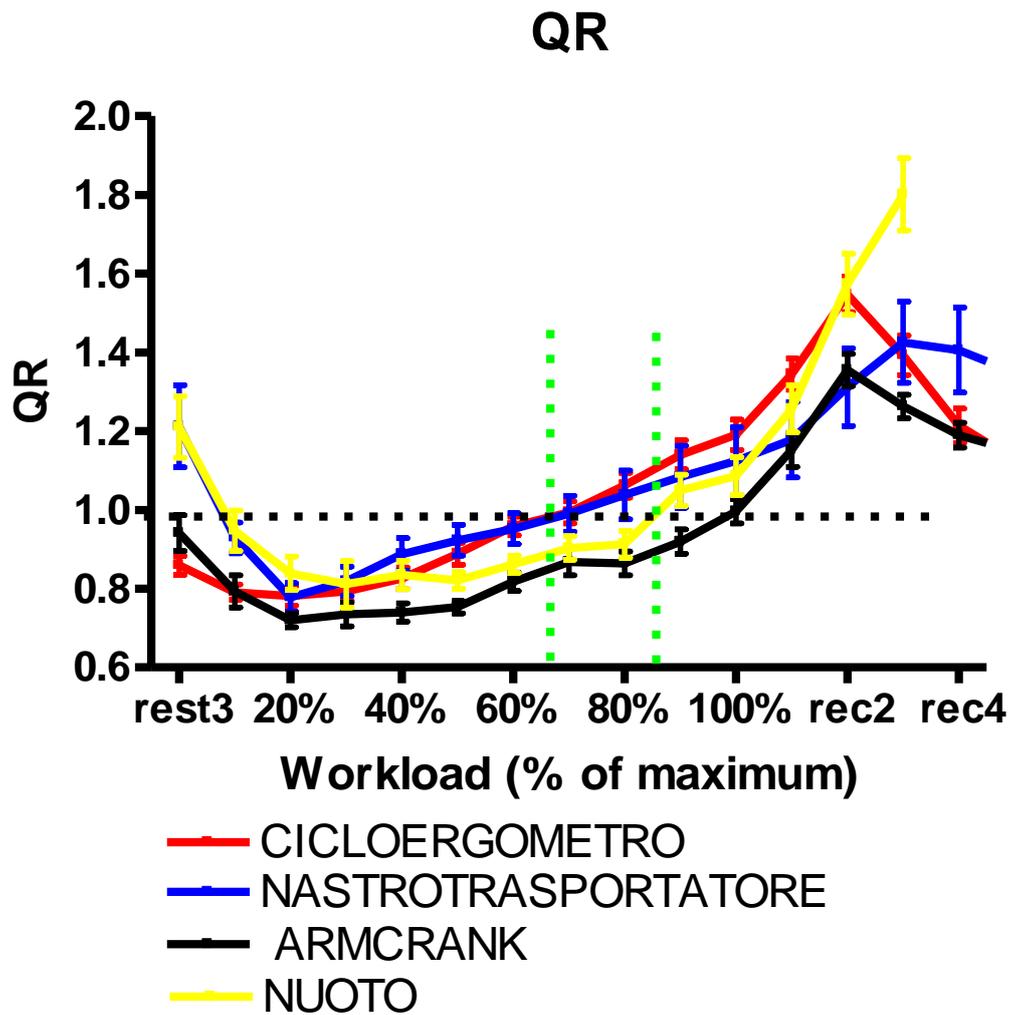


Figura 6. Andamento dei valori dell'equivalente ventilatorio per l'ossigeno VE/VO_2 nelle quattro condizioni di lavoro. In ascissa è indicato il carico lavorativo espresso in percentuale del massimo carico lavorativo; in ordinata sono indicati i valori VE/VO_2 .

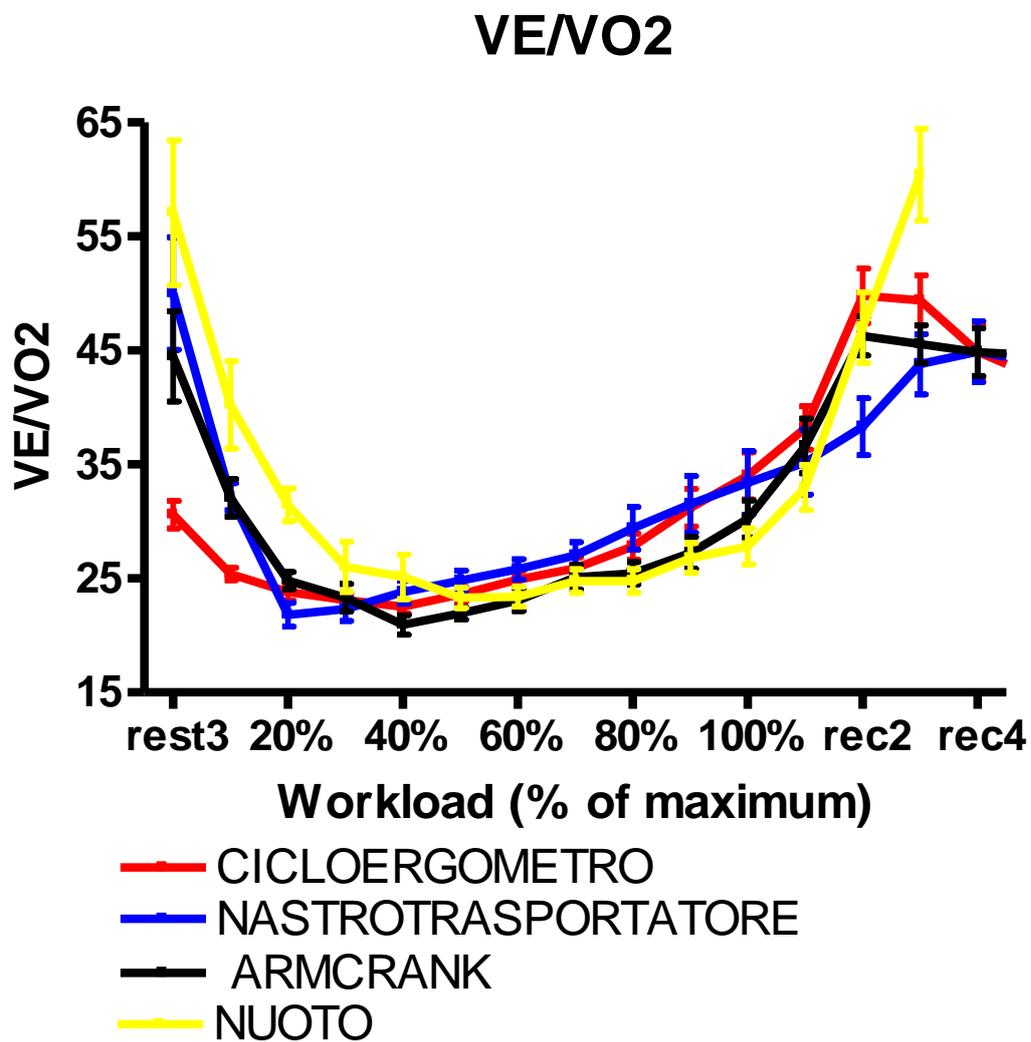


Figura 7. 7a: massimi valori del VO_2 raggiunti nelle quattro condizioni sperimentali. In ascissa sono espressi i valori del VO_2 espressi in $mL \cdot min^{-1}$;
7b: analisi statistica Bland ed Altman.

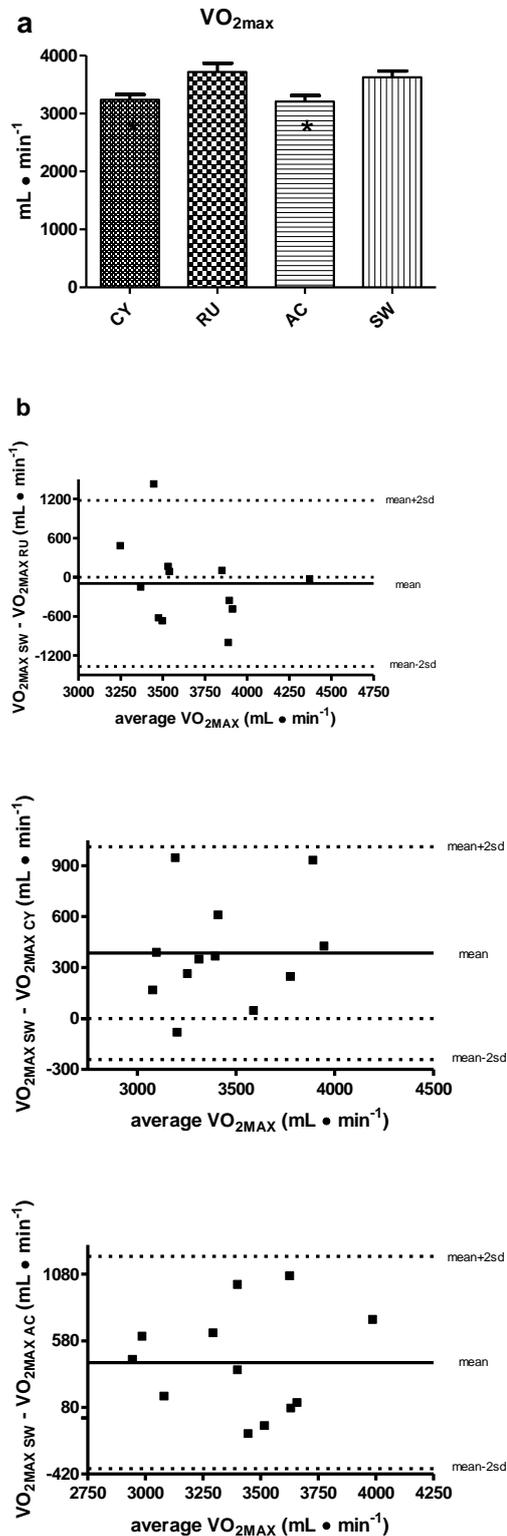


Figura 8. 8a: massimi valori della frequenza cardiaca nelle quattro condizioni sperimentali. In ascissa sono espressi i valori del HR espressi in bpm; **8b:** analisi statistica Bland ed Altman.

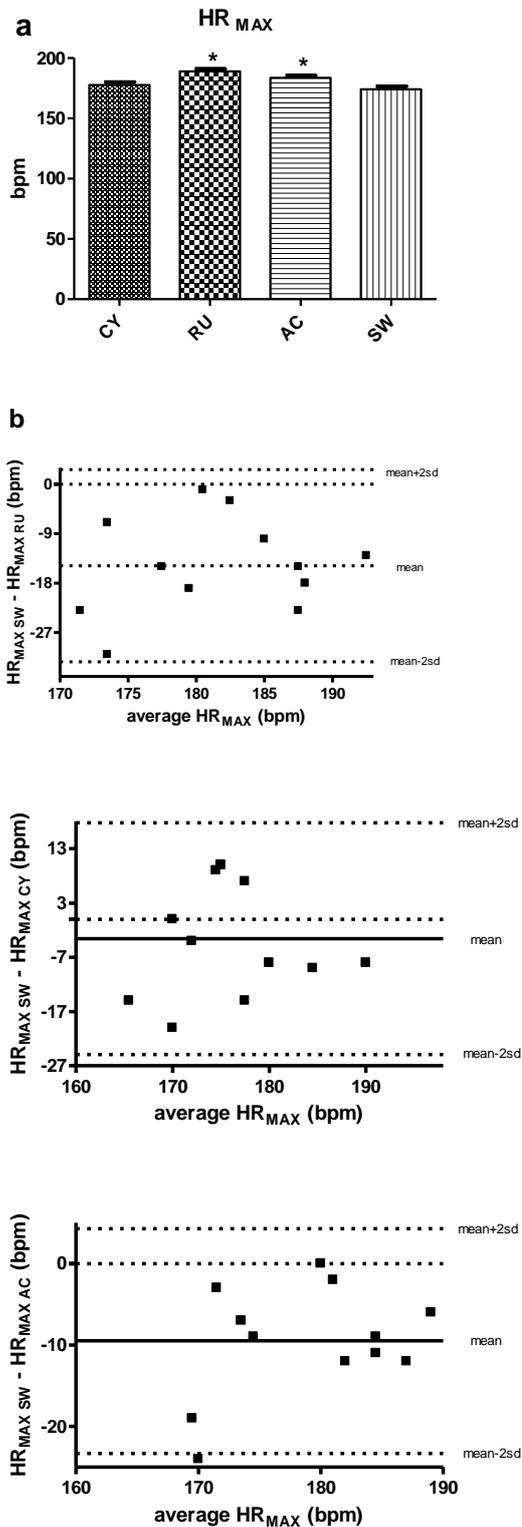


Figura 9. 9a: Soglia Anaerobica espressa in % del massimo carico lavorativo raggiunto nelle quattro condizioni sperimentali. 9b: analisi statistica Bland ed Altman.

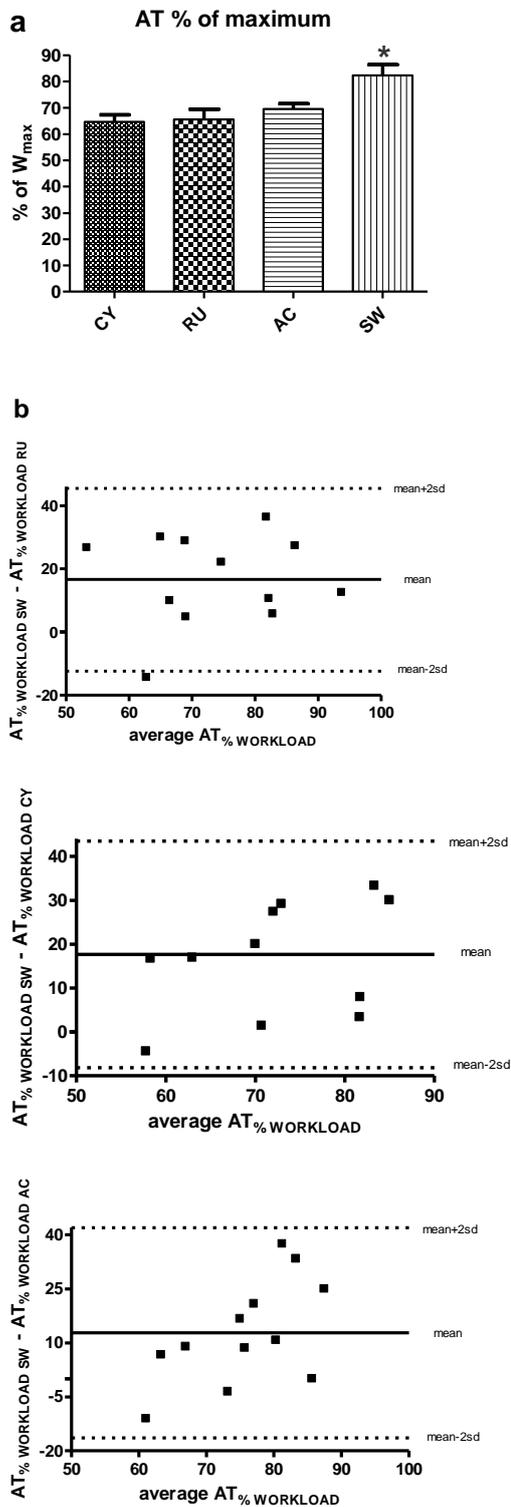
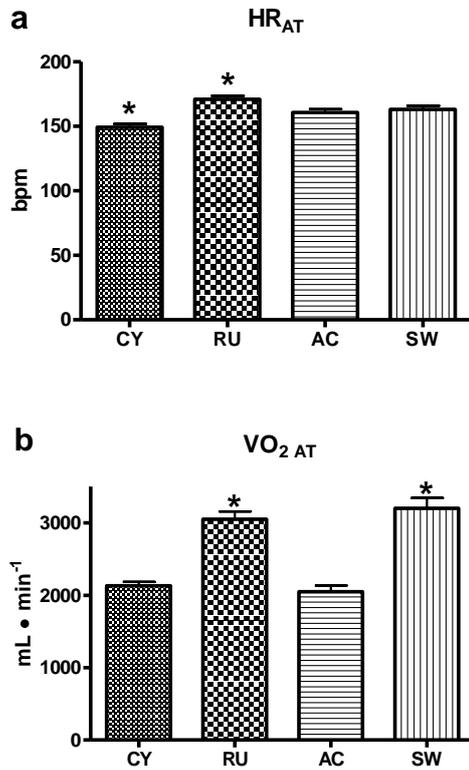


Figura 10. 10a: frequenza cardiaca raggiunta alla soglia anaerobica. In ascissa sono espressi i valori del HR espressi in bpm. 10b: valori del VO_2 raggiunti alla soglia anaerobica.



Bibliografia

1. Counsilman James E., La scienza del nuoto. Zanichelli 1973
2. Counsilman James E, Counsilman Brian, La nuova scienza del nuoto Zanichelli 2005
3. Ferretti I., L'importanza della tecnica, Allenatori di nuoto I livello, 57-90.
4. Invernizzi P., Del Bianco R., Scurati R., Caporaso G., La Torre A., Analisi delle capacità tecnico-coordinative e senso-percettive nel nuoto, Scuola Dello Sport, 2007; 73: 45-52.
5. Holmér I. Swimming physiology. Ann Physiol Anthropol. 1992 May;11(3):269-76.
6. Di Prampero La locomozione umana su terra, in acqua, in aria, edi-ermes 1985.
7. Zamparo P, Bonifazi M, Faina M, Milan A, Sardella F, Schena F, Capelli C. Energy cost of swimming of elite long-distance swimmers. Eur. J. Appl. Physiol. 94: 697-704, 2005.

8. Zamparo P, Capelli C, Cautero M, Di Nino A. Energy cost of front-crawl swimming at supra-maximal speeds and underwater torque in young swimmers. *Eur. J. Appl. Physiol.* 83: 487-491, 2000.
9. Capelli C, Pendergast DR, Termin B. Energetics of swimming at maximal speeds in humans. *Eur. J. Appl. Physiol.* 78: 385-393, 1998.
10. Barbosa TM et al. Evaluation of the energy expenditure in competitive swimming strokes. *Int J Sports Med.* 2006 Nov;27(11):894-9.
11. Amar J. *The human motor.* G. Routledge and son Ltd, London 1920
12. Bonifazi et al. La resistenza idrodinamica in nuotatori di elite. *Annual, la tecnica del nuoto*, 2005: 18-26
13. Harpovich PV. Water resistance in swimming. *Research Quarterly In Sport Sciences* 1933; 4: 21-28.
14. East D.E. *Swimming: An analysis of stroke frequency, stroke length and performance*, *New Zeland J. of health, physical education and recreation*, 1970; 3: 16-27.

15. Zamparo P. et al. L'efficienza di propulsione nello stile libero. Annual, la tecnica del nuoto, 2005; 18-26.
16. Craig AB, Pendergast DR, Relationship of stroke rate and velocity in competition swimming. Med Sci Sports Exerc. 17:625-634, 1979
17. Gatta G. et al. I parametri della bracciata, Annual, la tecnica del nuoto, 2005; 3-9.
18. Wakoyoshi K. et al. Relationship between oxygen uptake, stroke rate and swimming velocity in competitive swimming, International Journal of Sport Medicine, 1995; 15: 19-23.
19. Holmér, I., and Astrand, P. (1972). Swimming training and maximal oxygen uptake. Journal Applied Physiology. 33, 510-513.
20. Holmér, I., Lundin, A., and Eriksson, B. (1974). Maximum oxygen uptake during swimming and running by elite swimmers. Journal Applied Physiology. 36, 711-714.

21. Poujade, B., Hautier, C.A., and Rouard, A. (2002). Determination of the energy cost of front-crawl swimming in children. *European Journal of Applied Physiology*. 87, 1-6.
22. Ribeiro, J.P., Cadavid, E., Baena, J., Monsalvete, E., Barna, A., and De Rose, E.H. (1990). Metabolic predictors of middle-distance swimming performance. *British Journal of Sports Medicine*. 24, 196-200.
23. Smith, D.J., Norris, S.R., and Hogg, J.M. (2002). Performance evaluation of swimmers. *Sports Medicine*. 32, 539-554.
24. Montpetit, R., Léger, L.A., Lavoie, J.M., and Cazorla, G. (1981). $\dot{V}O_2$ peak during free swimming using the backward extrapolation of the O_2 recovery curve. *European Journal of Applied Physiology*. 47, 385-391.
25. Reis, V.M., Marinho, D.A., Barbosa, F.P., Reis, A.M., Guidetti, L., and Silva, A.J. (2010). Examining the accumulated oxygen deficit method in breakstroke swimming. *European Journal of Applied Physiology*. 109, 1129-1135.
26. Roels, B., Schmitt, L., Libicz, S., Bentley, D., Richalet, J-P., and Millet, G. (2005). Specificity of $\dot{V}O_2$ max and the ventilatory threshold in free swimming and cycle ergometry: comparison between triathletes and swimmers. *British Journal of Sports Medicine*. 23, 965-968.

27. Dixon, RW., and Faulkner, J. (1971). Cardiac output during maximum effort running and swimming. *Journal Applied Physiology*. 30, 653-656.
28. Kohrt, WM., Morgan, DW., Bates, B., and Skinner, JS. (1987). Physiological responses of triathletes to maximal swimming, cycling, and running. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 19, 51-55.
29. Kohrt, WM., O'Connor, JS., and Skinner, JS. (1989). Longitudinal assessment of responses by triathletes to swimming, cycling, and running. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 21, 569-575.
30. MedGraphics VO2000 Portable Metabolic System, user manual
31. Beaver WL, Wasserman K, and Whipp BJ. A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange (1986a). *J Appl Physiol* 60: 2020-2027.
32. Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ. Bicarbonate buffering of lactic acid generated during exercise (1986b). *J Appl Physiol* 60: 472-478.

33. Crisafulli A, Tocco F, Pittau G, Caria M, Lorrain L, Melis F, Concu A. Detection of lactate threshold by including haemodynamic and oxygen extraction data. *Physiol. Meas.* 27: 85-97, 2006.
34. Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Whipp BJ, Casaburi R. Measurements during integrative cardiopulmonary exercise testing in: *Principles of exercise testing and interpretation II edition*, pages 52-77, William & Wilkins, 1994.
35. Cerretelli P. *Fisiologia dell'esercizio*. SEU, 2001.