



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA “TOR VERGATA”
Facoltà di Medicina e Chirurgia

Dottorato di Ricerca in Scienze dello Sport XXII ciclo

Tesi di Dottorato in Ricerca

**Valutazione funzionale del nuotatore
d'elite con metabolimetria telemetrica ed
ergometro sport-specifico**

Tutor:
Prof. Stefano D'Ottavio

Dottorando:
Gian Mario Migliaccio

Coordinatore:
Prof. Antonio Lombardo

Anno Accademico
2009/2010

Si ringrazia il Prof. Stefano D'Ottavio per aver compreso e condiviso momenti importanti e per aver sempre incoraggiato la prosecuzione di questo lavoro in questi anni.

Il Prof. Alberto Concu per la grande disponibilità che ha manifestato nei mie confronti in questi anni e per la l'autorizzazione al completo utilizzo delle attrezzature di ricerca, materiali e struttura del laboratorio di Fisiologia dello Sport del Dipartimento di Scienze Applicate ai Biosistemi dell'Università degli studi di Cagliari, presso il Centro Universitario Sportivo "Sa Duchessa".

Il Dott. Raffaele Milia, il Dott. Antonio Crisafulli ed il Dott. Marco Pinna per la loro attiva collaborazione.

I miei figli, Giulia e Nicolas, che mi hanno dato il loro tempo ed il loro affetto per potermi dedicare ad un sogno. Ed a loro auguro di credere nei sogni, custodirli gelosamente e lottare per raggiungerli.

A Nenne per avermi saputo far riflettere in momenti dove l'abbandono sembrava l'unica via possibile.

Ai miei genitori, per tutto.

Indice

<i>Introduzione</i>	4
1 La ricerca : materiali e metodi	
1.1 I soggetti	19
1.2 Protocollo di studio	20
1.3 Analisi dei dati	24
2 Risultati	25
3 Discussione	27
4 Tabelle e grafici	29
5 Foto	46
6 Bibliografia	49

Introduzione

Nel continuo superamento delle migliori performance in ambito natatorio la ricerca scientifica è stata indubbiamente parte integrante dei progressi dell'ultimo decennio. A differenza di sport "terrestri" ha dovuto però lasciare il passo, negli anni, ad oggettive limitazioni di tipo tecnologico che, indubbiamente, ne hanno limitato lo sviluppo.

Il nuoto è definito quale "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 e poi la successiva regolamentazione internazionale ha portato all'individuazione di 4 stili fondamentali, che vengono utilizzati per lo svolgimento delle gare.

Tre di questi stili, il delfino (farfalla) , il dorso e la rana hanno delle regole imposte dalla FINA (Federation Internationale de Natation) che devono essere seguite durante lo svolgimento delle competizioni. Il quarto stile, denominato stile libero, con la sua forma più veloce denominata crawl frontale, consente la piena libertà regolamentare del gesto.

Le distanze di gara in piscina variano da un minimo di 50 metri ad un massimo di 1500 metri, con limitazioni sulle distanze imposte dallo stile di nuoto mentre le manifestazioni in "acque libere" (laghi, mare) si svolgono a partire dai 1500m fino alle "maratone" con distanze superiori ai 25km.

L'impegno metabolico e il costo energetico nel nuoto sono elevati, e una loro considerevole riduzione con un relativo aumento della velocità di gara sono il risultato di un regolare allenamento⁽³⁾.

Proprio il mezzo acqua diviene un elemento limitante lo studio delle singole variabili in analisi, in quanto per ottenere un profilo fisiologico dell'atleta impegnato in una data disciplina sportiva è necessario mettere a punto dei protocolli di valutazione funzionale che si avvicinino a riprodurre il più possibile il campo di gara e di conseguenza il reale stress fisico metabolico a cui il soggetto è sottoposto nell'esecuzione della performance atletica⁽⁴⁾.

Per questo motivo già a partire dagli anni 60 del XX secolo si è cercato in primo luogo di caratterizzare la biomeccanica del nuoto, per poi passare con il progredire della tecnologia, a studiare il comportamento idrodinamico della macchina umana^(5,6,7,8), e con la messa a punto di sistemi metabolimetrici portatili, disegnare il profilo metabolico del nuotatore, e determinare il costo energetico del gesto di tale disciplina nei suoi vari stili^(9,10,11,12,13).

L'unica variabile fisiologica che è possibile rilevare con una certa facilità è di fatto la sola frequenza cardiaca (FC)⁽¹⁴⁾, che fornisce un indice di impegno metabolico in quanto direttamente correlata con il consumo di ossigeno (VO_2). Tuttavia la relazione VO_2/FC viene facilmente perturbata da molteplici fattori, tra cui l'accumulo di anidride carbonica che è significativo per sforzi che superano la soglia anaerobica⁽¹⁵⁾. Per cui l'utilità di misurare la FC risulta essere relativa se non si è sicuri che nessun fenomeno stia causando un significativo "cardiac drift". Ne risulta che la

FC può non essere un buon indice dell'intensità del carico lavorativo che il soggetto sta in quel momento "sopportando" per compiere il gesto atletico. A questo si può ovviare affiancando alla analisi della FC anche l'analisi di altri parametri come il VO_2 , la produzione di CO_2 (VCO_2), la ventilazione polmonare (Ve), l'equivalente ventilatorio dell' O_2 (Ve/VO_2 , che permette la determinazione non-invasiva e senza bisogno del dosaggio del Lattato ematico della soglia anaerobica)⁽¹⁶⁾. Tali parametri possono essere acquisiti tramite sistemi metabolimetrici portatili, che possono essere usati in acqua solo con opportuni accorgimenti.

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 vengono eseguite contemporaneamente da entrambi gli arti superiori, coordinati con un movimento contemporaneo degli arti inferiori; la seconda comprende il dorso e lo stile libero, dove le fasi della nuotata vengono eseguite in maniera coordinata e alternata dagli arti superiori con differenti ritmi della battuta di gambe ⁽³¹⁾, avendo quindi un momento in cui un arto esegue la fase propulsiva mentre il suo controlaterale esegue il recupero.

Le tipologie di gara sono 5: le prime 4 vengono eseguite con l'utilizzo di un solo stile, mentre la quinta, denominata "misti" viene eseguita con l'utilizzo di tutti e 4 gli stili. Esiste poi una disciplina "atipica" denominata informalmente "5° stile" che è data dal solo movimento ondulatorio delle gambe (a delfino) con le braccia ferme in posizione idrodinamica ed in nuoto sommerso in apnea. Il 5° stile, da regolamento ammesso fino ai 15m

per ogni vasca, consente velocità superiori all'avanzamento in superficie ed è ormai uno stile che viene allenato in maniera specifica poiché può diventare fondamentale nelle gare entro i 100m garantendo la fase propulsiva fino al 60% dell'intera gara.

Le distanze di gara variano a seconda dello stile (gare olimpiche):

- Nel dorso, nella rana e nel delfino le distanze di gara sono: 100 e 200 metri.
- Nello stile libero abbiamo: 50, 100, 200, 400, 800 (femminili) e 1500 (maschili) metri.
- Nei misti: 200 e 400 metri.
- Nelle staffette le distanze di gara sono: 4 x 100m e 4x 200m per lo stile libero e 4 x 100m per i misti.

Negli ultimi 10-15 anni sono state effettuate numerose ricerche scientifiche, orientate maggiormente sull'analisi dei fattori che influenzano maggiormente la performance natatoria. 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 di ansia a cui è sottoposto il nuotatore ⁽²⁵⁾;
- 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.

Nel 1985 Di Prampero, nel suo testo "La locomozione umana su terra, in acqua, in aria" evidenzia come il costo energetico per unità di percorso (KJ/Km) nel nuoto è superiore ad ogni altra forma di locomozione umana ⁽⁹⁾, per questo motivo, le velocità raggiunte dall'uomo in acqua (2,39 m/sec, circa 8,5 Km/h nei 50 stile libero – *record del mondo di César Cielo Fiho, dicembre 2009, 20"91*) sono notevolmente inferiori rispetto alla terra ferma (10,44 m/sec, cioè 37,6 Km/h nella gara dei 100 metri nell'atletica leggera – *record del mondo di Usain Bolt, agosto 2009, 9"58*). Nonostante queste notevoli differenze di velocità la potenza muscolare dei vari gruppi di atleti di alto livello (nuotatori, ciclisti, marciatori ecc.) è sostanzialmente identica ⁽⁹⁾. 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 ($C = \text{kJ/Km}$) 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 ⁽¹¹⁾.

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 posseggono una tecnica di progressione molto 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 m/sec, mentre aumentando la velocità questa correlazione diminuisce ⁽¹⁰⁾.

E' noto ai nuotatori infatti che gran parte della seduta di allenamento, per i regimi aerobici in prevalenza, è da tenersi in modalità "crawl" proprio perché il delfino, a basse intensità, non consente l'avanzamento per distanze prolungate. Questo aspetto si spiega con l'analisi di alcune recenti ricerche scientifiche dove 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 crawl. ^(12,13).

energetic of swimming at maximal speed in humans

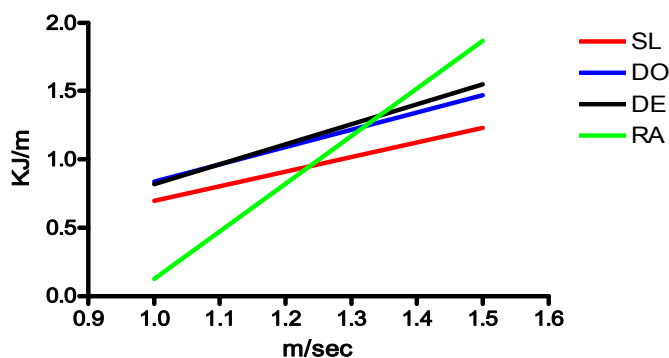


Figura N°01 - Nella figura è rappresentato il costo energetico (KJ/m) in funzione della velocità (n/sec) in atleti impegnati nello stile libero crawl (SL), dorso (DO), delfino (DE) e rana (RA).

Da CAPELLI C. ⁽¹⁾; PENDERGAST D. R. ⁽²⁾; TERMIN B. ⁽²⁾

- (1) Dipartimento di Scienze e Tecnologie Biomediche, Sezione di Fisiologia, Facoltà di Medicina e Chirurgia – Università di Udine, ⁽²⁾ Department of Physiology, SUNYAB, School of Medicine and Biomedical Science, 124 Sherman Hall, South Campus, Buffalo, NY, ETATS-UNIS;

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 ($1000\text{kg} \times \text{m}^{-3}$ per l'acqua contro $1,27\text{kg} \times \text{m}^{-3}$ 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 ^(26, 5), 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 ^(5, 6). 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 ^(28, 5) 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:

$$\eta = w_e/E = D \cdot v/E \text{ (} w_e \text{ è il lavoro esterno)};$$

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 ⁽²⁷⁾.

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 relazione 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 ⁽⁸⁾.

La prima ricerca pubblicata sull'argomento è di East ^(28, 30) 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 ^(29, 30) 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.

Numerose altre ricerche hanno analizzato moltissimi altri fattori direttamente o indirettamente controllabili durante l'allenamento.

Alcuni hanno analizzato il comportamento della frequenza cardiaca durante l'esecuzione di particolari test sia in acqua che fuori dall'acqua. In particolare la ricerca condotta da Gupta S. e Goswami A. ⁽¹⁴⁾ mette in evidenza come in media la frequenza cardiaca massima in acqua sia 8 battiti/minuto inferiore rispetto a quella massima ottenuta con un test di corsa, e che in media lo stress a cui è sottoposto il sistema cardiovascolare non differisce in relazione al tipo di stile eseguito.

È noto come i parametri fisiologici, come il massimo consumo di ossigeno, più noto come VO_{2max} e la frequenza cardiaca (FC) siano notevolmente influenzati dal tipo di gesto sportivo eseguito, e soprattutto, durante la loro valutazione, dal tipo di test utilizzato. Infatti se l'atleta viene valutato durante l'esecuzione di un gesto motorio che non rappresenta il proprio, per esempio un nuotatore che viene valutato al cicloergometro o al treadmill, i valori trovati daranno risposte in assoluto differenti rispetto a quelli ottenuti utilizzando un ergometro specifico.

In sostanza, in ogni atleta il rilievo dei propri parametri fisiologici affinché abbia risonanza pratica e si ottenga il dato voluto, deve essere sempre effettuato utilizzando protocolli che riproducano il più possibile, imitandolo, il gesto di gara, sia per quanto riguarda l'aspetto biomeccanico sia per ciò che concerne intensità e durata ⁽⁴⁾.

L'utilizzo di appositi test con *ergometro sport-specifico* risulta essenziale quando si vuole raggiungere il monitoraggio degli effetti dell'allenamento

durante un monitoraggio longitudinale e verificare se i risultati predetti coincidono con quelli ipotizzati nel target.

Nel nuoto, per motivi legati soprattutto alla presenza dell'acqua, lo sviluppo di questi protocolli di ricerca è estremamente lento, e di conseguenza anche lo sviluppo di test specifici soprattutto per la determinazione del massimo consumo di ossigeno e della soglia anaerobica ^(15, 16).

La ricerca di ergometri sport-specifici, sia nel nuoto che in altri sport soggetti a gesti atletici differenti, inizia dal 1975 (Dal Monte 1975, 1989, Dal Monte & Lupo 1989, Dal Monte et al 1996) . Definire quindi un ergometro sport-specifico per il nuoto significa soddisfare le seguenti caratteristiche :

- ✓ Il tipo di sport e di gesto atletico, tecnicamente corretto
- ✓ La posizione del corpo dell'atleta nello spazio
- ✓ La frequenza del movimento utilizzata durante la competizione
- ✓ La durata del test in modo che possa simulare le medesime risorse energetiche utilizzate nella competizione
- ✓ Il tipo di stress al quale l'atleta si sottoporrà durante la competizione

Nel nuoto l'ergometro sport-specifico più noto (Foto 02 , Dal Monte 1989) è denominato "ergometer pool" (high speed flume) ed era concepito per il test di varie discipline acquatiche : nuoto, nuoto pinnato, wind-surfing, canoa ed altre).

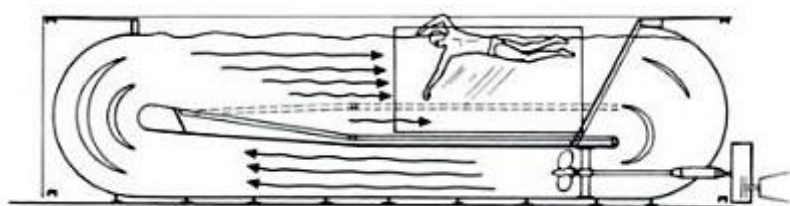


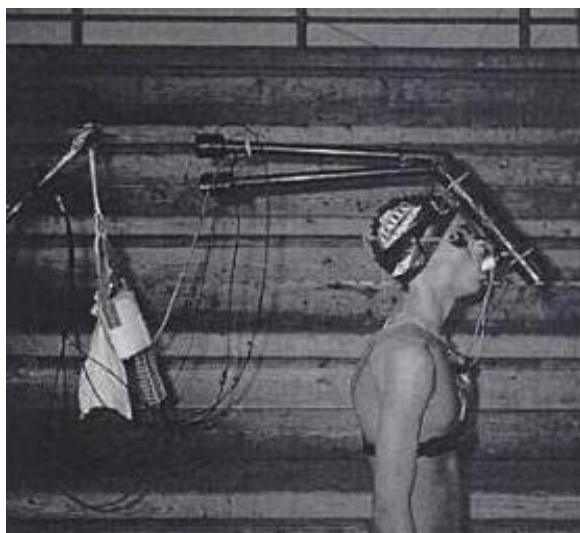
Figura N° 02 – tratta da
“Endurance in Sport”,
volume 2. Roy J Shepard,
Per-Olof Åstrand.

International Federation of Sports Medicine, 2000

Consente la nuotata “da fermo” con una vasca di dimensioni 6,7mx3m. Dei motori appositi consentono il movimento dell’acqua mentre l’osservazione è garantita da un vetro laterale che ne consente la visione del nuotatore (Dipartimento di Fisiologia e Biomeccanica presso l’Istituto di Scienza dello Sport del CONI a Roma)

L’utilizzo dei recenti strumenti di metabolimetria in telemetria hanno poi consentito l’analisi di ulteriori parametri fisiologici meno soggetti alle variazioni della sola frequenza cardiaca.

Nel nuoto, essendo il capo immerso nell’acqua, l’utilizzo dei metabolimetri è stato negli anni realizzato con l’utilizzo di appositi “boccagli” modificati.



Fin dal 1994 (Fig 03, Del Monte et all) era stato realizzato un boccaglio applicato ad un metabolimetro Cosmed k4 che garantiva un avanzamento frontale, un bilanciamento ideale ed una assenza di interferenze alla nuotata.

Figura N° 03 – tratta da “Endurance in Sport”, volume 2. Roy J Shepard, Per-Olof Åstrand. International Federation of Sports Medicine, 2000

Con l'utilizzo di un primo ergometro sport-specifico per il nuoto si era quindi potuto realizzare test di valutazione funzionale molto più vicini al gesto tecnico del nuotatore d'élite.

In generale i test utilizzati per la determinazione del VO_{2max} sono:

1. Test triangolari: meglio conosciuti come test incrementali, in quanto si incrementa l'intensità del carico fino a che il soggetto non raggiunge il massimo consumo di ossigeno. L'intensità iniziale, gli incrementi e la durata di ogni singolo step sono variabili.
2. Test rettangolari: dove l'intensità rimane costante per un tempo che può essere predeterminato o il più lungo possibile.

Generalmente questi test vengono eseguiti o sul cicloergometro o sul nastro trasportatore.

Per quanto riguarda il nuoto esistono almeno tre tipi di test specifici.

1. *Il primo è il tethered-test in cui il nuotatore è collegato ad un contrappeso posto fuori dall'acqua che deve essere mantenuto sospeso, mediante la spinta propulsiva delle braccia.*
2. *Il secondo è quello eseguito sullo swimming flume ⁽³²⁾, vasca ergometrica vista in precedenza. Nello swimming flume è possibile aumentare la velocità di scorrimento dell'acqua, potendo riprodurre quindi un test incrementale.*
3. *Il terzo è quello del nuoto simulato ⁽³⁶⁾, da effettuarsi in laboratorio, che consente il movimento sincronizzato di braccia e gambe tramite un arm cranking, una panca inclinata ed una apposita soluzione per le gambe.*

Il grande vantaggio dei test eseguiti sugli ergometri (cicloergometro o nastro trasportatore) è che i parametri di durata e intensità sono indubbiamente ripetibili e standardizzabili, consentendo quindi sia la ripetizione a distanza di tempo dello stesso test per poter verificare se

l'allenamento ha ottenuto i suoi effetti, sia poter paragonare atleti diversi, riuscendo ad identificare quelle caratteristiche peculiari che ogni campione deve avere.

Lo “stato dell’arte” delle ricerche scientifiche pubblicate si pone l’obiettivo della determinazione del costo energetico ed il rendimento propulsivo del nuotatore. L’obiettivo di questa ricerca è la realizzazione di un test sport-specifico per il nuotatore d’elite che possa avere un alto grado di standardizzazione, e che soprattutto sia di facile realizzazione, consentendo quindi un’analisi longitudinale degli atleti durante la loro programmazione annuale di allenamento.

E’ evidente che la ricerca scientifica, nella ricerca di risultati sempre più efficaci per il miglioramento della performance dei nuotatori, deve necessariamente superare le barriere tecnologiche consentendo il raggiungimento di risultati sempre più facilmente realizzabili garantendo, allo stesso tempo, il massimo rispetto del rigore scientifico.

Un test *sport-specifico* per il nuoto che potesse essere effettuato in un comune impianto natatorio è stato quindi lo scopo di questo lavoro.

L’utilizzo di strumentazione di metabolimetria in telemetria ha consentito di comparare le risposte fisiologiche di un gruppo di nuotatori di elite sottoposti a due test incrementali:

- ✓ uno specifico, svolto cioè in piscina e con un gesto motorio simile a quello espresso in gara ed in allenamento,
- ✓ uno a-specifico, consistente in un test standard incrementale al cicloergometro in laboratorio.

Si è in tal modo voluto verificare se effettivamente le risposte dei parametri fisiologici dei nuotatori differissero nei due test e se i risultati dei test seguissero le differenze già riscontrabili nelle evidenze scientifiche con le comparazioni tra ergometri tradizionali (cicloergometro, treadmill) ed ergometri specifici per il nuoto (swimming flume).

Materiali e metodi

Soggetti.

Sono stati studiati 12 soggetti agonisti di entrambi i sessi (10 maschi e 2 femmine), i cui valori medi \pm deviazione standard (DS) di età, peso e altezza erano $18.5 \pm 3,32$ anni, 67 ± 11.7 Kg, e 175.9 ± 9.7 rispettivamente (Tab. 1). Tutti i soggetti erano regolarmente coinvolti in competizioni a livello regionale e/o nazionale e 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 (in collaborazione con un medico dello Sport) 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.

Protocollo di studio.

La prima fase sperimentale (fase in laboratorio) si è svolta presso il laboratorio di Fisiologia degli Sport del Dipartimento di Scienze Applicate ai Biosistemi dell'Università degli studi di Cagliari, presso il Centro Universitario Sportivo di Cagliari “Sa Duchessa”, mentre la seconda fase sperimentale (in piscina) si è svolta presso la piscina della società sportiva RARI NANTES – Cagliari

Queste tre strutture si sono messe a disposizione gratuitamente per questo lavoro di Ricerca del Dottorato in Scienze dello Sport dell'Università di Roma Tor Vergata.

Ciascun soggetto ha eseguito il seguente protocollo di studio:

1) Fase in laboratorio:

Ciascun soggetto ha eseguito un test incrementale ad esaurimento di tipo triangolare al cicloergometro a freno elettromagnetico (modello: Customed) con monitoraggio continuo dell'attività cardiaca e degli scambi gassosi; i carichi somministrati erano di 30 watt/min per gli atleti di sesso maschile, e di 20 watt/min per le atlete. Per entrambi i sessi il test era preceduto da tre minuti di campionamento in condizioni di riposo, e da tre minuti di fase di recupero passivo.

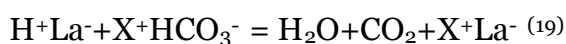
Durante tutta la durata della prova il soggetto era connesso con una metabolometro modello VO2000 della ditta Med Graphics (USA). Tale strumento è costituito da una unità principale dove sono localizzate le

unità di analisi dei gas; l'analisi dell'ossigeno viene eseguita per mezzo di una cella galvanica e l'analisi della CO₂ 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 PreVent™ (Range: ±18 L/sec, Accuratezza: ±3% o 50 ml)⁽¹⁷⁾. 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'O₂, una all'analizzatore per la CO₂, e una via dedicata alla determinazione della ventilazione polmonare. 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 rilevare e registrare su supporto informatico in modalità “respiro per respiro” i seguenti parametri:

- 1) Frequenza cardiaca (FC);
- 2) Consumo d'ossigeno (VO₂);
- 3) Produzione d'anidride carbonica (VCO₂);
- 4) Ventilazione polmonare (Ve);
- 5) Quoziente respiratorio (QR);
- 6) Equivalente ventilatorio per l'ossigeno (Ve/VO₂);

Il QR è il rapporto tra VCO₂/VO₂, 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 correlazione con un accumulo d'acido lattico⁽¹⁸⁾. In particolare, un QR>1 è sicuramente correlato con un

accumulo ematico di tale metabolita, in quanto si viene a generare un eccesso di CO₂ che deriva dall'attività dei sistemi tampone ematici che contrastano l'eccesso di H⁺ dovuto all'accumulo di lattato riversato in circolo. In particolare, nel plasma, i bicarbonati reagiscono con gli H⁺ secondo la seguente reazione chimica:



generando così un eccesso di CO₂ che viene eliminato con la respirazione e viene a sovrapporsi a quello normalmente prodotto dal metabolismo cellulare⁽²²⁾. Equivalente ventilatorio per l'ossigeno (Ve/VO₂) è un indice altamente affidabile per il calcolo della soglia anaerobica (SA)^(16,19).

Infatti un suo incremento durante carichi lavorativi incrementali è altamente correlato con l'accumulo di lattato nel sangue.

Il monitoraggio di indicatori della lattatemia durante un test incrementale non è da sottovalutare in quanto si è visto che il progressivo accumulo del lattato ematico può determinare, a causa della vasodilatazione provocata, degli scompensi cardiovascolari⁽²⁰⁾.

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 è stato realizzato dopo un periodo di monitoraggio e messa a punto delle attrezzature che ha comportato circa 8 mesi di lavoro. La fase definitiva si è svolta in vasca coperta di 25 metri, in condizioni

meteo stabili con temperatura esterna media di 33°C e T media dell'acqua di 27°C.

Il nuotatore durante il test era vincolato, tramite cintura posizionata all'addome, ad una corda elastica fissata all'altra estremità al blocco di partenza della corsia della piscina. La tensione dell'elastico era tarata mediante un dinamometro digitale PCE-FM1000 per forza di trazione e di compressione, a cui la corda era connessa, in modo tale che gli incrementi del carico lavorativo fossero pari ad 1 kg/min.

Tale apparecchiatura è dotata di interfaccia software per 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 era 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.

Sono stati quindi individuati nella vasca dei punti corrispondenti ad incrementi della forza di trazione di 1Kg. Tali posizioni di nuotata erano segnalate tramite dei segnali visivi posizionati sul fondo della vasca ed indicati con dei numeri progressivi da 1 a 9, con la prima stazione corrispondente ad una forza trazione di 2 kg sino ai 10 kg dell'ultima stazione. In tal modo si è costruita 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 400cc.

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 far sì che si abbia una adeguata ventilazione polmonare⁽²³⁾.

Quindi, per valutare l'effetto della respirazione con lo snorkel, abbiamo eseguito su tre soggetti due test triangolari al cicloergometro, di cui uno mentre il soggetto respirava normalmente, e l'altro mentre il soggetto respirava tramite lo snorkel.

I risultati del test non hanno mostrato variazioni significative tra i parametri respiratori rilevati nelle due condizioni sperimentali.

Sia nel test in laboratorio che nel test in piscina sono stati calcolati il VO_2 massimo (VO_{2max}), rappresentato dal VO_2 durante gli ultimi 30 secondi di esercizio dell'ultimo carico lavorativo, e la SA calcolata come precedentemente esposto tramite l'analisi dell'andamento del V_e/VO_2 .

Analisi dei dati

I vari parametri fisiologici studiati a riposo, durante esercizio ed al recupero nei due test in laboratorio e piscina sono stati mediati per un minuto. Le risposte sono espresse come % del carico lavorativo massimo raggiunto nei due test.

I valori medi \pm DS sono stati utilizzati per il calcolo statistico. L'analisi delle differenze nei vari carichi lavorativi tra i due test in piscina ed in laboratorio e le differenze indotte dal dispositivo snorkel nei due test effettuati in laboratorio è stata condotta mediante analisi della varianza a due vie per misure ripetute (fattori: tempo e tipo di prova). L'analisi delle differenze in VO_{2max} e SA tra i test in laboratorio e piscina è stata condotta mediante t test. La significatività statistica è stata assunta per un livello di $P < 0.05$ in tutti i casi. Inoltre è stata effettuata l'analisi di Bland e Altman⁽²⁴⁾ per verificare il livello di discrepanza tra le misure di VO_{2max} e di SA nelle due situazioni sperimentali.

Risultati

I massimi carichi lavorativi raggiunti nei due test sono stati di 262.5 ± 65.6 watt e 9.66 ± 0.65 kg rispettivamente. La comparazione statistica della FC e delle variabili metabolimetriche nelle due differenti condizioni di studio (laboratorio e piscina) non ha evidenziato differenze significative in nessuno dei carichi lavorativi studiati. Tale andamento è descritto nelle figure da 1 a 6. La figura 7 mostra il VO_{2max}

in laboratorio ed in piscina. Tale parametro raggiungeva in laboratorio il valore medio di 49.04 ml/kg/min (DS \pm 8.22), mentre nel test in piscina il valore medio era pari a 50,7 ml/kg/min (DS \pm 8.05). Non vi era nessuna differenza significativa tra i due valori. La statistica di Bland e Altman applicata a questo parametro evidenziava come i limiti di confidenza per la differenza piscina-laboratorio erano di +16.7 e -13.2 ml/kg/min.

La SA in laboratorio è stata calcolata per un carico lavorativo di 147.7 \pm 31.5 W (corrispondente ad un % del carico lavorativo massimo raggiunto dai soggetti di 56.8 \pm 22.1%). La SA in piscina è stata individuata ad un carico lavorativo di 6.6 \pm 1.2 kg (corrispondente ad % del carico lavorativo massimo del 69.9 \pm 12.8%) (figura 8 e 8a). La FC alla SA era di 135.1 \pm 17.5 bpm in laboratorio e di 144.5 \pm 17.4 bpm in piscina. Non vi era significatività tra questi due valori (figura 9). Il VO₂ alla SA era di 1734.9 \pm 276.3 ml•min⁻¹ in laboratorio e di 2185.2 \pm 490.5 ml•min⁻¹ in piscina. Anche in questo caso non vi era nessuna differenza statica tra i due test (figura 10).

Tuttavia è interessante notare come l'analisi di Bland e Altman metta in evidenza come tra le due situazioni sperimentali vi sia una notevole discrepanza. Infatti i limiti di fiducia della differenza tra piscina e laboratorio nel misurare la FC alla SA erano compresi tra valori di +31.1 e -12.1 bpm (grafico 9a). Ciò significa che misurare la SA in laboratorio può portare a sottostimare questo parametro di circa 31 bpm o sovrastimarne di circa 12 bpm rispetto al test in piscina. Similmente anche la VO₂ alla SA aveva dei limiti di confidenza

compresi tra 1512.8 e -612.3 ml•min⁻¹ (grafico 10a), che sono valori chiaramente inaccettabili per poter definire i due metodi simili nel valutare la SA. Questi ampi limiti di confidenza nella misura della SA non erano evidenti considerando solo le medie e DS del parametro nei due test.

Per ciò che concerne l'effetto del dispositivo snorkel sulle variabili ventilatorie, i test di laboratorio eseguiti nei tre soggetti hanno evidenziato come non vi sia stato un effetto significativo di tale dispositivo (grafico 11a,b,c).

Discussione

Lo scopo di questo studio era quello di verificare se un test aspecifico condotto in laboratorio fosse assimilabile nei risultati ad un test specifico per il nuoto condotto in piscina.

Da una prima analisi dei dati sembrerebbe che i due test siano simili, infatti la statistica non ha messo in evidenza differenze significative fra i due test nei vari parametri studiati. In particolare, non si evidenziavano differenze per quanto riguarda i valori di massimo consumo di ossigeno e soglia anaerobica.

Tuttavia da una più attenta analisi si può evidenziare come tali considerazioni non siano completamente vere. Infatti, applicando una statistica più corretta, quella di Bland e Altman, si è visto come i due test potessero fornire dei risultati affetti da un alto livello di discrepanza. La statistica di Bland e Altman è particolarmente adatta ad essere applicata per mettere in evidenza differenze tra due metodi che misurano lo stesso fenomeno, nel nostro caso il massimo consumo di ossigeno e la soglia anaerobica. Dai risultati di questa analisi statistica emerge come gli intervalli di confidenza della differenza tra i due metodi nel misurare il VO_{2max} e la SA fossero particolarmente ampi. In pratica il test in laboratorio poteva fornire delle differenze rispetto al test in piscina nel misurare il VO_{2max} comprese tra -16.7 e +13.2 ml/kg/min. Tali valori portano ad una sottostima o sovrastima del VO_{2max} tra i due test che può essere dell'ordine del 25-30%, un valore

chiaramente inaccettabile per un test che abbia lo scopo di valutare lo stato di efficienza di un atleta.

Ancora più evidente era la differenza nel calcolo della SA. Infatti per questo parametro i limiti di confidenza della differenza fra i due test per quanto riguarda i valori della FC al momento della soglia erano compresi tra +31.1 e -12.1 bpm. In media quindi il test in laboratorio sottostimava la SA rispetto al test in piscina e poteva generare delle differenze nella misura della soglia per una finestra di esercizio di circa 40bpm.

Da questi dati se ne deduce che i due tipi di test non sono interscambiabili nella misura del massimo consumo di ossigeno e della soglia anaerobica 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 il test al cicloergometro da noi utilizzato, 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 discomfort da parte dell'atleta e limitato impegno temporale da parte degli operatori.

In conclusione, la ricerca scientifica verso il nuoto è stata oggetto fin dagli anni '80 di attenzioni da parte di ricercatori internazionali che hanno lavorato sulla ricerca di correlazioni tra varie tipologie di test di valutazione funzionale.

Sono emersi negli anni numerosi studi che hanno evidenziato come nel nuoto, e principalmente in questo sport, l'esigenza di un test sport-specifico fosse l'unica via per la corretta analisi di un nuotatore di elite piuttosto che di un amatore della disciplina. La ricerca verso il progressivo miglioramento della performance , obiettivo da ricercare per il progresso della "Scienza dello Sport", comporta quindi il progressivo affinamento di test sport-specifici per il nuoto che possano essere utilizzati longitudinalmente durante la stagione agonistica degli atleti di elite.

Il nostro studio ha messo in evidenza, confermando quanto risulta dalle evidenze scientifiche, come *per la valutazione funzionale del nuoto per atleti di elite* sia raccomandabile l'utilizzo di test sport-specifici che valutino l'atleta nel suo ambiente naturale mentre compie il suo gesto di gara.

Tabelle e grafici

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

Soggetto	sexso	età	peso	altezza
1	F	16	54	174
2	M	18	82	190
3	M	19	78	188
4	M	21	76	183
5	M	16	64	180
6	M	26	85	174
7	F	14	52	160
8	M	16	58	167
9	M	22	70	185
10	M	20	65	177
11	M	17	51	163
12	M	17	69	170
Media		18,5	67	175,917
DS		3,31662	11,7086	9,70902

Grafico 1. Andamento dei valori di frequenza cardiaca (FC) 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 di frequenza cardiaca.

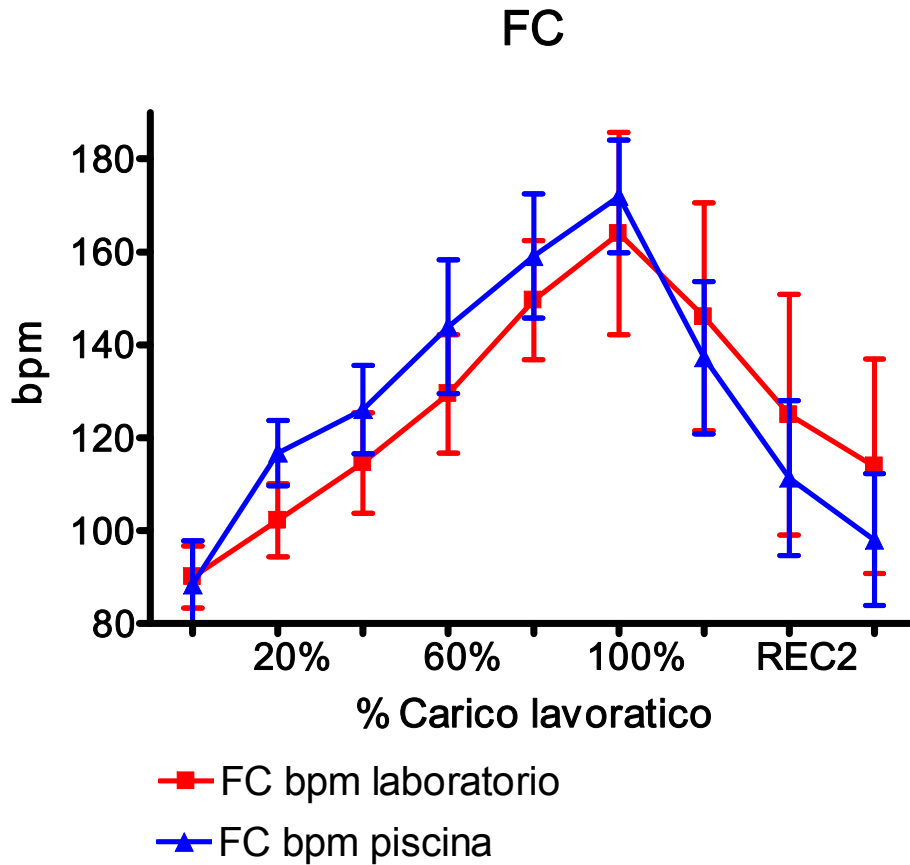


Grafico 2. Andamento dei valori del consumo di ossigeno VO_2 nelle due condizioni di lavoro. In ascissa è indicato il carico lavorativo espresso in percentuale del massimo carico lavorativo; in ordinata sono indicati i valori del consumo di O_2 .

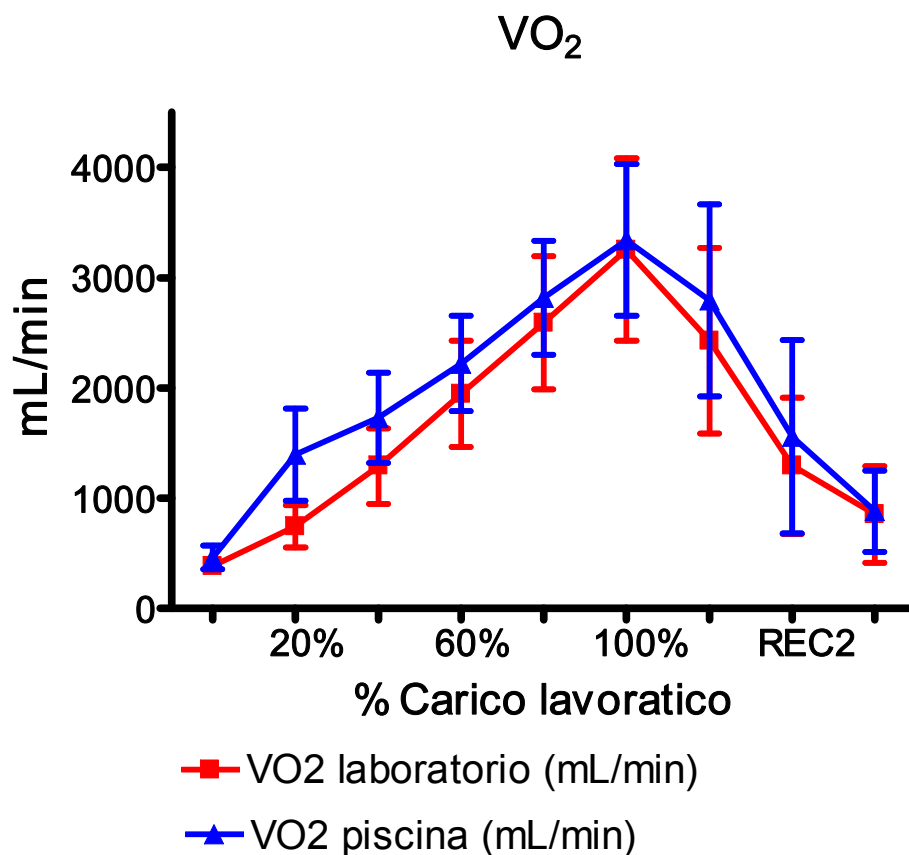


Grafico 3. Andamento della produzione di anidride carbonica VCO_2 nelle due condizioni di lavoro. In ascissa è indicato il carico lavorativo espresso in percentuale del massimo carico lavorativo; in ordinata sono indicati i valori della VCO_2 .

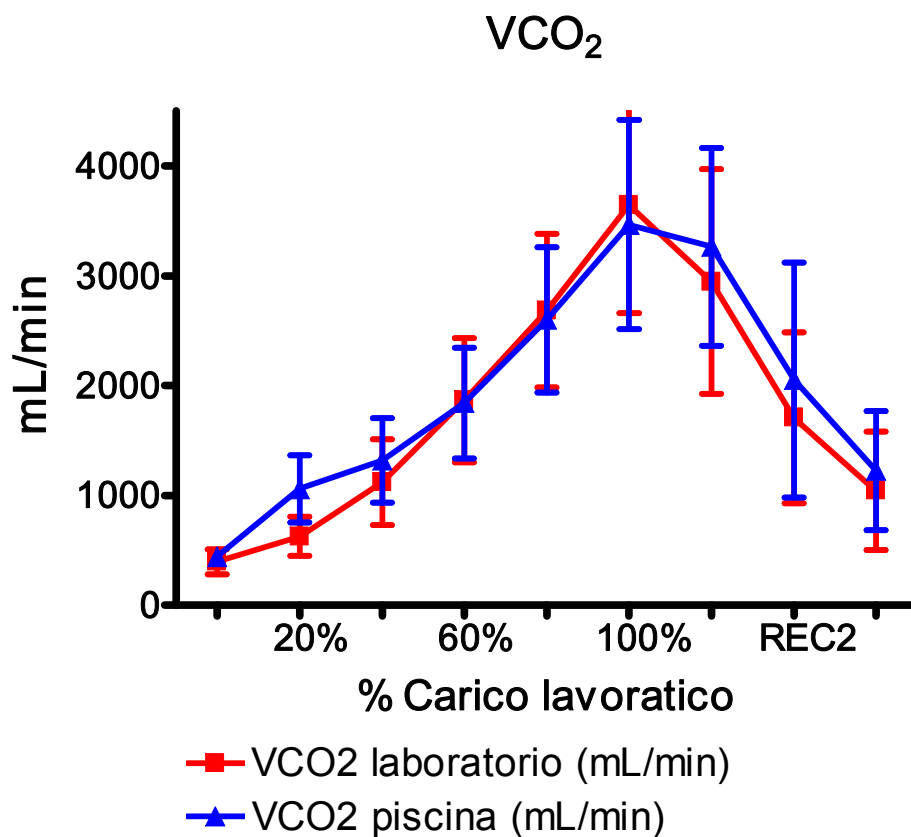


Grafico 4. Andamento della ventilazione V_e nelle due condizioni di lavoro. In ascissa è indicato il carico lavorativo espresso in percentuale del massimo carico lavorativo; in ordinata sono indicati i valori della V_e .

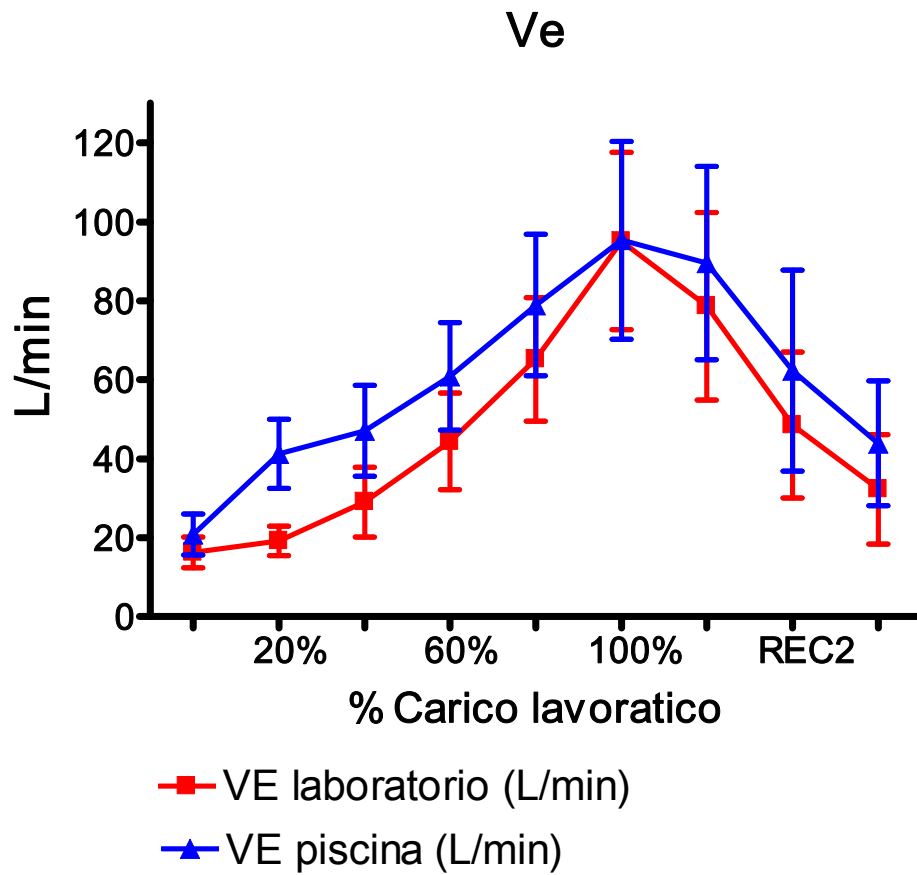


Grafico 5. Andamento dei valori del quoziente respiratorio QR nelle due condizioni di lavoro. In ascissa è indicato il carico lavorativo espresso in percentuale del massimo carico lavorativo; in ordinata sono indicati i valori di QR.

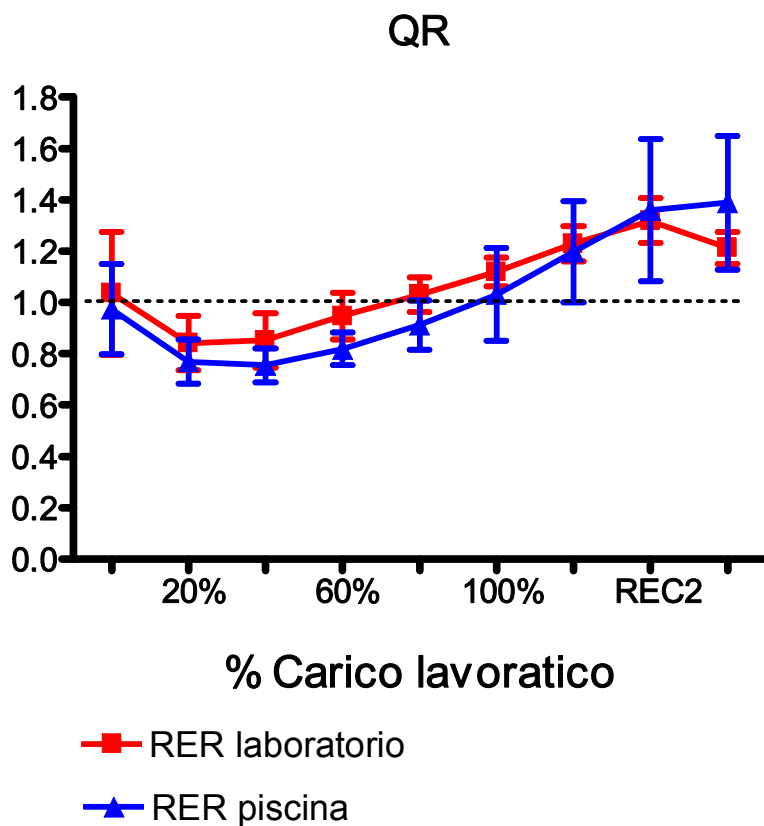


Grafico 6. Andamento dei valori dell'equivalente ventilatorio per l'ossigeno VE/VO_2 nelle due condizioni di lavoro. In ascissa è indicato il carico lavorativo espresso in percentuale del massimo carico lavorativo; in ordinata sono indicati i valori VE/VO_2 .

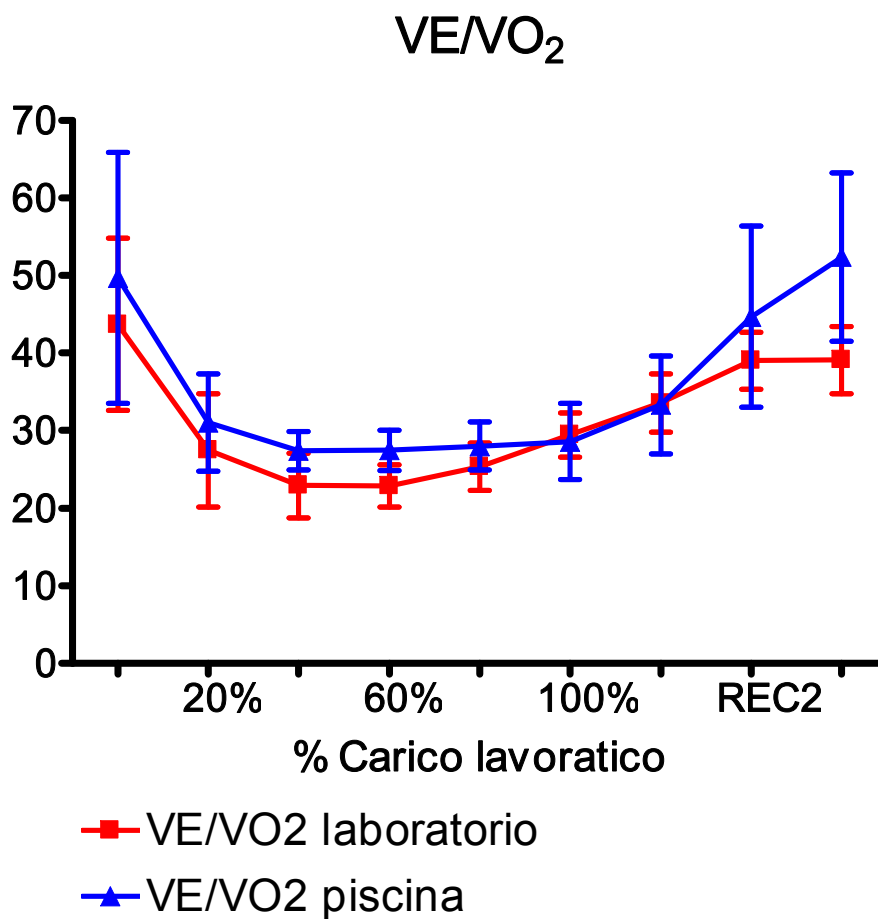


Grafico 7. Andamento dei valori del consumo di ossigeno indicizzati per Kg di peso corporeo nelle due condizioni di lavoro. In ascissa è indicato il carico lavorativo espresso in percentuale del massimo carico lavorativo; in ordinata sono indicati i valori di VO_2/kg .

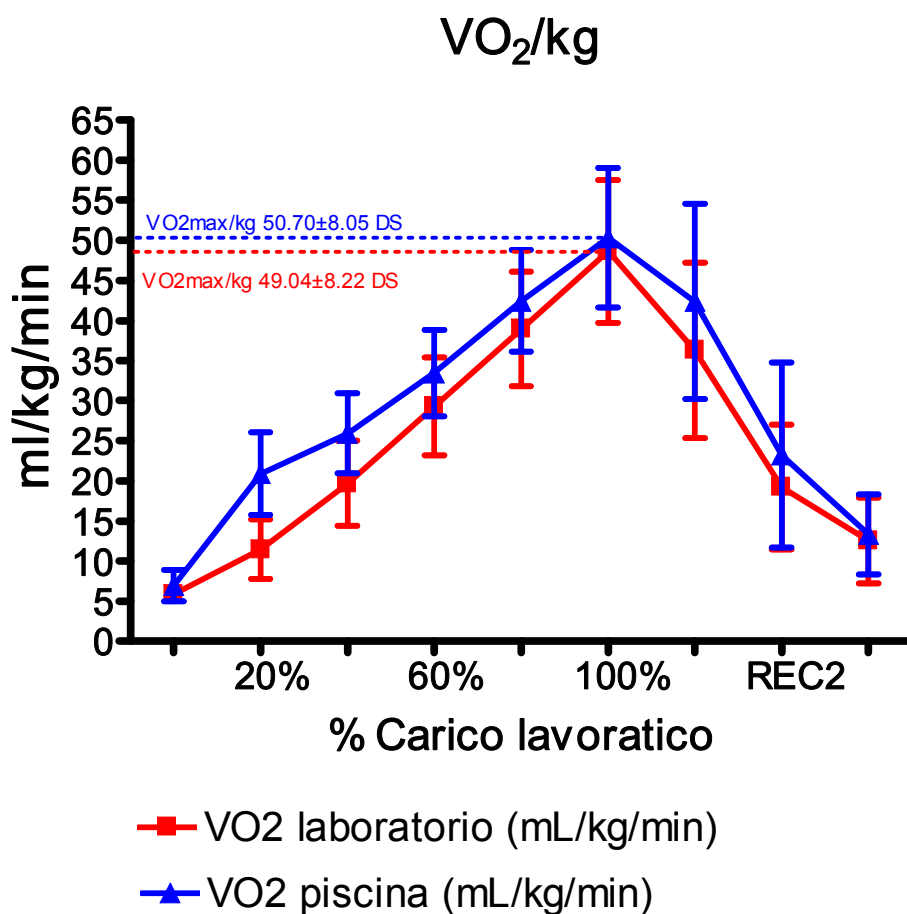


Grafico 7a. La statistica di Bland e Altman applicata al VO_{2max} evidenzia come i limiti di confidenza per la differenza piscina-laboratorio siano di +16.7 e -13.2 ml/kg/min.

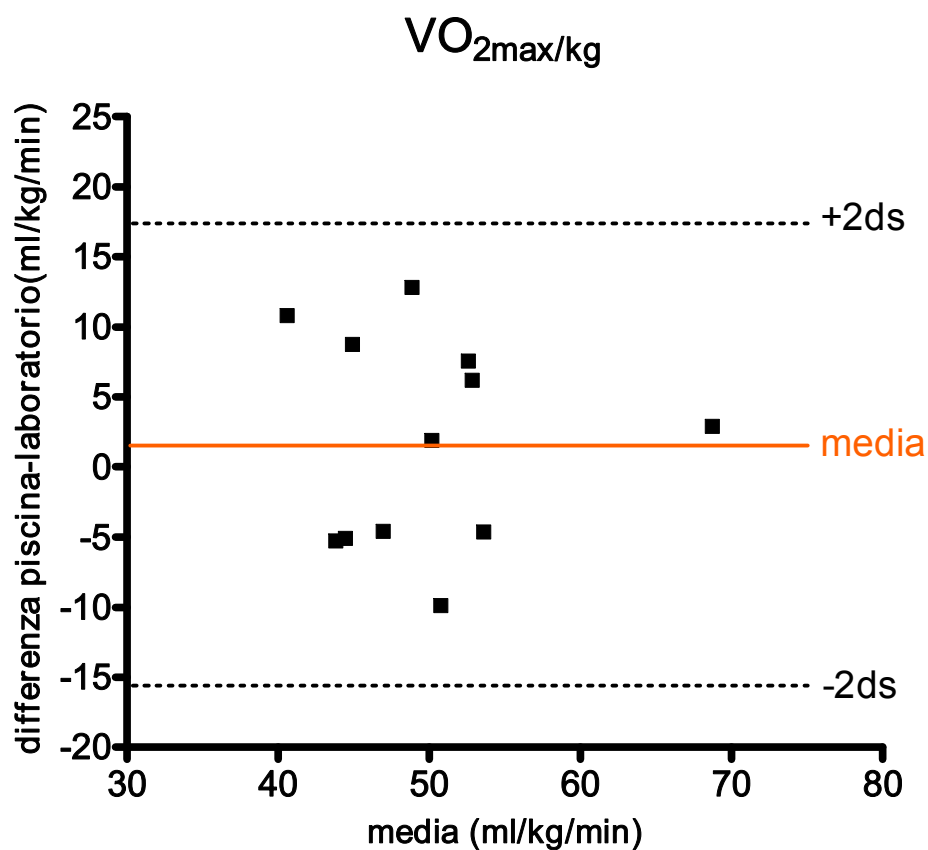


Grafico 8. Soglia anaerobica (SA) nelle due differenti condizioni di lavoro; la SA è espressa in percentuale del massimo carico lavorativo ($69.9 \pm 12.8\%$ per il test in laboratorio e $56.8 \pm 22.1\%$ per il test in piscina).

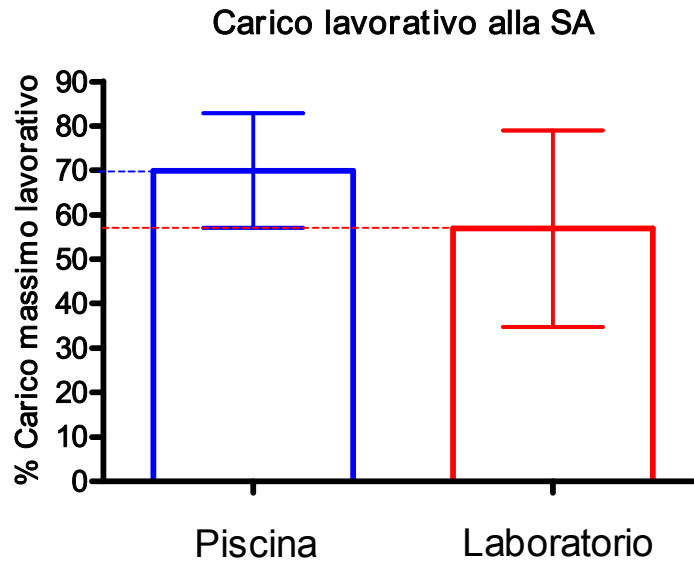


Grafico 8a. La statistica di Bland e Altman applicata alla soglia anaerobica (SA) evidenzia come i limiti di confidenza per la differenza piscina-laboratorio siano di +64.1 e -37.9.

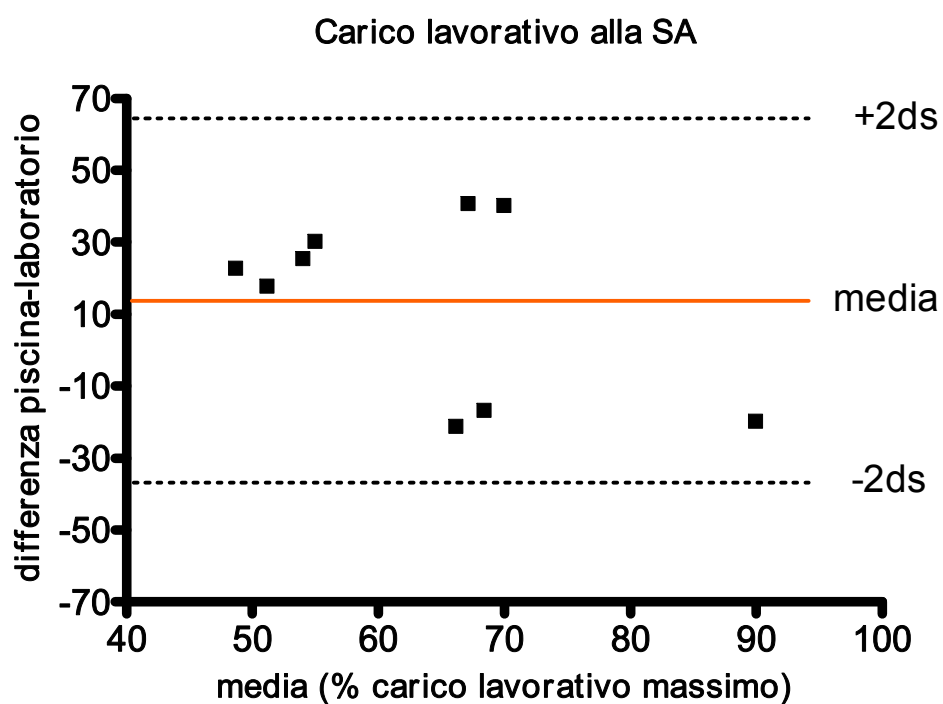


Grafico 9. Valori di frequenza cardiaca alla soglia anaerobica (144.5±17.4 bpm in piscina e 135.1±17.5 bpm in laboratorio).

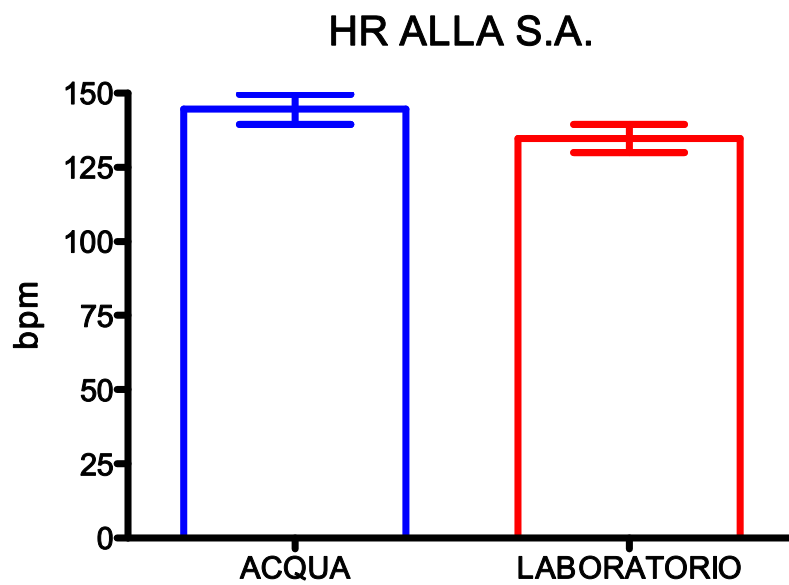


Grafico 9a. La statistica di Bland e Altman applicata alla frequenza cardiaca individuata alla soglia anaerobica (SA) evidenzia come i limiti di confidenza per la differenza piscina-laboratorio siano di +31.1 e -12.1.

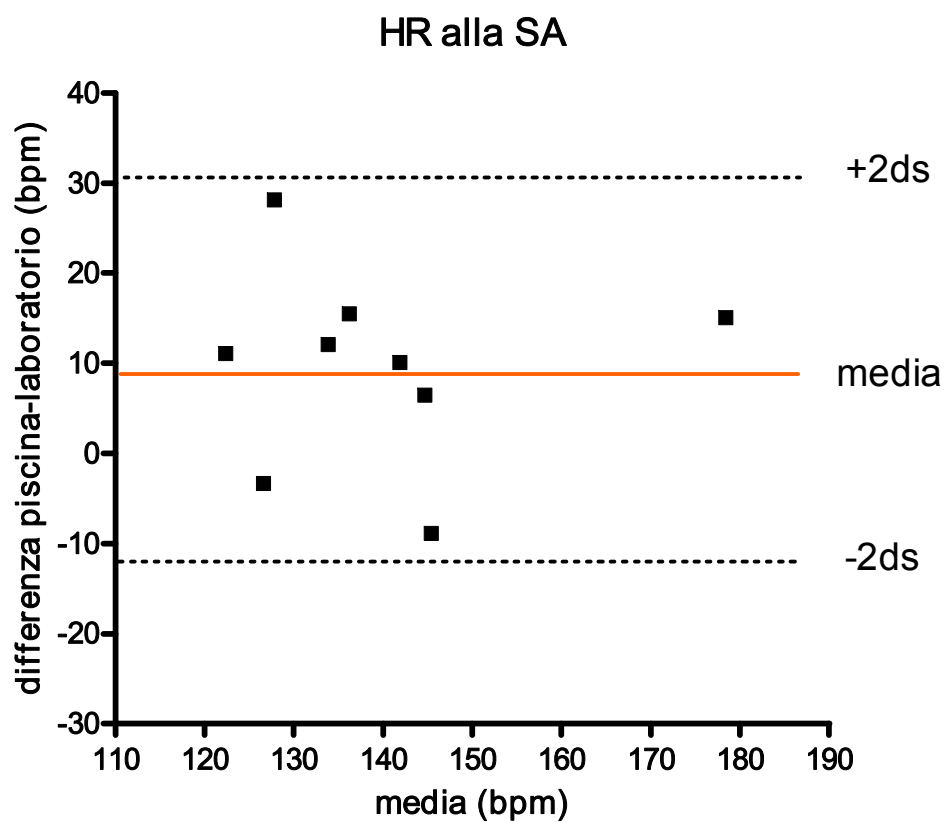


Grafico 10. Valori del consumo di ossigeno misurati alla soglia anaerobica ($2185.2 \pm 490.5 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ in piscina e di $1734.9 \pm 276.3 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ in laboratorio).

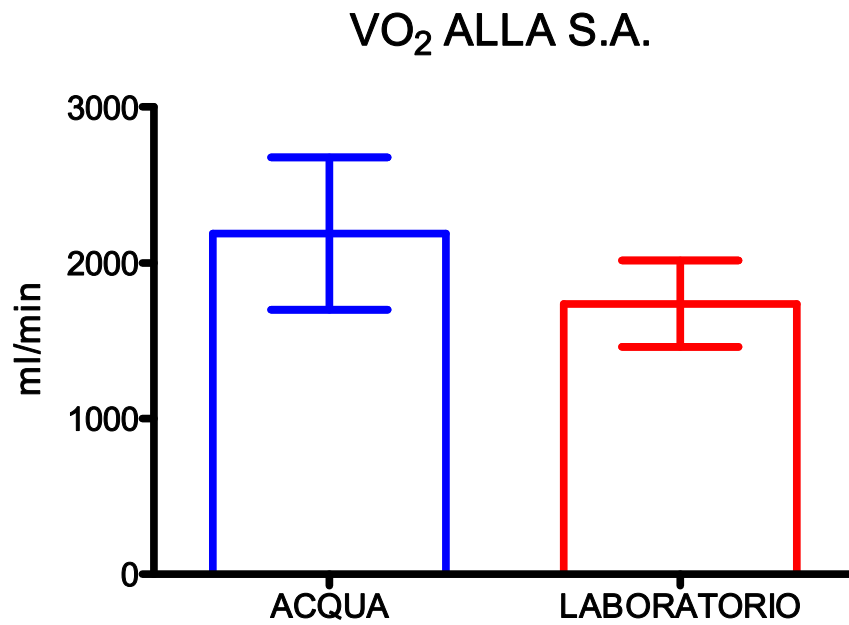


Grafico 10a. La statistica di Bland e Altman applicata al VO_2 misurato alla soglia anaerobica (SA) evidenzia come i limiti di confidenza per la differenza piscina-laboratorio siano compresi tra 1512.8 e -612.3 $ml \cdot min^{-1}$.

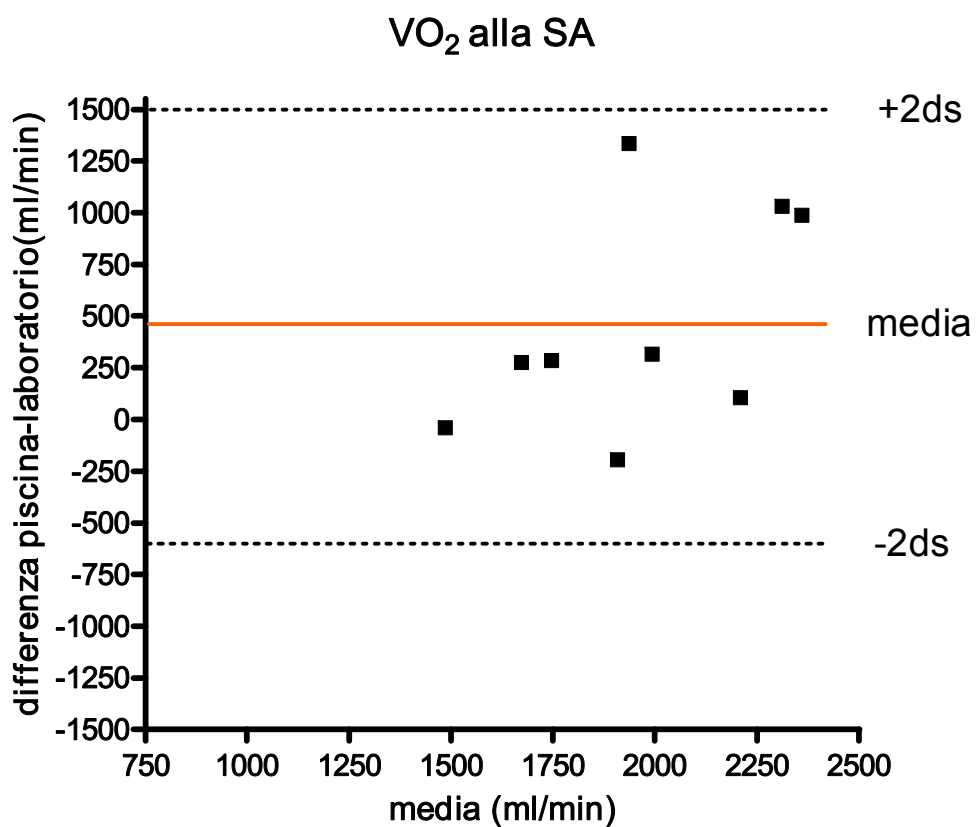
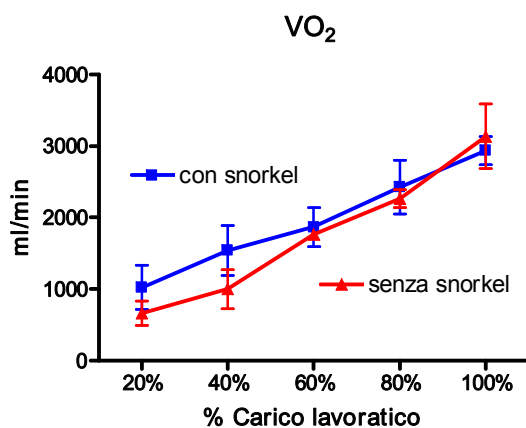
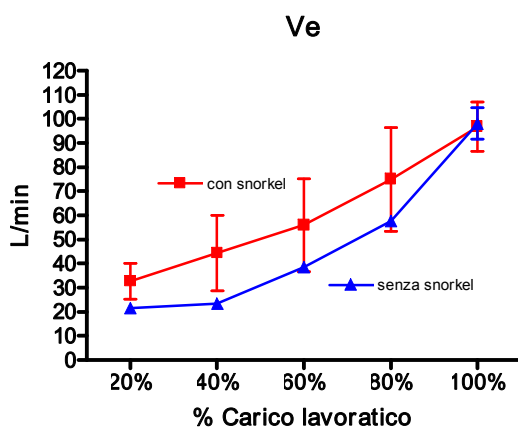
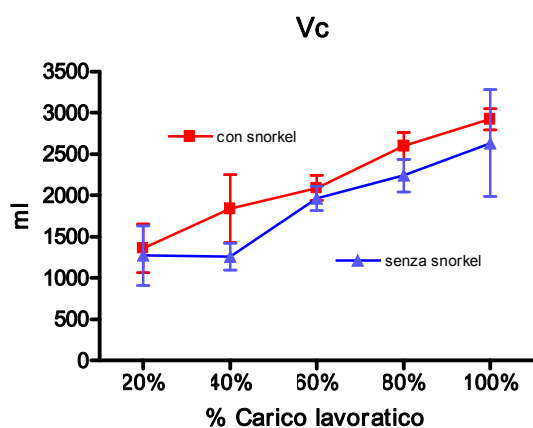


Grafico 11a,b,c. Andamento delle variabili metaboliche studiate nella fase di validazione dello snorkel.



Foto

VO₂₀₀₀ Portable Metabolic System



Dispositivo snorkel modificato

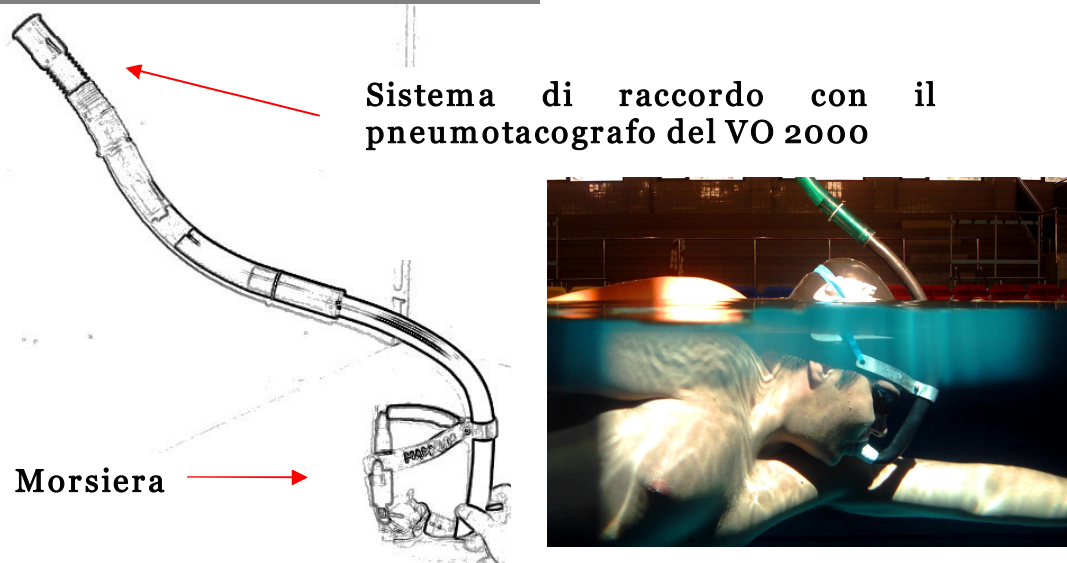


Foto del test sport-specifico



Foto 2 : fase di nuotata



Foto 1 : fase di avvio test



Foto 3 : trasferimento dati



Foto 4 : dettaglio snorkel e Polar



Foto 5 : dettaglio snorkel



Foto 6 : fase di nuotata con step

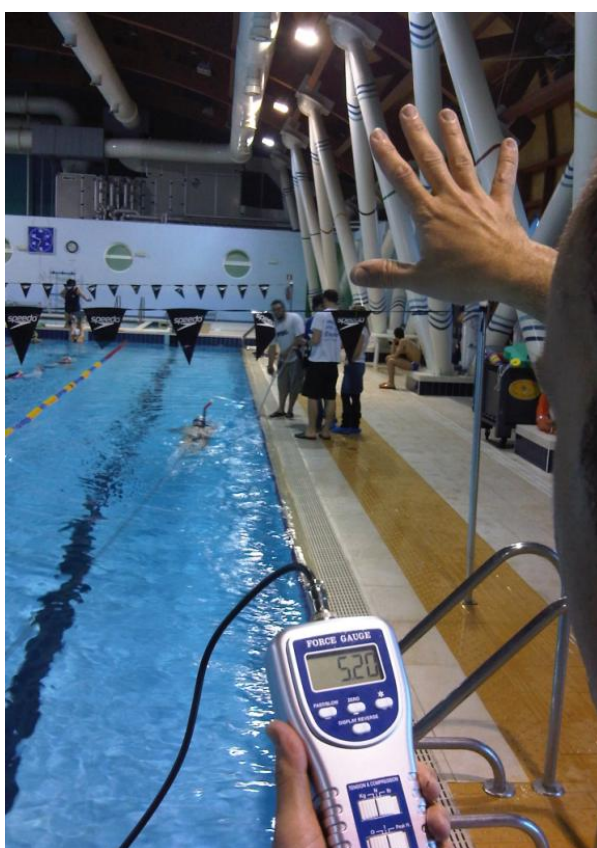


Foto 7 : verifica step con dinamometro



Foto 8 : verifica step con stroke rate

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) Holmér I. Swimming physiology. *Ann Physiol Anthropol.* 1992 May;11(3):269-76.
- 4) Dal Monte Antonio, Faina Marcello; *Valutazione dell'atleta. Analisi funzionale e biomeccanica della capacità di prestazione*. UTET, 1999
- 5) Bonifazi et al. La resistenza idrodinamica in nuotatori di elite. *Annual, la tecnica del nuoto*, 2005: 18-26
- 6) Harpovich PV. Water resistance in swimming. *Research Quarterly In Sport Sciences* 1933; 4: 21-28.
- 7) Hollander AP et al, Measurement of active drag forces during swimming. *J Sport Sci*, 4:21-30, 1986
- 8) Craig AB, Pendergast DR, Relationship of stroke rate and velocity in competition swimming. *Med Sci Sports Exerc.* 17:625-634, 1979
- 9) Di Prampero *La locomozione umana su terra, in acqua, in aria*, edi-ermes 1985.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) Capelli C, Pendergast DR, Termin B. Energetics of swimming at maximal speeds in humans. *Eur. J. Appl. Physiol.* 78: 385-393, 1998.
- 13) Barbosa TM et al. Evaluation of the energy expenditure in competitive swimming strokes. *Int J Sports Med.* 2006 Nov;27(11):894-9.

- 14) Gupta S., Goswami A. A comparative study of cardiovascular stress during different swimming stroke. *Indian J Physiol Pharmacol.* 2001 Apr;45(2):245-8.
- 15) Crisafulli A, GL Pittau, L Lorrari, M Cominu, F Tocco, F Melis, A Concu. Poor reliability of heart rate monitoring to assess oxygen consumption during field training. *Int. J. Sport Med.* 27: 55-59, 2006.
- 16) 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.
- 17) MedGraphics VO₂₀₀₀ Portable Metabolic System, user manual.
- 18) Beaver WL, Wasserman K, and Whipp BJ. A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange (1986a). *J Appl Physiol* 60: 2020-2027.
- 19) Ciuti C, Marcello C, Macis A, Onnis E, Solinas R, Lai C, Concu A. Improved aerobic work capacity by detraining in basketball players mainly trained for strenght. *Sports Med. Train. and Rehab.* 6: 325-335, 1996.
- 20) Crisafulli A., Tocco F., Pittau G., Lorrari L., Porru C., Salis E., Pagliaro P., Melis F., Concu A. Effect of differences in post-exercise lactate accumulation in athletes' hemodynamics. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* 31: 423-431, 2006.
- 21) Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ. Bicarbonate buffering of lactic acid generated during exercise (1986b). *J Appl Physiol* 60: 472-478.
- 22) Crisafulli A, Tocco F, Pittau G, Caria M, Lorrari L, Melis F, Concu A. Detection of lactate threshold by including haemodynamic and oxygen extraction data. *Physiol. Meas.* 27: 85-97, 2006.
- 23) Cerretelli P. *Fisiologia dell'esercizio*. SEU, 2001.
- 24) Bland JM, Altman DG. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet* 1: 307-310, 1986.
- 25) 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.

- 26) Amar J. The human motor. G. Routledge and son Ltd, London 1920
- 27) Zamparo P. et. Al. L'efficienza di propulsione nello stile libero. Annual, la tecnica del nuoto, 2005; 18-26.
- 28) 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.
- 29) 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.
- 30) Gatta G. et al. I parametri della bracciata, Annual, la tecnica del nuoto, 2005; 3-9.
- 31) Ferretti I., L'importanza della tecnica, Allenatori di nuoto I livello, 57-90.
- 32) Sardella F., La vasca ergometrica, In Acqua, 2007; 1: 36-39.
- 33) Sweetenham B., Atkinson J. Championship Swim Training, Human Kinetics, 2003
- 34) Holmér J et all , Swimming training and maximal oxygen uptake. Journal of Applied Physiology, 1972
- 35) Holmér J. Et all, Maximum oxygen uptake during swimming and running by elite swimmers, Journal of Applied Physiology, 1974
- 36) Y.Kimura Ed D et all, Simulated swimming: a useful tool for evaluation the VO₂max of swimmers in the laboratory, Br.J.Sports Med, 1990
- 37) P.Troup J, The physiology and biomechanics of competitive swimming, Acquatics sports injuries and rehabilitation, 1999
- 38) Roels B et all , Specificity ov VO₂max and the ventilatory threshold in free swimming and cycle ergometry: comparison between triathletes and swimmers. Bj Sports Med 2005

Fotografie presenti a pag 15-16 tratte da "Endurance in Sport", volume 2. Roy J Shepard, Per-Olof Åstrand. International Federation of Sports Medicine, 2000

Fotografie presenti a pag 46-47-48 realizzate durante le fasi di ricerca