

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

DOTTORATO DI RICERCA IN

**Discipline delle attività motorie e sportive**

Ciclo XXIV

Settore Concorsuale di afferenza: 05/L1

Settore Scientifico disciplinare: M-EDF/02

**EFFETTI IDRODINAMICI PRODOTTI  
DAL COSTUME TECNICO SUL NUOTATORE**

Presentata da: **Matteo Cortesi**

Coordinatore Dottorato:

**Prof. Salvatore Squatrito**

Relatore:

**Prof. Giorgio Gatta**

Esame finale anno 2012

<b>1. INTRODUZIONE .....</b>	<b>7</b>
<b>2. IL COSTUME DA NUOTO .....</b>	<b>11</b>
<b>3. I COSTUMI TECNICI: IMPATTO SULLA PRESTAZIONE .....</b>	<b>22</b>
<b>4. RESISTENZE IDRODINAMICHE DEL NUOTATORE.....</b>	<b>26</b>
4.1. Resistenza di pressione.....	32
4.2. Galleggiamento e assetto del nuotatore.....	37
4.3. Resistenza d'onda .....	39
4.4. Resistenza di frizione .....	44
<b>5. REVISIONE DELLA LETTERATURA .....</b>	<b>48</b>
5.1. Effetti del wetsuit .....	48
5.2. Effetti del costume tecnico.....	54
<b>6. EFFETTI DEL COSTUME TECNICO IN GOMMA SUL GALLEGGIAMENTO PASSIVO E SUI VOLUMI POLMONARI .....</b>	<b>66</b>
6.1. Introduzione .....	66
6.2. Materiali e metodi.....	67
6.3. Risultati .....	69
6.4. Discussione e conclusioni .....	70
<b>7. EFFETTI IDRODINAMICI PRODOTTI DAL COSTUME TECNICO IN GOMMA SUL DRAG PASSIVO E SULLA POSIZIONE DEL CORPO.....</b>	<b>73</b>
7.1. Introduzione .....	73
7.2. Metodi .....	76
7.2.1. Partecipanti .....	76
7.2.2. Procedura sperimentale.....	76
7.2.3. Analisi dei dati .....	78
7.2.4. Analisi statistica.....	80
7.3. Risultati .....	81
7.4. Discussione e conclusioni .....	88
<b>8. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>92</b>

## SOMMARIO

---

L'introduzione dei costumi tecnici nel nuoto ha portato miglioramenti senza precedenti sulla prestazione. I miglioramenti nella velocità di nuoto sono stati attribuiti dalla letteratura a riduzioni nelle resistenze idrodinamiche sul nuotatore. Tuttavia, gli effetti specifici dovuti all'utilizzo di questo tipo di costume non sono ancora completamente chiariti. Questa tesi aveva l'obiettivo di indagare gli effetti dell'utilizzo del costume tecnico sul galleggiamento statico, sulla posizione del corpo e sulla resistenza idrodinamica in avanzamento passivo. Nello studio preliminare sono stati misurati la spinta idrostatica, i volumi polmonari dinamici e la circonferenza toracica di 9 nuotatori che indossavano un costume tradizionale o un costume tecnico in gomma sintetica. Indossare il costume tecnico ha determinato una riduzione significativa del galleggiamento statico, e la compressione toracica causata da questo tipo di costume potrebbe avere una relazione con la significativa riduzione dei volumi polmonari misurati quando il nuotatore indossa questo tipo di costume. Un'ulteriore analisi prevedeva il traino passivo di 14 nuotatori che mantenevano la miglior posizione idrodinamica di scivolamento. Il protocollo è stato ripetuto indossando un costume tradizionale, tecnico in tessuto e tecnico in gomma. La posizione del corpo in avanzamento è stata misurata con un'analisi cinematica. La resistenza passiva indossando i costumi tecnici è risultata significativamente minore per entrambi i costumi tecnici rispetto alla prova con costume tradizionale. L'analisi condotta attraverso modelli di regressione lineari ha mostrato che una parte della riduzione nella resistenza passiva era legata a proprietà intrinseche dei costumi tecnici. Tuttavia, anche l'area di impatto frontale determinata dall'inclinazione del tronco del soggetto in

scivolamento e l'inclinazione del segmento gambe hanno mostrato una marcata influenza sulla resistenza idrodinamica passiva, presente a prescindere dal tipo di costume utilizzato. Pertanto, oltre alla riduzione di resistenza dovuta al materiale di composizione del costume, la riduzione di drag durante lo scivolamento passivo effettuato con costume tecnico da nuoto è attribuibile ad una variazione della posizione del corpo del nuotatore.

## ABSTRACT

---

The introduction of technical bodysuits have abruptly improved the swimming performance. In the literature, the improvements in swimming speed are attributed to the reduction of the hydrodynamic resistance acting on the swimmer. However, the specific effects due to wearing this kind of bodysuit are not yet completely clear. The aims of this thesis were to investigate the effects of wearing the technical bodysuits on the static buoyancy, on the body position, and on the passive drag. In a preliminary study the hydrostatic lift, the dynamic lung volumes and chest circumference were measure in 9 swimmers while wearing a traditional swimsuit or a bodysuit made of synthetic rubber. The technical bodysuit reduced significantly the static buoyancy. The chest compression produced by this bodysuit may have a relationship with the significant reduction in lung volumes measured when the swimmer wore the technical bodysuit. In a following analysis, 14 swimmers were passively towed in the best hydrodynamic position of gliding. The protocol was randomly repeated using a traditional swimsuit, a textile bodysuit, and a rubber bodysuit. The body position during gliding was measured with kinematic analysis. The passive drag was significantly lower in the trials with both the examined technical bodysuits, than in those performed using the traditional swimsuit. The analysis performed using linear regression models showed that a fraction in the drag reduction was due to the intrinsic properties of the technical swimsuit. However, also the frontal impact area determined by the trunk incline of the subject in gliding had a marked influence on passive drag, present in all the swimsuit conditions. Therefore, in addition to the low resistance due to the fabric of the swimsuit,

the passive drag reduction of the swimmer when wearing a technical bodysuit is explainable by a change in the body position of the swimmer.

# 1. INTRODUZIONE

---

Durante l'ultimo decennio il nuoto ha subito un incremento senza precedenti dal punto di vista prestativo. Lo sviluppo dei costumi tecnici, coprenti quasi in toto il corpo del nuotatore, è coinciso con l'inizio del nuovo millennio e il dibattito sulle ricadute nella prestazione ha dominato questa decade. Certamente parte di questi successi sono dovuti al talento atletico ed al miglioramento delle metodologie di allenamento, ma l'innovazione tecnologica in ambito natatorio ha senza dubbio contribuito al miglioramento di tale prestazione.

Il miglioramento di un record del mondo è giustificato come il risultato di una combinata azione di fattori inclusi il numero di partecipanti, migliore nutrizione, metodi di allenamento innovativi e aumento della tecnica sportiva (Nelson and Pike, 1978).

Gli aspetti demografici ed economici contribuiscono in maniera determinante nel miglioramento della qualità della prestazione sportiva nell'atleta. Alcuni autori mostrano come indicatore di prestazione sportiva il reddito pro-capite della nazione poiché questo può determinare la disponibilità di migliori condizioni in termini di strutture e risorse economiche (Bernard and Busse, 2004; Johnson and Ali, 2004). Così anche il numero della popolazione (Bernard and Busse, 2004) o la posizione geografica (Johnson and Ali, 2004) della nazione di appartenenza incide sulla prestazione sportiva.

L'uomo è in continua esplorazione dei limiti della prestazione umana e un ulteriore fattore, oltre a quelli presentati, in grado di giustificare il record è ad oggi l'innovazione tecnologica. Gli sviluppi tecnologici dei dispositivi sportivi sono in grado di innalzare la prestazione significativamente (Luebbers 2009). Sebbene molti fattori incidano nel miglioramento dello sport, la tecnologia sembra essere il fenomeno più

controverso poiché mette in discussione la legittimità della prestazione, mettendo in dubbio talvolta la lealtà del vantaggio conseguente. Molte strutture dedicano grandi investimenti di denaro allo sviluppo dello sport, ed allo stesso modo molte aziende fanno della prestazione sportiva un indice di fatturato. Governi nazionali e corporazioni internazionali investono miliardi annualmente per sostenere l'interesse pubblico in attività di sanità e ricreative (Magdalinski, 2009). Lo sport è uno dei primi interessi nello sviluppo di nuove tecnologie in settori riguardanti ergonomia, aero-idrodinamica, antropometria e biomeccanica per il grande ritorno in termini economici e di visibilità pubblicitaria.

Numerosi esempi di innovazione tecnologica in ambito sportivo si sono susseguiti nella storia: negli anni sessanta con l'avvento di materiali come l'alluminio e la grafite il salto con l'asta incrementò la prestazione in tre anni di oltre 60 cm quando l'incremento annuale medio era di 0.5 cm. Nel 1996 il ciclismo assistette ad un'eccezionale record dell'ora ottenuto dallo scozzese Boardman grazie ad una bicicletta in fibra di carbonio con profilo aerodinamico. Alle Olimpiadi di Atlanta Michael Johnson divenne il primo uomo a vincere sia 200 che 400m nella stessa edizione vestendo innovative scarpe da corsa ultra leggere e focalizzando l'attenzione sull'impatto performante degli indumenti utilizzati, che porta oggi molti velocisti ad indossare specifiche tute che riducono le resistenze aereodinamiche. Alcuni studi hanno analizzato come le innovazioni di strumentazioni sportive possano avere un impatto sul record come Kuper (2004) che evidenzia il positivo impatto del pattino da ghiaccio mobile sulla prestazione del pattinaggio di velocità, grazie all'effetto di maggiore mobilità del piede.

Nel nuoto si è sempre ricercata maggior velocità apportando innovazione anche prima dell'avvento dei costumi tecnici: tessuti con materiali maggiormente scorrevoli,



corsie con minor disturbo ondoso, blocchi di partenza più performanti. I francesi ai Giochi Olimpici del 1924 furono i primi ad utilizzare la vasca da 50 metri per favorire i nuotatori. Con lo stesso scopo nel 1936 a Berlino sono state introdotte i primi blocchi di partenza che hanno visto la loro ultima evoluzione nel 2009 con l'approvazione da parte della Federazione Internazionale di Nuoto (F.I.N.A.) dei blocchi di partenza con l'ala posteriore inclinabile, per favorire una miglior biomeccanica di spinta in partenza. Tornando alle origini anche la prima virata con rotazione del corpo, introdotta nel 1950 e gli occhialini (Montreal, 1976) avevano l'obiettivo di migliorare le condizioni del nuotatore per favorire il risultato agonistico. Nel corso del ventesimo secolo ci sono stati importanti cambiamenti regolamentari anche dal punto di vista tecnico. I nuotatori specialisti di rana dagli anni '60 sono autorizzati ad immergere la testa completamente sotto l'acqua o ad eseguire una fase subacquea che non era permessa precedentemente. Così dagli anni '90 la possibilità di virare con il corpo prono nel dorso permise di incrementare la velocità della specialità. Altra importante innovazione tecnica fu l'impossibilità di nuotare sotto la superficie dell'acqua per oltre una certa distanza, norma introdotta a Seoul nel 1988 a seguito di una serie di vittorie caratterizzate da lunghe fasi subacquee.

Nel corso degli ultimi anni, numerose strutture di impianti sportivi per il nuoto hanno agevolato la tecnologia in funzione della velocità del nuotatore. Particolari aspetti di progettazione permettono di rendere la piscina più veloce come la profondità della piscina o effetti di ritorno ondoso che sfavoriscono il nuotatore. Ancora la maggior larghezza delle corsie o il materiale delle corsie stesse possono favorire il nuotatore come l'attenzione a progetti idraulici e di illuminazione per la struttura che accoglie la vasca (es. Water Cube, Pechino 2008). Tutti questi sono fattori con un impatto minimo sulla prestazione. Non sono paragonabili agli effetti di strumentazioni ad impatto maggiore

dove l'attrezzo è determinante sulla performance come sci, racchette, asta per saltare o attività sportive in cui le capacità del soggetto gestiscono elementi che condizionano in toto il risultato (sport motoristici o d'aria).

Il vestire un nuotatore di un materiale più scorrevole ha l'obiettivo di aumentare la velocità. L'introduzione in vasca di questo tipo di costume ha significativamente condizionato la prestazione (O'Connor, 2011) con un impatto che appare maggiore di qualsiasi altro elemento tecnologico introdotto nella storia del nuoto. I costumi da competizione ad oggi includono tessuti e disegni innovativi che hanno l'obiettivo di ridurre le resistenze offerte dall'acqua al nuotatore e prevenire la fatica del nuotatore. L'obiettivo di questa tesi è quello di fornire ulteriori conoscenze riguardo gli effetti idrodinamici dei costumi tecnici nel nuoto.

## 2. IL COSTUME DA NUOTO

---

L'idea di coprire il corpo del nuotatore ha inizialmente una motivazione differente dal miglioramento della prestazione. I nuotatori maschi fino agli anni '40 indossavano indumenti che coprivano buona parte del corpo. In questo caso non vi era un obiettivo di performance ma una imposizione della società e del senso del pudore che obbligava a non presentarsi con il corpo scoperto. Questo è mostrato nella figura 1 nei nuotatori olimpici della squadra britannica a Stoccolma 1912.

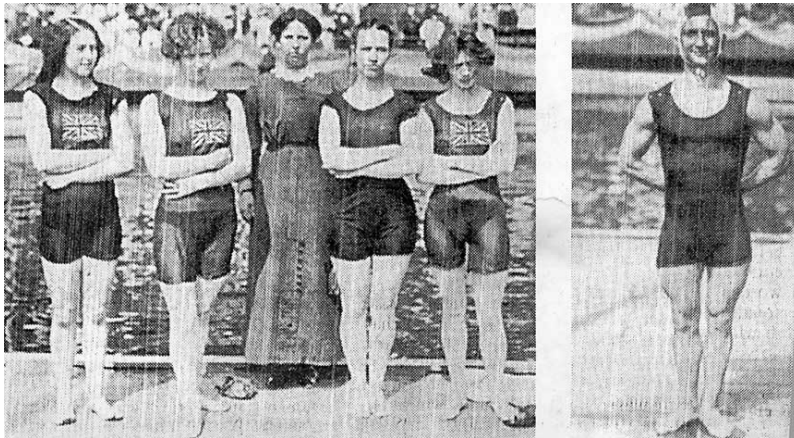


Figura 1. Squadra olimpica britannica di nuoto alle Olimpiadi 1912.

Il succedersi degli anni e la maggior attenzione al risultato cronometrico ha spostato l'attenzione del costume a modelli maggiormente performanti. Nasce la considerazione che il costume può incidere sulla prestazione. Il costume dagli anni 40/50 copre solamente le parti essenziali del corpo e nei tecnici e nuotatori si manifesta l'idea che la scorrevolezza del materiale e del corpo possa favorire un miglior

avanzamento. Così l'idea di ungersi (ad oggi non consentito dal regolamento) o depilarsi, con l'immagine che una superficie con minor rugosità possa favorire lo scorrimento nell'acqua. Una rappresentazione di questa epoca di nuoto nella figura 2 con le sette medaglie olimpiche del californiano Mark Spitz a Monaco '72.

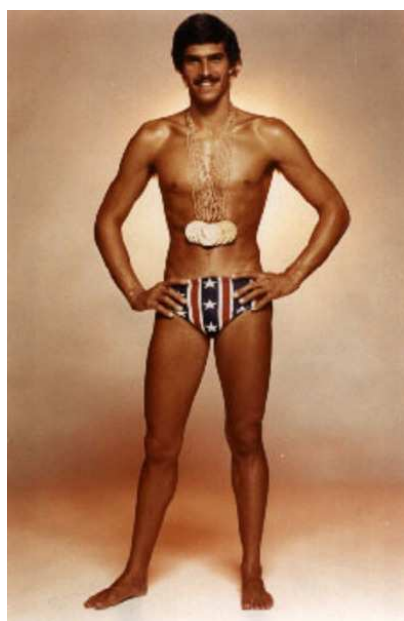


Figura 2. Il californiano Mark Spitz alle Olimpiadi di Monaco '72.

La pratica della depilazione nel nuotatore e la relazione con la prestazione è stata oggetto di studio di un gruppo di ricercatori statunitensi con il lavoro che per primo pone l'attenzione sulle reazioni idrodinamiche dell'acqua alle differenti superfici del corpo del nuotatore (Sharp, 1989). Gli autori mostrano un significativo miglioramento della velocità di scivolamento passivo del nuotatore a seguito della depilazione di gambe, braccia e tronco di un gruppo sperimentale di 9 soggetti comparato a altri 9 che non avevano effettuato questa metodica. I soggetti hanno inoltre eseguito un test di velocità massima di 360 metri, pre e post depilazione nel gruppo sperimentale mentre nelle stesse condizioni per il gruppo di controllo. Le variabili energetiche di concentrazione ematica di lattato e massimo consumo di ossigeno misurate nei test sui

soggetti hanno mostrato una significativa riduzione ed un aumento della ampiezza di bracciata è stato misurato. Gli autori dichiarano che la depilazione riduce la resistenza idrodinamica e il costo energetico del nuotatore.

La concezione che il costume sia parte essenziale della prestazione del nuotatore è condivisione tecnica. Già nel 1975 Van Manen ed i suoi collaboratori analizzarono l'effetto di un costume coprente mostrando un grande miglioramento della velocità di avanzamento (9%). Con l'invenzione del nylon come materiale di costituzione del costume da nuoto, notevoli miglioramenti furono apportati nel modello del costume tradizionale da nuoto, con profili e disegni più idrodinamici. Nel 1980 a Mosca furono presentati dall'azienda francese Arena i primi costumi da femmina con un particolare profilo sulle spalle che garantiva maggiore vestibilità e miglior scorrevolezza sulla parte posteriore del corpo ([www.arenainternational.com](http://www.arenainternational.com)). Nel 1992, ai Giochi Olimpici di Barcellona, la multinazionale australiana Speedo produce un costume (S2000, Figura 3) promosso dall'azienda come "a basso coefficiente di resistenza idrodinamica", dall'aspetto in materiale simile alla gomma ed indossato dal 53% degli atleti medagliati. Quattro anni dopo, ad Atlanta 1996 è la volta del tessuto Acquablade, in modelli con particolari profili che convogliano l'acqua creando differenti velocità attorno al corpo ([www.speedo.com](http://www.speedo.com)). Anche questa innovazione venne utilizzata dal 77% dei vincenti in tale evento ([www.speedo.com](http://www.speedo.com)). Nel 1997 ancora Arena, a seguito di lunghi periodi di ricerca e sviluppo uniti a protocolli di qualità estremamente rigorosi, presenta un tessuto nominato X-Flat con una trama molto sottile e leggero per il 25% in più dei prodotti in commercio ([www.arenainternational.com](http://www.arenainternational.com)).

Tuttavia, prendendo idea dalle innovative tute utilizzate negli sport ad alta velocità (ciclismo su pista, discesa libera) la vera rivoluzione nel nuoto iniziò nel 1999

con l'approvazione da parte della F.I.N.A., dell'uso dei costumi Speedo Fastskin, Arena Powerskin e Tyr Aquapel (Figura 3) alle Olimpiadi di Sydney 2000. Questi costumi erano modellati sul corpo dei nuotatori, in alcune occasioni disegnati su misura vestendo gran parte del corpo dell'atleta, con l'idea di ridurre la resistenza idrodinamica grazie alla copertura della superficie di contatto con l'acqua con un materiale in tessuto. A seguito dei Giochi Olimpici del 2000 riguardo la possibilità di utilizzo dei costumi tecnici, nacquero numerose polemiche. Le norme della Federazione Internazionale Nuoto (F.I.N.A.) riguardo ciò che il nuotatore poteva indossare in gara erano ben delineate:

“A nessun nuotatore è consentito di usare o indossare qualsiasi dispositivo che possa aiutare la sua velocità, galleggiabilità o resistenza durante una gara” (F.I.N.A. rule SW 10.8)

Siccome non esistevano prove scientifiche che questo tipo di costume potesse incidere favorevolmente su i parametri menzionati e nonostante le controversie iniziali, il comitato scientifico della Federazione Internazionale Nuoto ritenne che tale indumento tecnologico non rappresentava uno strumento illegittimo, ed il costume tecnico iniziò a modificare la storia del nuoto.

Il costume tecnico inizia a modificare le metodologie e conoscenze dell'allenatore, preso alla sprovvista da una innovazione che lo costringe a trovare nuove competenze. Le aziende interessate investono denaro nella ricerca e sviluppo ed il costume tecnico diventa l'indicatore della qualità dell'azienda, con importanti ritorni economici e di immagine. Il costume diventa interesse della scienza del nuoto, i migliori

ricercatori del settore ne indagano gli effetti ed i benefici sulla prestazione, oltre alla oggettiva influenza sul risultato. Nonostante inizialmente la comunità scientifica non approvi i significativi vantaggi promossi dalle aziende sugli effetti del costume tecnico (2% di riduzione del drag contro 7,5% proposto dalle aziende, Toussaint, 2002) nel corso dell'inizio del nuovo secolo numerose aziende si alternano nella innovazione di modelli di costume tecnico, con nuovi tessuti e nuovi disegni.

L'ingegneria tessile approda in vasca nel 2008 quando la F.I.N.A. approva l'utilizzo del nuovo prodotto della Speedo, l'LZR Racer (Figura 3). Si tratta di un costume con la base in tessuto, elastene e nylon, con l'inserimento di pannelli esterni in poliuretano, un polimero della gomma. Indubbiamente il nuovo costume veloce dell'azienda australiana rappresenta un lungo lavoro di sviluppo e ricerca da parte dei laboratori della stessa multinazionale (Matthews Jerney, 2008), che approda anche nella bibliografia scientifica in ambito di scienze dello sport con un articolo del team di progettazione del costume (Bixler, 2007). Allo stesso modo è però fonte di critiche sulla conformità del prodotto rispetto ai regolamenti della Federazione Internazionale Nuoto. Il modulo delle "Regole Generali F.I.N.A." definito "Requisiti F.I.N.A. per l'approvazione dei costumi" al punto riguardante i "materiali" ([www.fina.com](http://www.fina.com)) riportava chiaramente:

“Nessuna applicazione può essere aggiunta al tessuto. Differenti tessuti possono essere utilizzati sul costume.” (F.I.N.A. Rule GR 5, 3.1)

Da regolamento si comprendeva come non fosse permessa l'applicazione di un materiale differente dal tessuto, come il polimero della gomma. Sfruttando una duplice

traduzione del termine “fabric” con cui nel regolamento F.I.N.A. si intende “tessuto”, l’azienda australiana interpreta il termine con il significato di “materiale”, richiedendo ed ottenendo l’omologazione del prodotto.

Il lancio di questo modello nei mesi precedenti l’evento olimpico rappresenta per l’azienda un’importante colpo di mercato, con l’utilizzo dello stesso dal 92% degli atleti medagliati ai Giochi Olimpici di Pechino 2008. Il costume è frutto di parecchi anni di evoluzione studiato nei centro di ricerca Langley della National Aeronautics and Space Administration (NASA), dell’Australian Institute of Sport (AIS) di Sydney, e delle Università di Otago (Nuova Zelanda) e Nottingham (Inghilterra). Lo sviluppo investe numerosi settori scientifici: la fluidodinamica, la biomeccanica, lo sviluppo tessile. Dopo molti test la scelta del materiale innovativo cade sul poliuretano per le strutture principali, con pannelli saldati al laser per evitare le cuciture, impermeabili e idrorepellenti nelle zone ritenute di maggior pressione e contatto con l’acqua. Si cura in modo particolare la massima vestibilità e compressione del corpo.

Appena prima della rassegna Olimpica di Pechino vengono concepiti in tutta fretta una serie di costumi integrali dalle più importanti case produttrici del settore sul modello dell’LZR che non raggiungono però la stessa qualità performante dell’azienda australiana nel poco tempo disponibile. L’impatto di questi prodotti tecnologici sulla prestazione natatoria ha pochi precedenti. I primati mondiali realizzati nella rassegna olimpica cinese sono 25, su un totale di 32 eventi natatori. Di questi, un unico primato olimpico è sopravvissuto dalla precedente Olimpiade. L’esempio dei 100 stile libero uomini riporta con chiarezza l’influenza della tecnologia sulla prestazione mondiale. Nell’arco temporale 2000-2008 la barriera dei 48” era stata superata da un solo atleta. Nel corso del 2008 ben 11 nuotatori hanno nuotato al di sotto di tale tempo.



Le aziende maggiori del settore, su tutte Arena e Speedo, iniziano l'investimento di ingenti risorse a seguito del notevole vantaggio ottenuto con l'LZR. Un nuovo costume, prodotto dalla neonata azienda lombarda Jaked, il J01 (Figura 3), in brevissimo tempo diviene il prodotto di mercato. Sfruttando l'innovazione dell'LZR il costume Jaked è interamente costituito da materiale derivato da polimeri della gomma. L'azienda dichiara di aver messo in produzione un rivoluzionario materiale a base di poliuretano, poliamide e lycra che per la sua conformazione consente la massima vestibilità, grazie alla termosaldatura ed alla totale assenza di cuciture. La scorrevolezza del materiale è elevata e la forte compressione dei muscoli dovuta alla poca elasticità della tuta riducono notevolmente lo sforzo ([www.jaked.it](http://www.jaked.it), 2009).

La tendenza evidenziata a Pechino si amplifica ai successivi Campionati Europei Indoor di Rijeka nel dicembre 2008, con 32 primati europei e 10 mondiali su 38 eventi natatori. Il costume dell'azienda lombarda è legata alla nazionale italiana e invade il mercato mondiale per la indubbia qualità performante.

L'impatto di questi indumenti tecnologici sul risultato costringe la Federazione Internazionale a ridefinire le normative riguardo il costume, per regolarizzare l'omologazione in vista degli imminenti Campionati Mondiali di luglio 2009 in programma a Roma. I principali aggiornamenti alle normative riguardo i costumi, emersi dal incontro ufficiale F.I.N.A. di marzo 2009 e valide fino a dicembre 2009, limitavano alcuni aspetti lasciati precedentemente all'interpretazione. Non si vincola in maniera importante il disegno del costume ma si chiarisce che è non consentita la copertura di collo e braccia, aggiungendo questo obbligo al regolamento 2007 che prevedeva di lasciare scoperte solo mani, piedi e capo. Vengono inserite diverse condizioni riguardo gli ambiti maggiormente sottoposti a innovazioni tecnologiche,

quali quello dei materiali utilizzati e i procedimenti per l'omologazione di tali materiali. Si chiarisce che lo spessore del costume non può superare il millimetro, evitando le soluzioni che possano livellare la superficie corporea o aumentare il galleggiamento; riguardo tale parametro, è definito il limite di 1 Newton al galleggiamento statico del costume e viene specificato che l'unione di più materiali sovrapposti non deve creare depositi di aria, con l'obiettivo di non modificare la densità corporea naturale del nuotatore. Conseguentemente a questo ultimo aspetto, si modifica e si chiarisce l'importante disposizione in cui si concede l'applicazione di differenti materiali su di un unico costume. La specifica vieta ciascuna personalizzazione della forma del modello di costume precedentemente omologato.

Anche i più scettici hanno dovuto constatare che i 130 primati mondiali che sono crollati in 10 mesi, hanno un collegamento molto stretto con l'innovazione del costume tecnico.

Le aziende del settore, su tutte Arena e Speedo, continuano l'investimento di risorse a seguito del notevole vantaggio ottenuto con i nuovi costumi definiti "gommati" nei giochi olimpici 2008. Nuovi importanti progetti prendono forma come Powerskin X-Glide di Arena, un full body multi-strato con un rivestimento in neoprene che trattiene aria, aumenta le galleggiabilità e riduce l'attrito ([http://www.arenaitalia.it/racing\\_it\\_0\\_1\\_17.html](http://www.arenaitalia.it/racing_it_0_1_17.html)). Per X-Glide di Arena è utilizzato un tessuto ultra-leggero che aumenta la compressione muscolare ed è dotato di una lega di titanio tra gli strati interno ed esterno della maglia che stabilizzare la temperatura corporea ([http://www.arenaitalia.it/racing\\_it\\_0\\_1\\_17.html](http://www.arenaitalia.it/racing_it_0_1_17.html)).

Altri prodotti come Adidas Hydrofoil, Tracer dalla statunitense Tyr e Nero Comp dalla Nuova Zelanda per BlueSeventy vengono presentati in vista dei campionati del

mondo 2009. La concorrenza sul prodotto da indossare è ora importante e non più solamente Speedo e Jaked dominano il mercato. I nuotatori ricercano il costume più performante, i media e l'interesse del pubblico per il nuoto aumenta. Vengono legati alle aziende come testimonial i campioni del nuoto con ingaggi senza precedenti cercando in ogni modo di beneficiare del momento redditizio di questo sport.

L'evoluzione della tecnologia nel nuoto coglie impreparato il comitato scientifico internazionale della F.I.N.A. preposto all'approvazione dei costumi. Numerosi dibattiti sulla legittimità di questi indumenti e portano l'opinione comune a sostenere che questa nuova tecnologia di costumi possa dare un vantaggio maggiore del doping (Jackson, 2009). Nuovi materiali e nuovi progetti si riversano negli uffici F.I.N.A. in richieste di omologazione. La federazione internazionale cerca di limitare l'espansione dell'innovazione poiché non preparata nel controllo qualitativo dei prodotti dei quali si chiede approvazione. Alcune nuove normative vengono poste come:

“L'applicazione di differenti materiali non deve creare effetti di intrappolamento di aria” (F.I.N.A. Rule GR 5, 3.1, F.I.N.A. Requirements for Swimwear Approval 2009)

Questa direttiva ai fini di non incrementare il galleggiamento del nuotatore mediante depositi di aria tra il costume e la superficie del corpo, poiché i materiali di costituzione dei costumi sono ora impermeabili. Una prima non approvazione del costume X-Glide, ha portato Arena a sviluppare un modello X-Glide rivisto (Figura 3) con l'obiettivo di rientrare nei canoni della nuova normativa, inserendo bande in tessuto poste lateralmente al costume per favorire l'uscita di aria. Questo modello è stato il costume

più utilizzato nel corso dei Campionati Mondiali di Roma del luglio 2009 con 14 medaglie d'oro, di cui 13 Record del Mondo superando J01 Jaked e LZR Speedo (Neiva, 2011) che fino a solamente un anno prima non permettevano competizione.

L'evento di Roma ha rappresentato il culmine dell'evoluzione tecnologica nel nuoto. Nel corso di una sola manifestazione, il Mondiale di Roma, sono stati battuti 43 record mondiali, avvenimento che non ha precedenti nella storia del nuoto internazionale (O'Connor, 2011).

La Federazione Internazionale Nuoto, sotto forti pressioni dell'opinione pubblica e del mondo del nuoto, decide di adottare regolamentazioni che possano limitare questa espansione di risultati. Dal gennaio 2010 entrano in vigore direttive che mettono al bando l'ultima generazione di costumi:

“I costumi per uomo non possono estendersi sopra l'ombelico e sotto il ginocchio (figura 3), per le donne non possono coprire il collo ed estendersi sulle spalle e oltre il ginocchio (F.I.N.A. Rule GL 3.1.1). Tutti i costumi devono essere costituiti di materiale tessile. (F.I.N.A. Rule GL 3.1.2). Tutti i costume approvati dalla F.I.N.A. devono portare una corrispondente etichetta di approvazione” (F.I.N.A. Rule GL 12.1, F.I.N.A. Requirements for Swimwear Approval 2010).

Queste normative hanno riportato il nuoto in linea con il trend di miglioramento prestativo precedente al 2008. Dall'entrata in vigore di questo regolamento ad oggi solamente 2 record mondiali sono stati battuti in ambito maschile, mentre nessun record si registra in ambito femminile.

Le Olimpiadi di Londra 2012 segneranno la prossima fase di evoluzione dei costumi nel nuoto.

<b>ANNO INTRODUZIONE</b>	<b>MODELLO COSTUME</b>	<b>IMMAGINE COSTUME</b>
1992	Speedo S2000	
2000	Speedo Fastskin Arena Powerskin	
2004	Adidas JetConcept	
2005	Arena Powerskin X-Treme	
2008	Speedo LZR	
2009	Jaked J01 Arena X-Glide	
2010	short bodysuit	

Figura 3. Evoluzione del costume tecnico.

### **3. I COSTUMI TECNICI: IMPATTO SULLA PRESTAZIONE**

---

Come indicatore di prestazione, l'abbattimento del record o il miglioramento del tempo rispecchia il grado di evoluzione della prestazione tecnica. Dall'introduzione dei Giochi Olimpici moderni nel 1986 da parte di Pierre de Coubertin cento sedici anni di primati mondiali nel nuoto rappresentano la progressione della prestazione umana dovuta a nuove frontiere metodologiche, tecniche o strumentali.

Il nuoto e l'atletica leggera sono attività comparabili per quanto riguarda l'esperienza agonistica a livello olimpico e l'impatto dell'attrezzatura sulla prestazione. La comparazione dell'andamento del record nelle due attività può favorire la comprensione del reale sviluppo di uno sport. Come esempio, una distanza di gara simile tra le due attività a livello temporale sono i 400 metri piani maschili, in cui il primato del mondo dal 1990 al 2011 è stato battuto 21 volte, con i 100 metri stile libero maschili, superati da 48 primati nello stesso arco temporale (O'Connor, 2011). Dal 1990 al 2011 gli atleti corrono più velocemente del 2.85% ma nuotano più veloci del 5.86%. Questo miglioramento non è un fattore dipendente dal sesso (per le donne: 400 m piani miglioramento 3.29%, 100 stile libero 5.57%) e nemmeno dalla distanza di gara (3.59% nei 3000 metri piani e 5.76% nei 1500 metri stile libero, O'Connor, 2011). La figura 4 mostra l'andamento del record del mondo nei 100 stile libero donne dal 1990 al 2011.

Nel corso dell'ultimo Campionato del Mondo di Roma 2009 in vasca da 50 metri sono stati battuti 43 record mondiali. Nei 20 eventi gara per ciascun sesso, 15 hanno subito un miglioramento del primato per i maschi e 17 per le femmine durante gli otto giorni di gare a Roma (SwimNews. 2011). Queste prestazioni non hanno precedenti, mai

erano stati battuti un numero così elevato di primati in un unico evento. Anche l'incremento non significativo del numero di soggetti praticanti o la presenza di un talento sportivo che innalza la prestazione media non giustificano il risultato di Roma 2009 (O'Connor, 2011). Il costume ha avuto un ruolo significativo in questo miglioramento (O'Connor, 2011).

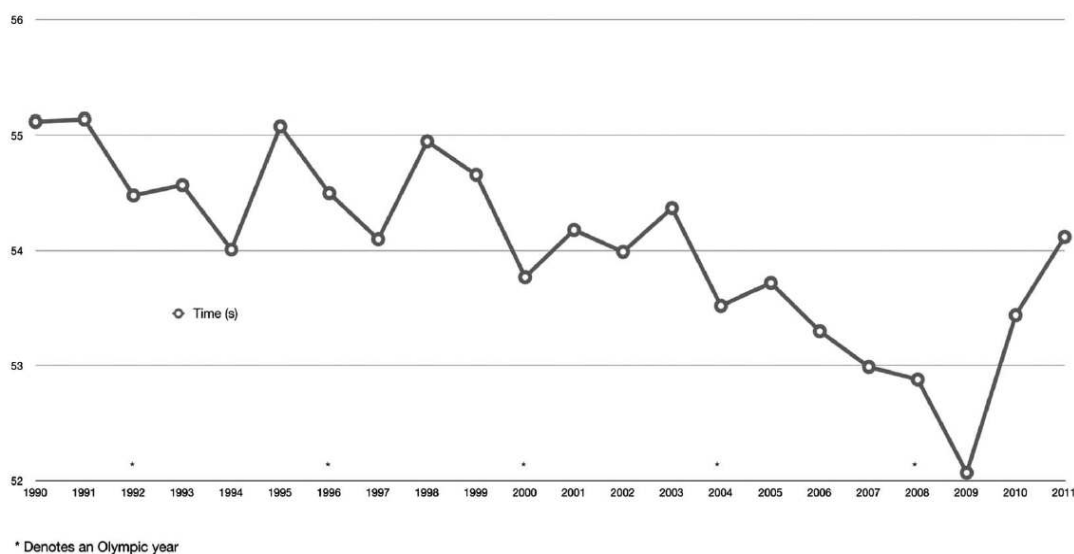


Figura 4. Record del mondo nei 100 stile libero donne dal 1990 al 2011 (immagine tratta da O'Connor, 2011)

Nel corso di questi campionati il 98% di atleti ha utilizzato un costume coprente tutto il corpo (Neiva, 2011). Il costume scelto dalla maggior parte degli atleti risulta essere il Jaked J01 Full seguito dall'Arena X-Glide Full, in totale indossati dal 82% dei nuotatori. Al contrario il costume più vincente, come riportato da Neiva (2011) è l'X-Glide poichè il 41.2% degli atleti che lo indossavano ha raggiunto il podio, seguito da Jaked J01 (29.4%) e Speedo LZR (9.8%).

Berthelot nel 2010 ha indagato l'evoluzione annuale delle prestazioni nel nuoto dal 1990 al 2009 con l'obiettivo di individuare eventuali improvvisi incrementi sulle

prime 10 prestazioni mondiali. La figura 5 riporta il numero di valori significativi sommati per ciascuna annata, quindi il numero di prestazioni significativamente superiori alla prestazione media degli ultimi 20 anni, riportati in gruppi suddivisi per anno solare.

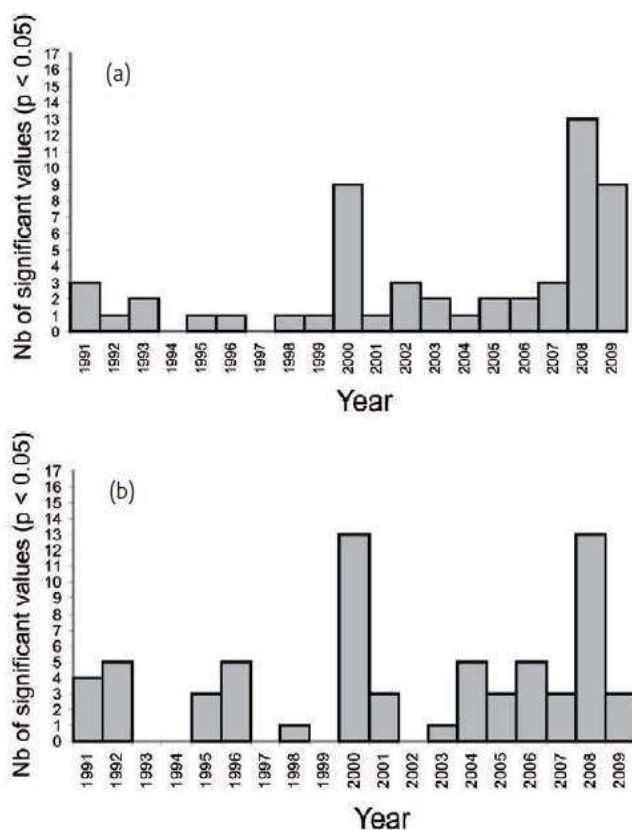


Figura 5. Numero di valori significativi di incremento di prestazione per anno, negli uomini (a) e nelle donne (b) (immagine tratta da Berthelot 2010)

L'autore mostra tre picchi di variazioni evidenti negli anni 2000, 2008 e 2009. Questi tre momenti rappresentano l'introduzione di costumi tecnici o costruiti con materiali innovativi. L'autore suggerisce che questi elevati incrementi di performance siano attribuibili all'introduzione di nuove generazioni di costumi. Nel 2000 il primo costume che copre il corpo in toto porta un miglioramento medio di prestazione dello  $0.74\% \pm 0.26\%$  per gli uomini e dell' $1.00\% \pm 0.37\%$  per le donne. Nel 2008 l'azienda



Speedo introduce LZR con pannelli in poliuretano, l'autore mostra un incremento di prestazione dell' $1.2\% \pm 0.5\%$  e  $1.0\% \pm 0.6\%$  rispettivamente per gli eventi di uomini e donne, indipendentemente da distanza o specializzazione di gara (a parte le gare di 1500 uomini e 800 donne). Nel 2009 il primo costume in materiale interamente derivato dalla gomma mostra un alto numero di significativi incrementi negli uomini con un incremento di prestazione dello  $0.68\% \pm 0.55\%$  ma minore nelle donne  $0.27\% \pm 0.70\%$ . L'autore riporta l'effetto cumulativo di queste tre annate di innovazioni tecnologiche in un incremento totale medio della prestazione del  $2.58\% \pm 1.29\%$  e  $2.24\% \pm 1.64\%$  per uomini e donne, un progresso comparabile solamente al periodo di introduzione del nuoto come disciplina nei Giochi Olimpici moderni (1896-1914, Berthelot, 2008) o all'innovazione tecnologica in altre attività sportive (es. ciclismo anni '80 con l'introduzione delle biciclette in fibra di carbonio). Considerando una prestazione sui 100 metri di 60" il miglioramento suggerito dall'autore si attesta sui 2.5 secondi, un valore che permette di comprendere l'impatto del costume tecnico sull'evoluzione del nuoto.

## 4. RESISTENZE IDRODINAMICHE DEL NUOTATORE

---

I fattori che determinano la prestazione nel nuoto derivano dalla abilità di generare forze propulsive e ridurre la resistenza di avanzamento offerta dal fluido (*drag*). Nel rendimento della macchina umana, il grado di energia prodotta per avanzare in rapporto alla quantità di energia liberata determinano l'efficienza del sistema nuotatore. Infatti, come indicato da Di Prampero (1986), la massima velocità della locomozione umana è indicata dal rapporto tra due parametri:

$$V_{max} = E_{max} / C$$

dove  $E_{max}$  è la potenza metabolica prodotta dal nuotatore (derivata dalla somma delle risorse aerobiche e anaerobiche) e  $C$  è il costo energetico per percorrere una unità di distanza ad una determinata velocità.

Ad una variazione del costo energetico della nuotata è quindi associata una variazione della velocità di progressione del soggetto. Il costo energetico del nuoto ad una determinata velocità di avanzamento è dato dall'equazione (Zamparo, 2005):

$$C = Wd / (\eta_P \cdot \eta_O)$$

dove  $Wd$  rappresenta la potenza meccanica prodotta per vincere il drag,  $\eta_P$  l'efficienza propulsiva ovvero il rapporto tra la potenza meccanica totale prodotta per il movimento ( $W_{tot}$ ) e la potenza meccanica prodotta, utile all'avanzamento, per vincere il drag ( $Wd$ ).

$\eta_O$  è l'efficienza grossa, ovvero il rapporto tra la potenza metabolica prodotta dal nuotatore ( $E$ ) e la potenza meccanica totale prodotta per il movimento ( $W_{tot}$ ).

La potenza meccanica è il prodotto della forza per velocità, quindi la forza drag ( $Fd$ ) è il rapporto tra la potenza meccanica prodotta per vincere il drag e la velocità ( $v$ ) (Toussaint, 1992).

Avanzando ad una velocità costante la forza prodotta per vincere il drag ( $F_p$ ) è uguale alla forza drag ( $F_d$ , Toussaint, 1992):

$$\text{se } v \text{ è costante } F_p = F_d$$

La misurazione della forza drag e della velocità del nuotatore può essere determinante per stimare la propulsione e la potenza prodotta dal nuotatore.

Nel nuoto, tuttavia, non esiste una velocità costante di avanzamento ma ci sono variazioni di velocità del nuotatore all'interno del ciclo di bracciata dovute all'alternanza dell'impulso dato dagli arti (Barbosa, 2010). I cambi di velocità definiscono le fluttuazioni del nuotatore che dipendono dalla forza risultante applicata e dalle forze inerziali come descritto dalla seconda equazione di Newton:

$$f = m * a$$

dove  $f$  è la forza,  $m$  è la massa e  $a$  è la sua accelerazione. La forza drag è quindi relazionata alla massa del nuotatore ed alla sua accelerazione più un terzo componente definito massa aggiunta, creata dalla massa d'acqua che si mette in moto attorno al nuotatore durante il suo spostamento, secondo l'equazione:

$$F_d = (BM + AM) * a$$

dove  $BM$  è la massa corporea e  $AM$  è la massa aggiunta.

Il calcolo della massa aggiunta è determinato secondo Stager (2005) dall'equazione:

$$AM = C_a * v * \rho$$

dove  $C_a$  è un fattore adimensionale definito coefficiente di massa aggiunta e  $\rho$  è la densità dell'acqua.

La massa aggiunta, definita anche reazione all'accelerazione nel fluido e generata dalla reazione all'inerzia di accelerazione, dipende dalla forma e dalle caratteristiche del flusso attorno al corpo. La massa aggiunta è materia addizionale che si somma alla

massa che il nuotatore deve mettere in moto, aumentandone la forza necessaria ed il dispendio energetico (Caspersen, 2010).

La stima della forza drag del nuotatore è quindi uno dei principali obiettivi della ricerca sul nuoto poiché ha un effetto sulla prestazione.

Le tipologie di studio della resistenza idrodinamica del nuotatore sono due e dipendono dal movimento del soggetto. La prima è il drag passivo, ovvero la resistenza idrodinamica offerta al soggetto quando il suo corpo mantiene una posizione stabile (ad esempio la posizione di scivolamento successiva alla spinta di virata). Il secondo è il drag attivo, cioè la resistenza dell'acqua quando il soggetto nuota. Il drag passivo è misurabile trainando un soggetto e misurandone la forza di traino o all'interno di una vasca idrodinamica in cui il soggetto mantiene la posizione mentre il flusso è in movimento.

Al contrario, il drag attivo, che occupa una parte maggiore della gara, è ad oggi ancora difficile da misurare ed una questione controversa riguardo il valore di questo parametro è accesa tra i ricercatori che studiano il nuoto (Zamparo, 2011). Il drag attivo è influenzato sia dalla resistenza passiva del corpo che dalla resistenza che offrono gli arti durante il movimento di produzione di propulsione (Clarys, 1978). Fin dal 1970 numerosi lavori hanno tentato di misurare il drag del nuotatore nelle condizioni attive di nuotata. Con il metodo Di Prampero (1974) il drag del nuotatore è stimato applicando al nuotatore una forza costante di traino lungo la direzione di nuoto che permette al nuotatore di avere una spesa energetica uguale alle condizioni di riposo. Con questo metodo la relazione tra la forza applicata e l'energia spesa permette di stimare la forza che, applicata al nuotatore, ha lo stesso valore ma il segno opposto al drag che il nuotatore deve superare ad una data velocità. Altri metodi presentati in letteratura

presentano vantaggi e svantaggi rispetto al metodo Di Prampero. Kolmogorov and Duplisheva nel 1992 presentano un metodo applicabile solamente ad intensità di nuotata massimali che si basa sull'assunzione che il nuotatore produca la stessa potenza espressa nuotando alla massima velocità in condizioni libere o trainando un oggetto. Una proporzione tra la velocità e la forza drag (conoscendo il drag della resistenza aggiunta) permette di stimare l'incognita della forza drag nella prova di nuoto libero. Un ulteriore metodo proposto in letteratura da Toussaint (1990) prevede un sistema definito MAD (Measurement of Active Drag) dove la propulsione del nuotatore viene direttamente misurata da trasduttori di forza collegati a piastre montate sotto l'acqua, inserite nella posizione della bracciata del soggetto. Nonostante la varietà dei metodi proposti in letteratura non vi è ancora condivisione scientifica sul valore del drag attivo del nuotatore e sul metodo di misurazione.

La difficoltà di questa misurazione deriva dal fatto che mentre ci muoviamo in acqua le nostre braccia e le nostre gambe si muovono contro l'acqua stessa per creare appoggi. L'acqua resiste a questo movimento e di conseguenza vengono create forze di resistenza e forze di sollevamento (*lift*, figura 6). L'applicazione della terza legge di Newton permette, facendo trazione con le mani contro l'acqua, la produzione di una forza uguale e contraria alla propulsione che spinge avanti il nuotatore. A questa si accosta la forza lift, derivante dai sollevamenti della mano generati dalle differenze di pressione tra il palmo ed il dorso che rendono più salda la presa in acqua.

Per poter studiare gli effetti frenanti all'interno del fluido occorre analizzare in modo analitico le diverse forze che si vengono a determinare sul nuotatore. L'insieme delle forze che agiscono normali all'avanzamento sono definibili nel L'insieme delle

forze che agiscono perpendicolari all'avanzamento è comunemente chiamato drag di pressione mentre il drag dovuto alle forze tangenziali è definito drag di frizione:

- drag di pressione ( $D_p$ ) dovuta alla forma del nuotatore. La forma del corpo modifica la dinamica del flusso attorno al corpo del soggetto. Di questo tipo di resistenza fa parte il drag d'onda ( $D_w$ ), causata dal movimento delle masse d'acqua attorno al soggetto. La creazione di onda utilizza energia sottratta al nuotatore sotto forma di resistenza.
- drag di frizione ( $D_{sf}$ ), dovuta all'attrito di sfregamento di due superfici (acqua e nuotatore) tra loro. E' una resistenza viscosa determinata dalla risultante delle forze che agiscono trasversalmente alla superficie bagnata del corpo del nuotatore.

Il contributo della resistenza aerodinamica, ovvero la resistenza delle parti del corpo nel fluido aria, è irrisorio nel computo totale del drag alle velocità del nuotatore.

La velocità del nuotatore deriva dall'equilibrio tra forze propulsive e forze frenanti, quindi a parità di forza propulsiva una riduzione di una componente del drag ( $D_p$ ,  $D_{sf}$  e  $D_w$ ) porterà ad un incremento di velocità. Recentemente è stato dimostrato (Bixler, 2007) che il  $D_{sf}$  rappresenta circa un quarto del totale del drag del nuotatore quando è immerso ad una profondità dove  $D_w$  è trascurabile. Il restante tre/quarti del drag è attribuito a  $D_p$ . A velocità alte (2.5 m/s) il contributo di  $D_{sf}$  sembra essere maggiore (40%). Per Vennel (2006) la componente  $D_w$  alla velocità di 2.0 m/s ed alla profondità di 0.4 m sembra essere del 15% del drag totale del nuotatore. Ancora Toussaint (2001) afferma che il contributo delle componenti di drag dipende essenzialmente dalla velocità. A velocità bassa la componente  $D_{sf}$  ha un alto valore dovuto ad dinamica di flusso attorno al nuotatore stabile senza turbolenze. Aumentando

la velocità si incrementa la pressione davanti al corpo del nuotatore e diminuisce sulla parte posteriore, e dominano quindi le componenti  $D_p$  e  $D_w$ . Secondo lo stesso autore le componenti  $D_{sf}$ ,  $D_w$  e  $D_p$  hanno una influenza rispettivamente del 5%, 15% ed 80% a 1.0 m/s e del 3%, 57% e 40% a 2.0 m/s. Per Mollendorf (2004) il contributo di  $D_{sf}$  a 2.2 m/s è del 21%, di  $D_w$  del 23% e di  $D_p$  del 52%.

Analizzando il fluido dal punto di vista chimico-fisico l'ambiente acqua presenta una densità (rapporto tra volume e massa) molto più elevata dell'aria (circa  $997 \text{ Kg} \cdot \text{m}^3$  per l'acqua dolce, contro  $1,2 \text{ Kg} \cdot \text{m}^3$  per l'aria). Inoltre la maggiore viscosità (coesione interna delle particelle che compongono la massa) determina molto più difficile l'attraversamento del fluido.

Attraversando un fluido (nel nostro caso l'acqua, ma il discorso è identico i fluidi gassosi) un oggetto incontra una forza di resistenza che si oppone all'avanzamento relazionata al quadrato della velocità di avanzamento in accordo con l'equazione (Karpovich, 1933):

$$Fd = K * v^2$$

dove  $K$  rappresenta un valore costante per soggetto a tutte le velocità (le componenti di  $K$  sono descritte nel capitolo di seguito).

Per riassumere, le componenti che determinano il drag totale del nuotatore sono rappresentati principalmente: dalla forma, grandezza e orientamento del corpo del nuotatore (di conseguenza dalla dinamica di flusso attorno ad esso), dalla velocità del corpo stesso o di parti di esso, dall'accelerazione del corpo. Incide inoltre sulla resistenza la scorrevolezza della superficie a contatto con l'acqua (frizione), le onde generate attorno al corpo del nuotatore, la densità dell'acqua e la profondità rispetto alla superficie. Nel testo successivo analizzeremo nello specifico queste componenti.

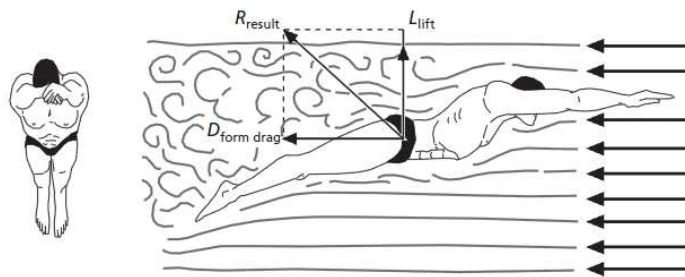


Figura 6. Profilo del nuotatore in scivolamento passivo con scomposizione di forze (drag e lift, immagine tratta da Vorontsov, 2000)

#### 4.1. Resistenza di pressione

La resistenza di pressione in un corpo in avanzamento nel fluido è generata da una differenza di velocità del flusso tra due zone, che determina un gradiente di pressione (equazione di Bernoulli). Questa forza è il risultato della differenza di pressione tra la zona che impatta l'acqua e la zona dove l'acqua abbandona il corpo, quindi per il nuotatore tra la parte anteriore e posteriore sull'asse di spostamento (Naemi, 2009). Il gradiente di pressione crea una forza diretta verso la zona di minor pressione, corrispondente per il nuotatore alla zona dei piedi. Nel nuotatore in avanzamento, la pressione dell'acqua nella zona dietro le gambe è minore della pressione che agisce sulla zona che impatta l'acqua (braccia-testa, figura 7). Questo è dovuto alle dinamiche di una parte di fluido a contatto diretto con la superficie del nuotatore, definita *strato limite*.

Quando l'acqua scorre attorno ad un oggetto, la velocità del flusso attorno ad esso è rallenta o accelera. La velocità di flusso è nulla nella zona adiacente alla superficie dell'oggetto, aumenta invece più ci si allontana dalla superficie del corpo fino alla



velocità di flusso libera indipendente dal contatto con l'oggetto. La zona in cui la velocità è differente dalla velocità di flusso libero è definita *strato limite*.

Quando l'ordine regolare degli strati d'acqua non è rispettato, per cause che analizzeremo nel corso del testo, avviene una separazione dello strato limite che dà luogo alla formazione di vortici, ovvero masse di acqua che ruotano in modo irregolare (figura 7). La separazione dello strato limite genera una zona a bassa pressione. La differenza tra la somma delle pressioni della parte anteriore e la somma delle pressioni nella parte posteriore del nuotatore crea un gradiente di pressione che determina il valore di  $D_p$ . La resistenza di pressione è quindi determinata dal valore di pressione dinamica dell'acqua, aumentata nella zona di impatto frontale del corpo da una maggiore superficie di contatto, ridotta nella parte posteriore del nuotatore dai vortici (Vorontsov, 2000).

Quando il corpo ha una linea di scivolamento favorevole e non incidente, il flusso scorre attorno al corpo in maniera uniforme e laminare e la formazione di vortici è limitata o nulla. In questo caso la resistenza di pressione è bassa ed il drag del nuotatore sarà dovuto principalmente alla componente di frizione. All'aumentare di velocità o incidenza del soggetto diminuisce lo spessore dello strato limite e la componente  $D_{sf}$  diviene meno importante rispetto al crescere del gradiente di pressione tra la parte anteriore e posteriore del soggetto. Con l'aumento continuo di velocità o incidenza aumenta la separazione dello strato limite e la formazione di vortici, ed il punto di separazione dello strato limite si sposta sempre più verso la parte anteriore del corpo.

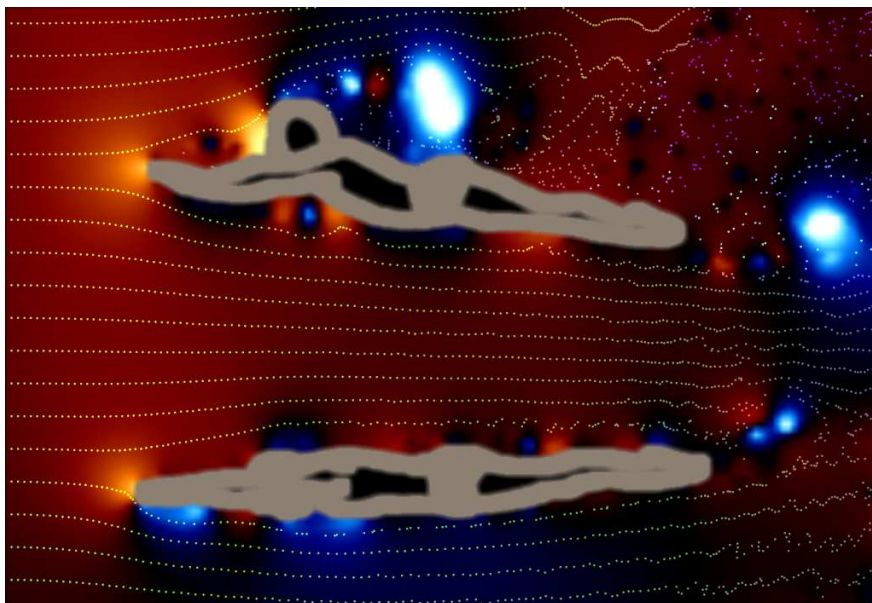


Figura 7. Una ricostruzione computazionale del fluido (W-Tunnel Pro) attorno al corpo di un soggetto in posizione idrodinamica (in basso) e non idrodinamica (in alto). Le linee di flusso evidenziano la formazione di vortici, le macchie rosse le zone ad alta pressione dinamica e quelle azzurre a bassa pressione dinamica.

I pesci e gli animali marini hanno una forma del corpo favorevole all'avanzamento. Il corpo di un essere umano, a parità di lunghezza e larghezza, ha una resistenza idrodinamica decisamente più elevata di quella del pesce. La superficie del corpo umano non è regolare e con le sue parti di differente sezione o non uniformi (testa, spalle, glutei, ginocchia, talloni) crea profili idrodinamici con zone di variazione di pressione, determinando aumenti di drag (Clarys, 1978). La variazione della resistenza di forma è un problema di importanza pratica per il tecnico di nuoto. Ogni superficie non regolare del corpo favorisce la formazione di vortici ed aumenta la resistenza. Gli spostamenti del corpo del nuotatore o della testa da un allineamento orizzontale producono anche un aumento della sezione di impatto. Secondo la formula di calcolo del drag,  $F_d = K \cdot v^2$ , in un regime di dominanza di forze pressorie, il fattore  $K$  ( $F_d = K \cdot v^2$ , vedi sopra formula di Karpovich) è determinato da:

$$K = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot C_d$$

dove  $\rho$  è la densità dell'acqua ( $997 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  at  $25^\circ$ ),  $Cd$  è una quantità adimensionale definita come coefficiente di drag ed  $S$  è la superficie di impatto frontale, perpendicolare al vettore drag.

Il coefficiente di drag è un valore definito da una quantità denominata numero di Reynolds che fornisce un criterio per determinare lo stato di flusso, nel nostro caso dell'acqua, per problemi in cui è primario il rapporto tra inerzia e forze viscosive, evento comune nel nuoto. Il numero di Reynolds si esprime come:

$$Re = \rho * v * L / \mu$$

in cui  $L$  è la lunghezza del corpo e  $\mu$  il coefficiente di viscosità dinamica ( $\mu = 0.987 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$  alla temperatura dell'acqua di  $26^\circ$  centigradi). Il numero di Reynolds definisce se il flusso attorno al soggetto è completamente laminare ( $Re < 5 * 10^5$  per le dimensioni del nuotatore, Mollendorf, 2004) ovvero il moto del fluido avviene con scorrimento di strati gli uni sugli altri senza alcun tipo di rimescolamento di fluido. L'immagine del fluido è rappresentata da strati sottili orizzontali e paralleli tra loro e la velocità e la pressione ad ogni strato del flusso rimangono costanti e dominano le forze viscosive. Il regime laminare si verifica normalmente quando un corpo ha un profilo sottile e allungato e la velocità del flusso è bassa. Se la velocità di flusso aumenta si riduce lo strato limite fino al punto di separazione e alla creazione di vortici quindi al passaggio a regime turbolento.

Il regime opposto è rappresentato dal turbolento ( $Re > 1 * 10^7$  per le dimensioni del nuotatore, Mollendorf, 2004) in cui le forze viscosive non sono sufficienti a contrastare le forze di inerzia e il moto delle particelle del fluido avviene in maniera caotica con formazione di vortici, senza seguire traiettorie ordinate come nel caso del regime laminare. Il passaggio tra i due tipi di regimi comporta una condizione di flusso con

dinamiche particolari e non definite, in cui il fluido è definito in regime intermedio ovvero una situazione di transizione tra le caratteristiche dei due flussi.

Un oggetto che avanza in un fluido ad un regime con numero di Reynolds intermedio ha una zona anteriore in cui impatta l'acqua in cui il flusso è laminare e una zona posteriore di uscita dell'acqua in cui il flusso è turbolento in cui la separazione dello strato limite è già avvenuta. Così, secondo Mollendorf (2004) per un nuotatore alto 1.70 m a velocità classiche di nuoto da 0.3 a 2.2 m/s il regime del nuotatore è variabile tra  $Re = 5.10 * 10^5$  e  $Re = 3.74 * 10^6$  quindi in un regime mai completamente laminare e mai completamente turbolento ma intermedio e indefinito. Il punto di transizione da flusso laminare l'autore lo identifica, ad un esempio di velocità 2.0 m/s, prossimo alla sezione più larga della testa del nuotatore, quindi, in un atteggiamento di scivolamento orizzontale passivo con braccia distese avanti, a circa 25 cm successivi alle mani che impattano l'acqua. Ad oggi le conoscenze scientifiche definiscono il flusso attorno al nuotatore principalmente in regime intermedio a tutte le velocità classiche di nuoto, variabile da laminare a turbolento con una separazione dello strato limite sopra le spalle. Questa variazione continua di forze rende complessa la valutazione del drag del nuotatore.

Un ulteriore fattore chiave nella resistenza idrodinamica e nel nuoto è la superficie di impatto frontale ( $S$ ), utile per le applicazioni tecniche.  $S$  corrisponde all'area della proiezione del corpo sul piano frontale per il nuotatore. Questa proiezione è influenzata dall'angolo di attacco del corpo rispetto alla direzione di avanzamento, ovvero dalla inclinazione del corpo che porta ad un abbassamento delle gambe rispetto alle spalle (Figura 8, Gagnon and Montpetit, 1981; McLean, 1998). Secondo

l'equazione rivista e proposta da Mollendorf (2004) per il nuotatore, considerando l'inclinazione del corpo come parametro determinante  $S$ , il  $D_p$  deriva da:

$$D_p = \frac{1}{2} \rho * A_{eff} * C_d * V^2$$

$A_{eff}$  è l'area effettiva di contatto del corpo con l'acqua derivante dall'equazione (Mollendorf, 2004):

$$A_{eff} = A_f * \cos \alpha + (BSA/2) * \sin \alpha$$

dove  $\alpha$  è l'inclinazione del tronco in radianti,  $A_f$  è l'area frontale di impatto (ovvero  $S$  quando il soggetto è orizzontale con  $\alpha = 0$ ) e  $BSA$  è l'area di superficie corporea.

La resistenza dipende quindi anche dalla spinta di galleggiamento: la posizione del corpo orizzontale rispetto alla superficie dell'acqua porta ad una riduzione della sezione trasversale del corpo che è esposta al flusso d'acqua.

## 4.2. Galleggiamento e assetto del nuotatore

Il corpo umano immerso in acqua è soggetto ad un sistema di forze che modifica la posizione di galleggiamento. La grandezza e la forma del volume sommerso del corpo modificano continuamente e gli effetti delle spinte su di esso differiscono in ogni istante. Il nuotatore ricerca una posizione orizzontale di avanzamento con una inclinazione del corpo parallela all'orizzonte con l'obiettivo di produrre una area effettiva di impatto sempre minore e mantenere parte del corpo coperto e dietro la proiezione della superficie che impatta l'acqua. Tra le forze che agiscono sul corpo del nuotatore la forza di galleggiamento, che agisce verso l'alto sollevando il nuotatore, è quella che incide maggiormente sull'assetto orizzontale del nuotatore. Questa forza

genera un momento di rotazione dell'asse del corpo (figura 8) causato dal non allineamento con il vettore della forza che agisce verso il basso (forza peso). Tale azione crea un abbassamento delle gambe rispetto alla testa, incrementato dal volume di aria incamerato nei polmoni (zona a bassa densità che genera ulteriore galleggiamento del tronco), facendo ruotare il corpo e producendo un'area effettiva di impatto maggiore (Gagnon and Montpetit, 1981; Hay, 1993; McLean and Hinrichs, 1998). Come mostrato da Di Prampero (1986) l'inclinazione del corpo è influenzata dalle caratteristiche antropometriche del soggetto.

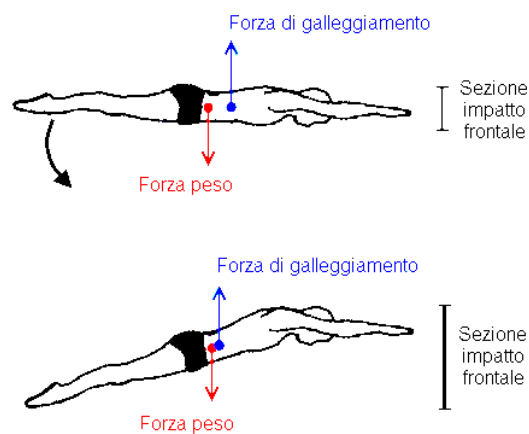


Figura 8. Momento di rotazione dell'allineamento orizzontale del nuotatore con conseguente aumento di area effettiva di impatto frontale.

L'angolo formato tra l'asse longitudinale del corpo e la direzione della velocità di flusso (nel caso della piscina l'orizzontale) è chiamato "angolo di attacco" e indicato dal simbolo  $\alpha$ .

La maggior area effettiva di impatto determina una maggiore resistenza idrodinamica o un elevato costo energetico dovuto ad un incremento del colpo di gambe per mantenere il corpo allineato orizzontalmente (Chatard, 1990). Alcuni studi (Capelli, 1995; Zamparo, 1996; Zamparo, 2000; Zamparo, 2008) hanno mostrato che, a basse velocità, circa il 70% della variabilità del costo energetico della nuotata è spiegato dalla

variabilità dell'inclinazione dell'allineamento orizzontale del nuotatore, indipendentemente da sesso, età o livello tecnico del soggetto.

Con l'aumentare della velocità di avanzamento, l'effetto della spinta idrodinamica determinata dalla componente di forza di sollevamento (figura 6), solleva il corpo del nuotatore e contrasta l'abbassamento del corpo (Lavoie and Montpetit, 1986). Si riduce quindi l'angolo di attacco ed aumenta la componente di  $C_d$  del coefficiente di drag, determinata dalle condizioni di flusso attorno al nuotatore (Clarys, 1979). Quando la velocità di avanzamento diventa costante si stabilizza anche il valore di  $C_d$ . Nel nuoto, quindi, maggiore è la proiezione del corpo nella direzione di avanzamento e quindi l'inclinazione del tronco e maggiore sarà la resistenza idrodinamica (Zamparo, 2009).

### **4.3. Resistenza d'onda**

I nuotatori che avanzano sulla superficie dell'acqua generano onde che formano una scia dietro di loro. Questo fenomeno è dovuto ad uno spostamento d'acqua verso l'alto, a seguito della occupazione di uno spazio di fluido da parte del corpo immerso (Figura 9). La formazione di onde determina un lavoro meccanico svolto dal nuotatore per vincere la gravità e l'inerzia di una quantità di acqua sollevata sopra la superficie. Le onde sono una prova evidente della perdita di energia in un nuotatore. Numerose zone del corpo umano in scivolamento in acqua generano onde (spalle, anche) e gli errori tecnici che portano a movimenti laterali o verticali incrementano la formazione ondosa e di conseguenza la resistenza idrodinamica. Maggiore è la dimensione dell'onda e maggiore sarà il dispendio energetico del nuotatore per creare avanzamento. La forza

della resistenza d'onda è proporzionale alla produzione di energia e, come mostrato da Rumyantsev (1982), è proporzionale al cubo della velocità di avanzamento. Come discusso in precedenza la resistenza di forma è, al contrario, proporzionale al quadrato della velocità, e come vedremo, la componente di frizione aumenta linearmente con la velocità. Questo spiega il motivo per cui a basse velocità  $D_{sf}$  abbia una alta influenza percentuale sul drag totale mentre a alte velocità  $D_w$  acquisti importanza (come accade per le barche).

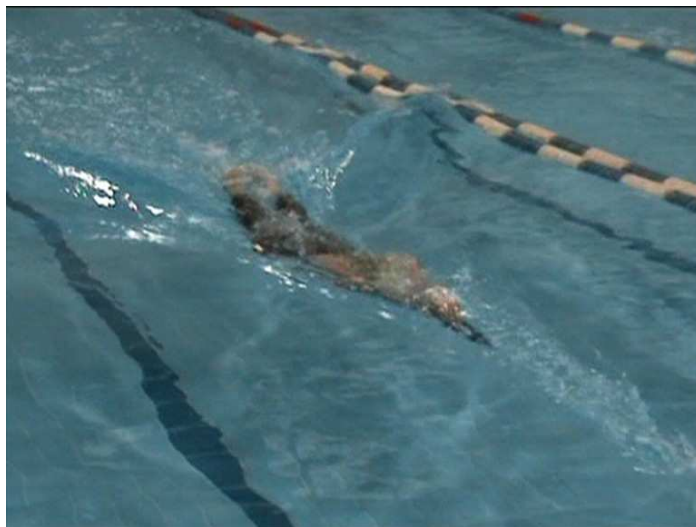


Figura 9. Onde create trainando un nuotatore in superficie.

Le navi che viaggiano ad alta velocità hanno una grande quantità di energia sottratta dalla creazione di onde trasversali e divergenti (Van Manen, 1988). La resistenza idrodinamica delle navi, dovuta in gran parte alla creazione di onde, è determinata dal rapporto tra la velocità di avanzamento e la lunghezza della nave, come spiegato dal numero di Froude ( $Fr$ ):

$$Fr = v / \sqrt{g * L}$$

dove  $g$  è l'accelerazione di gravità (9.81 m/s) e  $L$  è la lunghezza del corpo. La resistenza d'onda aumenta al crescere del numero di Froude. Estendere le braccia sopra la testa o



allungare la lunghezza della nave aumenta la lunghezza del corpo e di conseguenza diminuisce la componente  $D_w$ .

Il numero di Froude fornisce informazioni per conoscere la velocità limite di avanzamento del soggetto in funzione della sua lunghezza: infatti la velocità del nuotatore determina la lunghezza dell'onda, ovvero la distanza tra una cresta e la successiva. Nella nautica è definita *velocità limite della barca* la velocità in cui la lunghezza dello scafo è la stessa della lunghezza dell'onda. Lo stesso termine è stato introdotto nel nuoto da Miller (1975) per indagare la velocità limite di scivolamento del nuotatore. Tutti gli sforzi successivi per aumentare la velocità oltre la velocità limite saranno molto dispendiosi poiché dovranno portare il corpo fuori dal ventre dell'onda.

Ad esempio, un nuotatore con una lunghezza a braccia estese di 2.5 m raggiunge la velocità 2.23 m/s ha un numero di Froude di 0.45 e la sua lunghezza è uguale a quella dell'onda (Vennel, 2006). Oltre tale velocità e quindi  $Fr$  il nuotatore subirà un incremento di  $D_w$  che sarà improbabile da vincere. Se un nuotatore è in posizione idrodinamica di scivolamento passivo la velocità limite teorica varia in base alla posizione ma si attesta tra 1.9 e 2.6 m/s per nuotatori di altezza nel range di 1.95/2.00 m e tra 1.7 e 2.3 m/s per nuotatori di 1.75/1.85 m (Vorontsov, 2000). Questo è un altro motivo che supporta la supposizione di molti tecnici di nuoto che i nuotatori di altezza elevata abbiano una struttura più vantaggiosa che soggetti di minore altezza (Toussaint, 1988).

Numerosi autori hanno indagato la resistenza d'onda del nuotatore e tentato di quantificarla: Vorontsov and Rumyantsev (2000) suggeriscono che a velocità di 1.6 la resistenza d'onda del nuotatore si attesta sul 5% del totale mentre Toussaint (1988) stima un contributo maggiore alla stessa velocità (21% a 1.9 m/s). Studi più recenti

danno un peso maggiore alla componente  $D_w$  sulla resistenza idrodinamica del nuotatore: Wilson and Thorp (2003) identifica un contributo del drag d'onda che si attesta tra il 35% ed il 45% alla velocità di 2.0 m/s. Vennel nel 2006, trainando un manichino in vasca idrodinamica, stima la resistenza d'onda ad una percentuale del 50%-60% del drag totale a velocità di 2.0 m/s investendo questa componente di una importanza fondamentale nella formazione del drag del nuotatore.

Per ciò che riguarda il tipo di onde un nuotatore è sottoposto a *onde esterne*, ovvero subisce onde create da altri soggetti o onde di ritorno generate dal lui stesso (es. onde di ritorno prodotte dalle pareti della vasca) e ad *onde interne*, ovvero formazioni ondose generate dal suo corpo che si muove nel fluido. Quando il corpo del nuotatore si muove in acqua si formano due tipi di onde interne: un primo tipo rappresentato dalle *onde divergenti*, che si emanano verso avanti o dietro rispetto al corpo del nuotatore, perpendicolari alla direzione di moto (figura 10). In base alla velocità il nuotatore crea normalmente 2 o 3 di queste onde che si disperdono dietro di esso. Tra questo tipo di onde la più importante in termini di resistenza idrodinamica è *l'onda di prua* (figura 10), che si crea circa all'altezza della testa del nuotatore e che il soggetto deve vincere consumando energia. Un secondo tipo è definito *onde trasversali*, si muovono nella stessa direzione del nuotatore e si estendono trasversalmente rispetto alla direzione di avanzamento (figura 10). Le onde trasversali sono ben visibili nel soggetto in scivolamento passivo (figura 9) mentre vengono nascoste dai movimenti degli arti quando il nuotatore nuota creando propulsione.

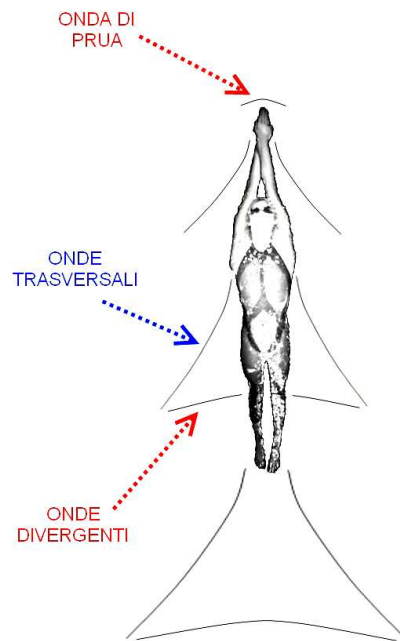


Figura 10. Tipi di onde generate dal nuotatore.

La componente  $D_w$  è influenzata anche dalla profondità dell'acqua alla quale il corpo si muove. Un oggetto che si muove completamente sommerso ma vicino alla superficie genera resistenza d'onda. Più l'oggetto si allontana dalla superficie, più questa forza diminuisce fino ad annullarsi. Alcuni autori (Lyttle e Blanksby, 2000; Vennel, 2006) hanno dimostrato che ad un nuotatore è necessario viaggiare a 0.6 m di profondità per eliminare la maggior parte della resistenza d'onda ed a quella profondità il drag totale è dovuto essenzialmente alle componenti  $D_p$  e  $D_{sf}$ . Il valore massimo della componente  $D_w$  si ritrova quando il corpo è appena sommerso in toto mentre ad una profondità di circa tre volte lo spessore del nuotatore la resistenza d'onda diventa trascurabile. Questo perché la distorsione del flusso dovuta alle variazioni di pressione a seguito del passaggio del corpo hanno sufficiente spazio per attenuarsi prima di arrivare

alla superficie e non modificano quindi il profilo della superficie, senza creare formazione ondosa (Stager, 2005).

#### **4.4. Resistenza di frizione**

La resistenza di attrito è il risultato della forza viscosa che agisce trasversalmente alla superficie bagnata del corpo in movimento in acqua. Ha una azione simile a quella dell'attrito derivato dallo sfregamento di due superfici solidi a contatto.

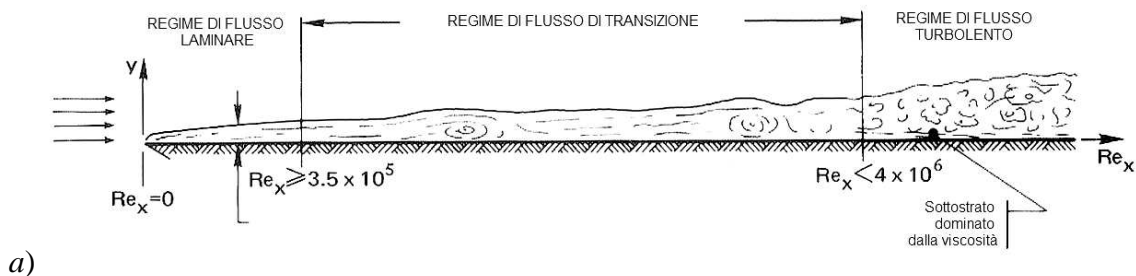
In un fluido in equilibrio, il passaggio di un oggetto turba l'equilibrio degli strati dell'acqua e fa in modo che lo strato di acqua adiacente alla superficie dell'oggetto si sposti insieme ad esso, alla medesima velocità. La viscosità ed i legami delle molecole di acqua creano un'attrazione tra lo strato d'acqua prossimo al corpo del nuotatore e lo strato adiacente, trascinando anch'esso in movimento. E così per tutti gli strati d'acqua fino al termine dello spessore dello strato limite dove l'acqua avrà velocità nulla. Maggiore è lo spessore dello strato limite dovuto alla quantità di acqua che il nuotatore muove con sé e maggiore sarà la resistenza di frizione.

La frizione è quindi una forma di opposizione dell'acqua che deriva dalla formazione dello strato limite attorno all'oggetto che si muove nel fluido ed ha un effetto sulla componente  $D_{sf}$  opposto rispetto a quello sulla resistenza di forma. Se lo strato limite è separato dalla pelle la resistenza di attrito è nulla mentre la resistenza di forma è elevata a causa dell'elevato gradiente di pressione tra i due estremi del corpo. Se, al contrario, lo spessore dello strato limite è grande sarà elevata anche la

componente  $D_{sf}$  mentre risulterà minore la componente  $D_p$  per la non elevata differenza di pressione tra zona anteriore e posteriore del corpo.

Ogni irregolarità di superficie del profilo del corpo del nuotatore (es. spalle, anche) causa una separazione dello strato limite e di conseguenza un riduzione di drag di frizione. Nonostante questo, l'obiettivo primario del nuotatore resta quello di ridurre il drag forma, che ha una influenza sul totale maggiore del drag di frizione. Infatti, un profilo non idrodinamico che crea un flusso turbolento attorno al corpo crea un incremento di drag di forma molto maggiore rispetto al vantaggio della riduzione del drag di frizione (Stager, 2005). Un aumento della turbolenza nello strato limite è accompagnato ad un aumento del drag totale poiché per formare vortici il fluido sottrae energia cinetica al corpo diminuendo la velocità di avanzamento del nuotatore. In termini di resistenza idrodinamica è maggiormente vantaggioso mantenere uno strato laminare attorno al corpo (Vorontsov, 2000).

E' stato dimostrato (Blasius, 1908) che su di flusso che scorre su una superficie piana, lo strato limite ha caratteristiche laminari nella zona di impatto, per poi passare ad uno stato turbolento tramite un regime di transizione (figura 11).



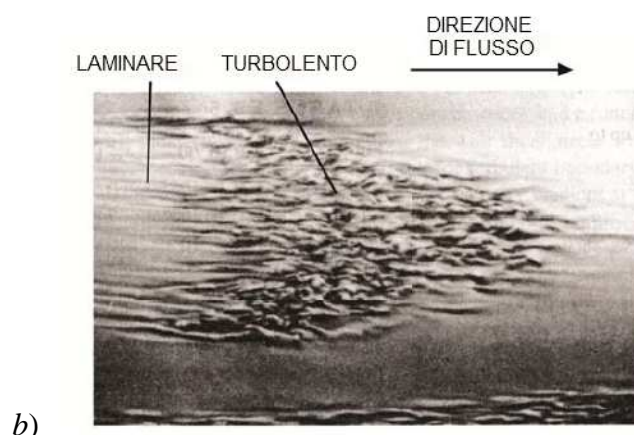


Figura 11. Strato limite di una superficie liscia piana (*a* immagine adattata da Lienhard, 2000; *b* immagine adattata da Munson 2005).

Ma su un nuotatore queste caratteristiche cambiano poiché il profilo non è esattamente liscio come su di una superficie piana (figura 12). Le zone che modificano la regolarità di superficie nel nuotatore dovute alle curvature del corpo ed ancor di più alle continue accelerazioni e movimenti nel soggetto (ancor più nel nuoto attivo rispetto al passivo), fanno in modo che la separazione dello strato limite e rottura del flusso laminare avvenga ad un numero di Reynold più basso rispetto ad una lastra con superficie piana, di conseguenza con una breve durata del flusso laminare.

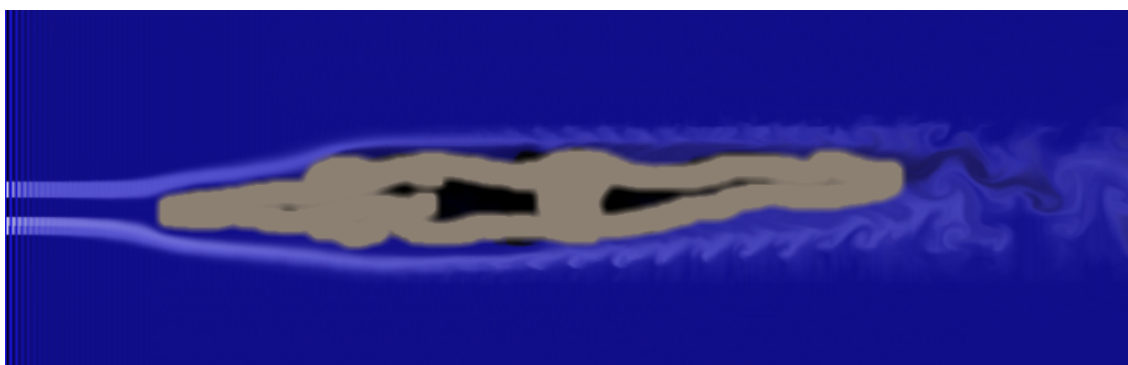


Figura 12. Flusso e strato limite attorno al profilo del nuotatore in scivolamento realizzato con software di analisi computazionale bidimensionale (W-Tunnel Pro).

Il drag di frizione del nuotatore viene calcolato, come per una lastra piana, nella regione di transizione a regime turbolento con l'equazione (Mollendorf, 2004; Pendergast, 2005):

$$D_{sf} = q * BSA * (0.074/Re_L^{1/5} - 1740/Re_L)$$

dove  $q$  rappresenta la pressione dinamica ( $q = 1/2 \rho * v^2$ ). La resistenza di frizione è calcolata considerando  $1/2$  del  $BSA$  (Mollendorf, 2004) poiché si assume che il nuotatore sia parzialmente fuori dall'acqua.

La superficie di contatto con l'acqua influenza la resistenza di frizione. E' possibile modificare lo strato limite e quindi la componente  $D_{sf}$  senza incrementare la resistenza di forma variando le caratteristiche della superficie bagnata. Un profilo liscio o rugoso incide in maniera differente sullo strato limite. Una superficie ruvida, infatti, ha una maggiore frizione rispetto ad una liscia (tale tema sarà affrontato nel capitolo seguente). Questo è il motivo per cui tra i nuotatori è ritenuto vantaggioso depilarsi il corpo per rendere la pelle maggiormente liscia. Questa ultima metodica attuata dai nuotatori è ancora dibattuta riguardo la reale utilità dal punto di vista fluidodinamico. Un autore (Sharp, 1989) ha mostrato un minor consumo energetico a seguito di depilazione in una prova di velocità nel nuoto ma si può ritenere plausibile anche un vantaggio placebo dal punto di vista psicologico.

Un ulteriore metodo di riduzione della resistenza di frizione è rappresentato dal modificare la superficie di contatto con l'acqua indossando costumi coprenti. Le aziende che operano nel settore nuoto producono costumi interi con materiali idrorepellenti o tecnologie innovative per ridurre le resistenze di avanzamento del nuotatore. Questo argomento sarà affrontato nel capitolo seguente.

## 5. REVISIONE DELLA LETTERATURA

---

### 5.1. Effetti del wetsuit

Nel secondo capitolo è stata affrontata l'evoluzione del costume tecnico in piscina. Il primo costume coprente prodotto dalla Speedo è stato il precursore dei costumi tecnici. Le mute negli sport acquatici in realtà erano utilizzate in anni precedenti il 2000, ad esempio negli sport subacquei o nel triathlon. La letteratura scientifica ha analizzato gli effetti delle mute da triathlon (definite *wetsuits*), anche sulle prestazioni del nuoto. Questi indumenti erano interamente costituiti di gomme sintetiche, normalmente neoprene, con lo scopo di preservare il calore corporeo in ambienti freddi come l'acqua di profondità o per la praticità di vestizione in sport consecutivi come triathlon, e coprivano il corpo lasciando esposti solamente capo, mani e piedi ed in alcuni casi le braccia. Nel 1992 Lowdon ritrova una temperatura significativamente maggiore in 13 triatleti a seguito di ciascuna delle tre prove da 1500 m a tre differenti temperature dell'acqua (17.0° C, 21.3° C, 29.5° C), indossando una muta in neoprene rispetto ad un costume tradizionale. Risultati già preannunciati in maniera meno specifica da Keatinge (1969). Queste conclusioni sono in contraddizione con studi più recenti sullo stesso tipo di mute (Peeling, 2007) dove in due prove da 750 m alla massima velocità a stile libero su 8 nuotatori con costume slip standard e con muta integrale l'autore non mostra differenze significative in temperatura del corpo e in temperatura della pelle.

Il materiale di cui sono costituite queste mute ha una densità minore del corpo umano, per cui in acqua favorisce il galleggiamento del nuotatore. Cordain (1991) misura la densità corporea con pesata idrostatica con costume tradizionale e con wetsuit



(spessore 3mm). Il costume aumenta il galleggiamento statico e l'autore ritrova una densità corporea di 1,021 g/ml e di 1,048 g/ml rispettivamente con wetsuit e costume tradizionale. Yamamoto (1999) misura la densità con pesata idrostatica di 8 nuotatori con wetsuit e valuta la galleggiabilità del costume a circa 3,6 kg. Perrier in 2 lavori consecutivi (2002; 2004) mostra una elevata galleggiabilità del wetsuit (spessore 5mm). Nella pesata idrostatica con costume tradizionale e wetsuit trova valori di galleggiamento di 17.9 N e 46.9 N rispettivamente, valori che corrispondevano alla forza per mantenere sommerso il nuotatore. Anche Tomikawa sia 2003 che più recentemente nel 2007 mostra valori simili di galleggiamento del wetsuit (29 N).

Alcuni di questi autori sostengono che il maggior galleggiamento statico del wetsuit migliori anche la velocità di nuoto (Cordain, 1991; Perrier, 2002; Tomikawa, 2003; Perrier, 2004; Tomikawa, 2007).

Si cerca quindi di variare la densità corporea con metodi artificiali, ad esempio aggiungendo localmente delle strisce di materiale galleggiante, e misurarne l'impatto sulla prestazione. Cordain (1991) aggiunge alle prove di pesata idrostatica una prova di 400m e 1500m stile libero massimali effettuata con bande aggiuntive di neoprene ai polpacci per aumentare il galleggiamento delle gambe, non ritrovando però significativi effetti positivi. Anche Lowensteyn (1994) analizza la velocità in sprint di nuotatori con aggiunti piastre di materiale meno denso del corpo in varie zone (addome, anche, petto, schiena, glutei, cosce). L'autore ritrova un peggioramento significativo della prestazione nelle prove con aggiunta di minore densità rispetto alle prove senza piastre.

Nonostante questi risultati numerosi autori trovano un miglioramento della velocità di nuoto utilizzando la muta. Cordain (1991) trova una diminuzione del 5% nel 400 m e del 3 % nel 1500 m stile libero indossando un wetsuit (spessore 3 mm) in 14

nuotatrici. Lowdon l'anno seguente ripete la stessa distanza (1500 m) in tre prove con temperature differenti (17.0° C, 21.3° C, 29.5° C), mostra un incremento di velocità del 10% indossando una muta in neoprene. Starling nel 1995 misura la distanza percorsa successiva alla spinta dal muro in scivolamento con wetsuit o con costume tradizionale e ritrova una differenza significativa (2.05 m, 2.00 m, rispettivamente). Chatard (1995) trova un aumento significativo di velocità in 8 triatleti in un 400 m massimale a stile libero vestendo una muta in neoprene (spessore 5mm per tronco, 3mm per arti) ma non significativo in 8 nuotatori. L'autore considera il vantaggio in velocità dato dal wetsuit utile solo per soggetti di bassa abilità nel nuoto. Anche Parsons nel 1996 riporta un aumento di velocità di nuoto del 7% in una prova di 30 minuti continuati a stile libero vestendo una muta in neoprene rispetto ad un costume tradizionale. De Lucas (2000) mostra un significativo aumento della velocità massima (+4.7%) in un 30 m sprint stile libero e della velocità di soglia anaerobica (+4.7%) in 1500 m stile libero vestendo wetsuit senza maniche (spessore 3 mm) su 19 atleti di livello regionale. Ancora Nicolau nel 2001 confronta la prestazione su 800 m stile libero con wetsuit con maniche, senza maniche o costume tradizionale. Rispetto al costume tradizionale mostra un significativo aumento vestendo muta senza maniche (+5.9%) rispetto a muta con maniche (+2.3%). Lo stesso protocollo in Perrier (2002) su 400 m stile libero porta un miglioramento del wetsuit senza maniche del 9% e con maniche del 7.6% rispetto al costume tradizionale. La velocità di un 400 m stile libero vestendo un wetsuit con maniche incrementa del 6.8% per Tomikawa (2003) e del 12% per Hutteau (2006), mentre per Perrier (2004) un vantaggio simile (+6.5%) è causato dall'indossare lo stesso costume su una prova da 1500 m. Vantaggio in velocità significativo (+3.2%) ma minore in Peeling (2007) su 750 m massimali di 8 nuotatori allenati che utilizzano

wetsuit. Ancora più recentemente Tomikawa (2007) riporta un incremento di velocità vestendo wetsuit del 4.3% sulla prova corta (25 m) e del 6.9% sulla prova da 400 m.

Non c'è condivisione della comunità scientifica riguardo le variazioni di drag attivo dovute al wetsuit. Secondo Toussaint (1989) misurando con metodo M.A.D. alla velocità di nuoto di 1.5 m/s, la muta (2 mm) riduce il drag attivo del 14% su 12 triatleti ed ipotizza una motivazione nella diminuzione di area effettiva di impatto frontale. Al contrario sia De Lucas nel 2000 che Tomikawa nel 2007, entrambi con metodo Kolmogorov di aggiunta resistenza di traino al nuotatore, non trovano variazioni di drag attivo indossando un wetsuit nelle prove sprint.

Per nostra conoscenza, un unico autore (Van Manen, 1975) misura il drag passivo con muta in neoprene da triathlon su un unico soggetto trovando una riduzione del 9% rispetto ad un costume tradizionale.

Nonostante vi sia un indubbio incremento di velocità di nuoto, associato ad un aumento del galleggiamento statico, la riduzione di drag dovuta all'utilizzo del wetsuit non è completamente confermata dalla letteratura scientifica. Gli effetti che inducono un aumento della velocità non sono quindi del tutto chiari.

Numerose conseguenze sul nuotatore generate indossando questo tipo di costume sono al contrario ben definite sia a livello biomeccanico che energetico. Tutti gli autori che hanno indagato il rapporto tra wetsuit e consumo energetico in prestazione hanno trovato effetti vantaggiosi. Chatard (1995) trova riduzioni di  $Vo_2$  in un 400 m stile libero ad una velocità prefissata sub massimale indossando wetsuit (5 mm) sia su nuotatori che triatleti. Starling nello stesso anno trova riduzioni di consumo di ossigeno nell'ordine del 4% in prove da 365 m al 90% della massima velocità. Trappe (1996) confronta 3 modelli di wetsuit in neoprene 3 mm (intero con maniche, intero senza

maniche, gamba fino a ginocchio) ad un costume tradizionale e riporta riduzioni in Vo<sub>2</sub> rispettivamente di 16.2% gamba fino a ginocchio, di 22.8% per intero senza maniche e di 33.6% per intero con maniche. Yamamoto (1999) in due prove incrementali stima al 30% le riduzioni del consumo di ossigeno indossando un wetsuit. Tomikawa negli studi del 2003 e 2008 in prove a velocità incrementale ed a velocità prefissata, sia sotto che sopra soglia anaerobica indossando muta o costume tradizionale, mostra riduzioni del consumo di ossigeno dal 7% al 14% nelle prove con wetsuit.

Sempre secondo lo stesso autore la muta sembra però non ridurre la produzione di acido lattico nelle prove alle velocità controllate, al contrario di Starling (1995) che trova una riduzione del 16% in prove al 90% della velocità massima. In test a velocità massimale Chatard (1995) e Delextrat (2003) mostrano significative riduzioni del lattato ematico indossando un wetsuit al contrario degli studi di Peeling (2007) dove la concentrazione risulta simile al termine delle prove con i due costumi.

Riguardo la frequenza cardiaca Yamamoto (1999) e Delextrat (2003) stimano riduzioni indossando wetsuit in prove da 400 e 750 m ad intensità massimale come Starling, (1995), Trappe (1996), Nicolaou (2001) e Perrier (2002) con mute in neoprene complete, senza maniche o solo gamba rispetto al costume tradizionale. Trappe (1996) mostra anche una riduzione della ventilazione polmonare, incrementale in relazione alla superficie del corpo coperta dalla muta in neoprene fino ad un miglioramento del 24.3%.

Mediante test di misurazione dello sforzo percepito su prove di nuoto massimali, incrementali, o a velocità controllata non sono attribuibili miglioramenti dovuti al wetsuit (Trappe, 1996; Nicolaou, 2001; Tomikawa, 2003; Peeling, 2007; Tomikawa, 2008).

Per ciò che riguarda l'aspetto energetico e fisiologico in esercizio indossare il wetsuit nel nuoto sembra quindi modificare positivamente numerosi parametri.

Analizziamo l'effetto del wetsuit in ambito biomeccanico. Nel nuoto, dovuto alle caratteristiche cicliche del gesto, il prodotto dei due parametri di frequenza (SR) ed ampiezza (SL) di bracciata può essere considerato come predittore della efficienza tecnica del nuotatore (Costill, 1985).

Così un incremento di frequenza a parità di ampiezza può migliorare la velocità di avanzamento. Chatard (1995), Perrier (2002; 2004) e Tomikawa (2003; 2007; 2008) mostrano aumenti tra il 2% ed il 4% della frequenza di bracciata indossando un wetsuit. Al contrario Hue (2003) e Peeling (2007) mostrano non significative variazioni tra prove con muta o costume tradizionale.

Ad un miglioramento della velocità di nuoto dovuto all'utilizzo della muta è associato un incremento della ampiezza di bracciata dal 7% al 9% (Perrier, 2002; Hue, 2003; Perrier, 2004; Hutteau, 2006; Tomikawa, 2007). Per alcuni di questi autori il miglioramento è in funzione della quantità di superficie coperta dalla muta.

Nicolaou (2001) e Tomikawa (2008) non mostrano invece variazioni di SL sia in prove a velocità massima che sub-massimale controllata.

Un ulteriore parametro biomeccanico che analizza la propulsione di un braccio rispetto all'altro è l'indice di coordinazione (Chollet, 2000). Secondo Hue (2003) il wetsuit modifica significativamente l'indice di coordinazione aumentando l'opposizione di propulsione tra le due braccia. Al contrario un altro autore (Hue, 2003) non riporta significative variazioni per l'indice di coordinazione.

## 5.2. Effetti del costume tecnico

I primi costumi tecnici approvati dalla Federazione Nuoto Internazionale nel 1999 coprivano l'intero corpo del nuotatore lasciando libera testa, braccia, mani e piedi.

Questo tipo di costume, costituito interamente in materiale tessile (elastene e nylon) è frutto di un importante lavoro di sviluppo nei laboratori delle aziende di settore e strette collaborazioni con istituti di ricerca di biomeccanica ed ingegneria tessile. L'azienda produttrice del primo modello di costume tecnico (Fastskin di Speedo) dichiarava riduzioni del drag attivo, dovute all'utilizzo del costume del 7.5%. Questo valore non è completamente confermato dai primi studi che riportano una riduzione del 2% (1.3% uomini e 3.4% donne) su 13 nuotatori con metodo M.A.D. (Toussaint, 2002). Successivamente Mollendorf (2004) stima matematicamente riduzioni molto maggiori di drag attivo (10%-15%) indossando lo stesso modello di costume coprente dalle spalle alle caviglie o alle ginocchia. Questi importanti miglioramenti sono attribuiti dall'autore a particolari micro-asperità del tessuto del costume discusse successivamente in questo capitolo. Riduzioni significative anche di drag passivo dovute all'utilizzo del Fastskin in Benjanuvatra (2002) e Mollendorf (2004) indossando costumi coprenti da spalle a caviglie, da spalle a ginocchia, da anche a ginocchia e da anche a caviglie. Roberts (2003) al contrario non trova riduzioni di drag passivo attribuibili a questo tipo di costume. Riduzioni di drag comportano miglioramenti significativi alla velocità di nuoto attribuibili all'utilizzo del Fastskin (Mollendorf, 2004; Rogowski, 2006) mentre non riportano effetti di incremento di velocità in Roberts (2003) e Toussaint (2002).

Il miglioramento della velocità non sembra riconducibile ad un maggior galleggiamento statico dovuto al materiale del costume in alcuni autori (Benjanuvatra,

2002; Roberts, 2003) ma un aumento di forza di galleggiamento nell'ordine dello 0.1%-0.3% indossando Fastskin è stata invece mostrata da Hinrichs (2003). Nessuna variazione nel consumo di ossigeno, nella produzione lattacida, nella frequenza di bracciata ma un aumento significativo dell'ampiezza di bracciata è stato misurato da Roberts (2003).

Smith (2007) analizza gli effetti di un altro costume tecnico utilizzato negli stessi anni e realizzato con la stessa tecnologia ma prodotto da un'altra azienda (Tyr Aquapel) riportando riduzioni significative di drag passivo (2% a 2 m/s) e consumo energetico. Alcuni anni dopo Chatard (2008), in uno studio comparativo tra costumi di questa generazione (Speedo Fastskin, Arena Powerskin, Tyr Aquapel, ASCI, and Nike Lift), mostrerà un miglioramento di prestazione simile tra i costumi e dipendente dalla quantità di superficie coperta dal costume tecnico. Un costume tecnico coprente dalle spalle alle caviglie migliorerà del 3.2% la velocità, un costume coprente dall'anche alla caviglia del 2.4%. L'autore riporta anche miglioramenti rispetto al costume tradizionale sul consumo di ossigeno, sulla produzione lattacida, nell'ampiezza di bracciata mentre nessun effetto sul galleggiamento statico e sulla frequenza di bracciata.

Analizziamo ora le conoscenze sugli effetti fisici del costume tecnico. Il primo costume coprente il corpo in toto realizzato da Speedo nel 2000 (Fastskin), frutto di anni di lavoro da parte dei ricercatori dell'azienda, aveva l'obiettivo di riprodurre una originale superficie favorevole allo scorrimento del fluido, la pelle dello squalo (figura 13).

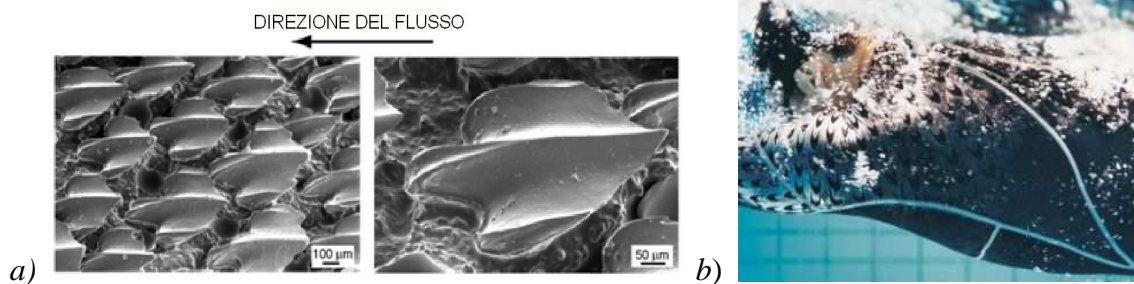


Figura 13. *a* fotografia al microscopio della pelle di squalo (immagine tratta da Jung, 2010), *b* particolare dei denticoli del costume Fastskin Speedo.

Questo pesce è un esempio eccellente per la capacità di nuotare a grandi velocità. Lo squalo ha una particolare conformazione delle squame con superficie rugosa. Dei piccolissimi *denticoli* coprono stretti uno all'altro la superficie con striature sul profilo dello squalo. I denticoli sono piccole creste molto fini, spaziate equamente e allineati lungo l'asse del corpo dello squalo. Queste minuscole micro asperità variano in termini di numero, dimensione e forma e dipendono dall'età e dalle specie dello squalo (Bechert, 2000; Lang, 2008). I denticoli creano piccoli incavi chiamati *riblets* che, partendo dal lavoro di Walsh e Weinstein (1978) risultano avere un importante vantaggio sulla componente  $D_{sf}$ , con riduzioni dal 6% all'8% fino a studi più recenti di ancora maggiore beneficio (10%, Bechert, 1997). Il vantaggio è condizionato dalla dimensione, profilo e densità delle micro asperità, che cambiano il beneficio in base alla velocità del flusso. Le micro asperità convergono o divergono a seconda della zona dello squalo, generando variazione del flusso d'acqua intorno lo squalo (Koeltzsch, 2002). Sono in grado di incanalare l'acqua attraverso i riblets, accelerando il flusso dell'acqua sulla superficie della pelle, con conseguente riduzione della resistenza di frizione superficiale (Lang, 2008).

Queste conoscenze sono state sfruttate per la costruzione di aerei, con riduzioni significative dei consumi (3%, Bechert, 1997). Sbarcando poi nel mondo dello sport



sulle barche da regata con applicazioni di pellicole dentellate, auto da corsa o ancor più conosciute, nelle palle da golf. Esistono numerose teorie sul reale effetto fisico delle micro asperità che causa una riduzione della componente  $D_{sf}$ . L'opinione maggiormente condivisa in letteratura sull'effetto nel nuotatore, è che queste caratteristiche rendano il flusso turbolento maggiormente ordinato (Stager, 2005) canalizzando l'acqua tra i riblets e generando maggior equilibrio (figura 14). Di conseguenza il flusso si attacca alla superficie del corpo (Mollendorf, 2004) e limita la formazione dei vortici nella parte più interna dello strato limite, prossima alla superficie del costume. Questo riduce la forza viscosa tangente dovuta allo scivolamento del corpo sull'acqua, causa della resistenza di frizione (Stager, 2005).

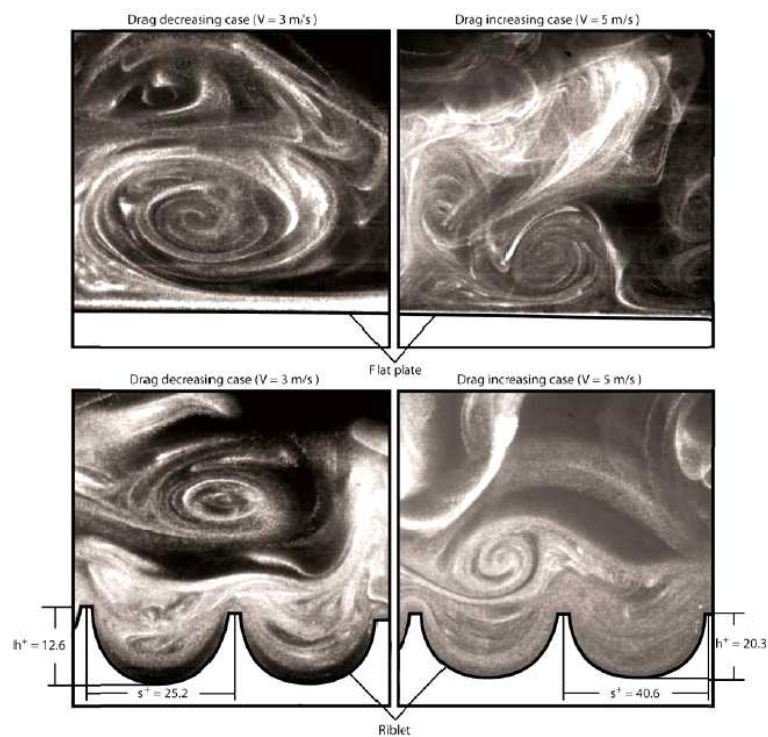
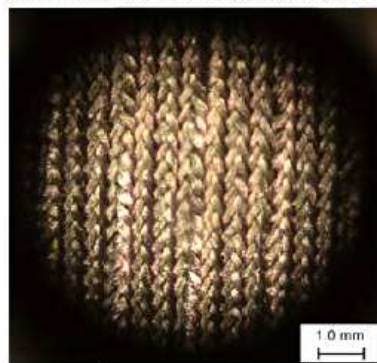


Figura 14. Visualizzazione del flusso turbolento a velocità 3.0 m/s (sinistra) e 5 m/s (destra) su una superficie piana (alto) e superficie con riblets (basso, immagine tratta da Lee, 2001).

Anche la particolare composizione del tessuto a maglia con cui sono prodotti i costumi tecnici di questa generazione può generare un effetto riblets (Dean, 2011). Nella figura

15 si notano le asperità formate dal filamento del tessuto di composizione del costume tecnico, con scanalature sulla parte distale del tessuto. Micro asperità sono formate dalle singole onde del filo mentre macro asperità dalle larghe onde del profilo del tessuto a maglia. La dimensione dei riblets è determinante per l'effetto di riduzione della componente di drag di frizione, e questa dimensione è fortemente condizionata nel costume tecnico dalla morfologia del nuotatore, che distende o rilassa il tessuto in base alla proporzioni del soggetto (Brushan, 2012). Quest'ultimo fattore rende molto complessa l'applicazione di questa tecnologia ai costumi tecnici e deve essere tenuto in considerazione in fase di progettazione.

SCHEMA DEI RIBLETS NON DISTESI



(a)

SCHEMA DEI RIBLETS DISTESI

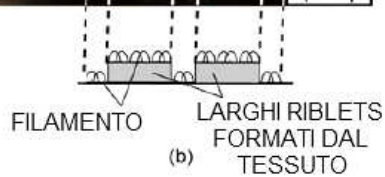
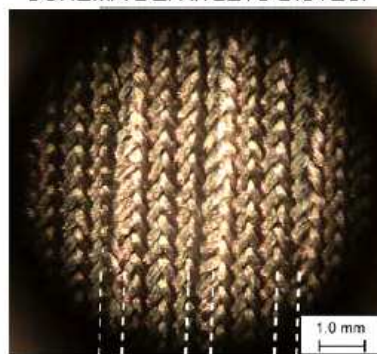


Figura 15. Geometria dei riblets sul tessuto del costume Speedo Fastskin non disteso (a) o disteso (b). Si notano le asperità generate dai fili e dal tessuto (immagine tratta da Dean, 2011).

Per la stagione Olimpica 2004 numerose aziende investono in tecnologie per i costumi tecnici che seguono la linea della conoscenza teorica riguardo la riduzione del drag con asperità. In particolare il Fastskin II Speedo ed il Tyr Aquashift presentano innovazioni di cui la letteratura scientifica si è interessata. Pendergast (2006), testando quest'ultima generazione di costumi tecnici, mostra una riduzione del drag passivo in funzione dell'applicazione di particolari *turbolatori*, ovvero asperità che modificano la forma del costume e rendono la superficie rugosa in determinate zone del corpo (figura 16). Le diminuzioni di drag riportate sono nell'ordine dell'11%-16%.



Figura 16. Applicazione di turbolatori sul costume tecnico Speedo Fastskin II.

Successive innovazioni tecnologiche del costume hanno inoltre tentato di rendere più uniforme e regolare la superficie del costume con termosaldature al posto delle cuciture tra le parti.

Nonostante l'influenza del drag di frizione sul drag totale sia relativamente bassa (20%, Pendergast, 2005), la riduzione di questo parametro può avere una significativa rilevanza sulla prestazione. Per questo motivo un'ultima generazione di costumi, approvati dalla F.I.N.A. dal 2008 al 2010 (Speedo LZR, Jaked J01, Arena X-Glide, Adidas Hydrofoil, Tyr Tracer, BlueSeventy Nero Comp) ha tentato di ridurre ulteriormente la componente di drag di frizione (Moria, 2011b) inserendo materiali idrorepellenti, composti da polimeri derivati dalla gomma, basati su una superficie meno bagnabile in cui l'acqua scorre con maggiore facilità. Tale tecnologia crea uno strato limite di minor spessore e di conseguenza una riduzione della componente di frizione portando a miglioramenti di prestazione natatoria senza precedenti (Berthelot, 2010; O'Connor, 2011).

I costumi tecnici in gomma sintetica, in particolare per Speedo LZR, sono risultato dello sviluppo di rinomati team di ricerca ed ingenti investimenti delle aziende, anche indirizzati al coinvolgimento dei migliori nuotatori al mondo. A seguito di ripetuti studi in laboratorio di fluidodinamica computazionale, ricerche sperimentali in galleria del vento e in vasca idrodinamica, Speedo, il costume LZR, ha abbandonato la linea delle riduzioni di drag favorite dai riblets e dalle asperità di superficie, per concentrarsi sulle riduzioni di drag dovute alle variazioni della forma del nuotatore a seguito di compressione meccanica nelle zone dove l'acqua impatta con maggior pressione dinamica (Matthews Jerney, 2008). In risultato, secondo alcuni, è che questi costumi aumentano significativamente la velocità di nuoto, del 6% in Santos (2010) e dal 2% al 4% per Silveira (2010), rispetto a costumi tradizionali. Per nostra conoscenza, pochi autori hanno indagato gli effetti dei costumi tecnici in gomma e con risultati non del tutto chiari. Il primo lavoro di Bixler nel 2007, analizzando il drag passivo del nuotatore

con fluidodinamica computazionale, misura gli effetti del costume LZR Speedo, composto di lycra e pannelli in poliuretano. L'autore trova un aumento del 6% del drag passivo vestendo il costume tecnico, ma motiva il particolare risultato attribuendolo alle piccole dimensioni ed alla differenza della superficie a contatto con l'acqua del manichino utilizzato per la prova. Questo autore per primo mostra l'attenzione sul materiale del costume nelle specifiche zone in cui impatta l'acqua con maggior pressione. Toussaint (2011) trova riduzioni in drag passivo e attivo del 5%-7% misurando gli effetti dei costumi tecnici in gomma, mostrando però una diminuzione di rispetto ai costumi tecnici in tessuto molto individuale in base alle caratteristiche dell'atleta, e dipendente dal modo in cui il costume si adatta al profilo del nuotatore.

Marinho (2012) riporta un aumento significativo della prestazione dovuta ad una riduzione di drag attivo (metodo fluidodinamica computazionale) tra costumi tecnici in gomma e costumi tradizionali, ma non significativa tra costumi tecnici in gomma e tessuto. Inoltre afferma che la riduzione di drag è dovuta alla diminuzione della componente di pressione, probabilmente conseguenza della compressione del costume che riduce il volume del corpo. Anche Ogita (2010) trova riduzioni di drag attivo minime e non significative rispetto ad un costume tradizionale indossando 3 modelli di aziende differenti di costumi tecnici in gomma coprenti da anche a caviglie. Shiraki (2010) e Santos (2010) affermano che il costume tecnico composto interamente in neoprene migliora la prestazione misurando una riduzione della frequenza di bracciata e della concentrazione di lattato in prove da 200 m o 400 m a velocità sub massimale. Keul (2010) analizza il drag passivo in traino di 8 nuotatori che indossando Speedo LZR, Blueseventy Nero Comp o Arena R-Evolution mostrando riduzioni significative solamente a favore di LZR rispetto al costume tradizionale. Riguardo i parametri

biomeccanici Chollet (2010) indica che il costume in gomma permette un miglior coordinamento della bracciata evitando una sovrapposizione dell'azione dei due arti, mentre Silveira (2010) e Santos (2010) attribuiscono all'aumentata ampiezza di bracciata il miglioramento della velocità dovuto a questi costumi.

Gonjo (2010) ipotizza un effetto di sollevamento delle gambe in scivolamento passivo e compressione meccanica dovuti all'utilizzo dei costumi tecnici in gomma (Speedo LZR e Arena X-Glide) con effetto di riduzione del drag passivo. Infatti quest'ultimo tipo di costumi, in materiale più rigido rispetto al tessile generano una azione meccanica di compressione del corpo.

E proprio questo aspetto potrebbe avere un beneficio nella prestazione del nuotatore. Oltre 30 anni fa Aleyev (1977) ipotizzava che un tessuto stretto sul corpo del nuotatore può evitare deformazioni e oscillazioni del tessuto adiposo sottocutaneo. Berry and McMurray (1987) hanno mostrato minor produzione lattacida indossando calze che comprimono durante un esercizio massimale di corsa o maggior potenza nel salto (Kraemer, 1998). Maitland & Vandertuin (2002) hanno indagato e mostrato l'efficacia dell'abbigliamento sportivo con compressione meccanica per migliorare la forza e la resistenza muscolare di alcuni gruppi muscolari specifici. Con l'idea che un tessuto che comprime riduce le vibrazioni e le oscillazioni muscolari (Doan, 2003)

si è ritenuto possibile anche questo effetto per i costumi tecnici da nuoto in gomma. Bringard (2006) afferma che gli abbigliamenti che comprimono possono favorire la circolazione sanguigna promuovendo una spesa energetica minore in esercizi sub massimali, rispetto ad abbigliamenti convenzionali.

Per ciò che riguarda il nuoto Oliveira (2009) analizza la compressione dei costumi tecnici in gomma (Jaked J01, BlueSeventy Nero Comp, Speedo LZR) sulle zone

corporee con una scansione tridimensionale. L'autore conclude che vi è una grande variazione della compressione e delle zone di compressione in base alle caratteristiche antropometriche dei nuotatori. Per l'analisi effettuata il Jaked ha una azione di leggera compressione sul corpo (0.3%), il BlueSeventy ha grandi variazioni in funzione della zona corporea dallo 0.2% al 3.2%, mentre l'LZR presenta la compressione totale più significativa (2.4%). L'autore conclude che a seconda della morfologia del soggetto, ogni costume tecnico è in grado di adattarsi alle caratteristiche antropometriche in maniera differente e modificare il profilo idrodinamico del nuotatore, indicando come parametro determinante sulla prestazione del nuotatore la scelta del modello e della dimensione del costume tecnico. Un meccanismo alternativo alla base dell'effetto vantaggioso sulla prestazione dato dai costumi tecnici in gomma (Speedo LZR) è proposto da Kainuma (2009). I costumi che comprimono riducono la circolazione del sangue. Questo processo accelera, secondo l'autore, la glicolisi anaerobica sopprimendo la respirazione mitocondriale del sistema aerobico (concetti dell'allenamento Katsu), quindi un effetto di velocizzazione dell'attivazione del meccanismo anaerobico. Secondo l'autore è questo il motivo per cui i record sono migliorati maggiormente nelle distanze corte dove si utilizza il meccanismo anaerobico. Montagna (2009) entra nel merito del materiale del costume per spiegare la funzionalità della compressione, indicando valori specifici della struttura e della lunghezza del passante per rendere efficace la compressione.

L'ingegneria tessile e dello sport ha studiato questi costumi indagando nel materiale l'effetto del vantaggio sulla prestazione. Buder (2010) ha presentato un progetto per un metodo di misurazione del drag passivo utile ad una valutazione oggettiva della qualità del costume tecnico. Moria (2010) mostra una riduzione del

coefficiente di drag del materiale con cui è composto il costume Speedo LZR (poliuretano) rispetto al materiale del costume Speedo Fastskin II (lycra) ed indicando che l'orientamento delle fibre modifica il coefficiente di drag. In un lavoro successivo (Moria, 2011) l'autore indica come la posizione e l'orientamento delle cuciture con cui è assemblato il costume possano incidere in maniera significativa sul coefficiente di drag.

La Federazione Internazionale Nuoto ha successivamente interrotto ulteriori sviluppi del materiale del costume, limitando la composizione del costume al solo tessuto. Fermata al principio del 2010, una nuova generazione di costumi era alla soglia, in materiali definiti *superidrofobici* ([www.textileworld.com](http://www.textileworld.com), 2011). Le superfici superidrofobiche sembrano essere una ottima strategia per la riduzione della resistenza idrodinamica (Hobaek, 2011). Se un fluido scorre su una superficie solida è generalmente ipotizzato che la velocità di flusso sia uguale a zero nella zona di contatto solido-liquido senza condizioni di slittamento. La velocità aumenta poi in funzione della distanza dalla zona di contatto (Batchelor, 1970). Per le superfici superidrofobiche è stato identificato un effetto di scivolamento (*effetto Lotus*, figura 17) nell'interfaccia solido-liquido (Wang, 2009). Questo effetto si ritiene sia dovuto alla zona di aria trattenuta dalle asperità della superficie (Barthlott, 2010).



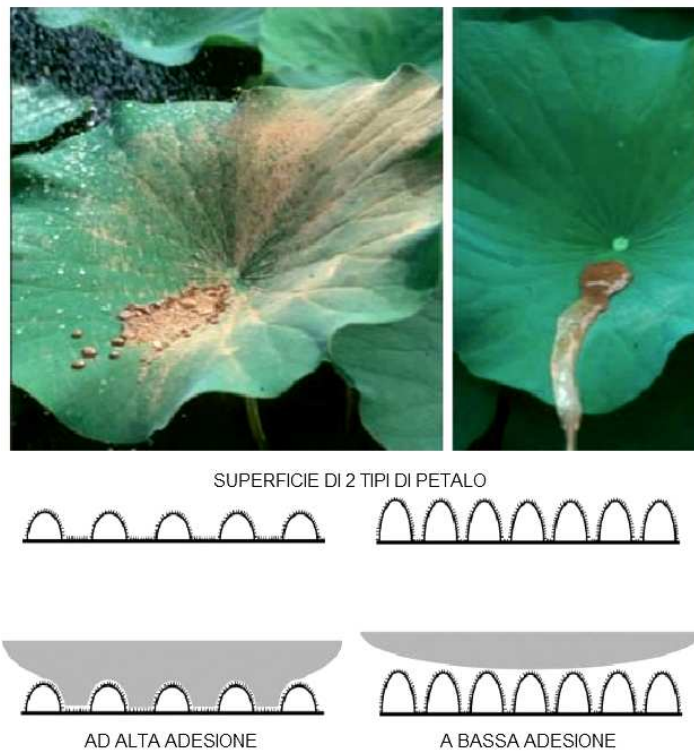


Figura 17. In alto l'illustrazione dell'effetto Lotus (destra), liquido versato su una foglia di loto (immagine adattata da Koch, 2009). In basso una illustrazione schematica della interfaccia liquido-solido di due superfici superidrofobiche a differente adesione (immagine adattata da Bhushan, 2012).

In questa ultima tecnologia un profilo di microsporgenze crea un sottile strato di aria al di sotto della superficie di contatto con l'acqua ed il fluido non bagna il corpo con cui è a contatto. Questo permette all'acqua di scivolare sul corpo senza resistenza di frizione. Una prossima generazione di costumi tecnici da nuoto potrebbe seguire questa strada. Poiché questo metodo imita l'impermeabilità delle foglie di alcune piante, anche in questa occasione la scienza prende spunto per una innovazione tecnologica da un evento naturale.

## **6. EFFETTI DEL COSTUME TECNICO IN GOMMA SUL GALLEGGIAMENTO PASSIVO E SUI VOLUMI POLMONARI**

---

### **6.1. Introduzione**

Nel Campionato del Mondo di Nuoto di Roma 2009 i nuotatori hanno utilizzato costumi prodotti interamente, o parzialmente, con polimeri industriali, abbassando il primato mondiale in 43 eventi. Nonostante l'effetto di questi costumi tecnici nel determinare un aumento della velocità di nuoto non sia completamente compreso, in accordo con alcuni autori, il vantaggio potrebbe essere relazionato ad un incremento del galleggiamento.

Benjanuvatra e collaboratori (2002) non trovano alcun aumento di galleggiamento vestendo un costume tecnico intero. Tuttavia, in accordo con la Commissione Tecnica F.I.N.A., il possibile effetto di galleggiamento dovuto alla formazione di zone di aria tra il costume e la superficie del nuotatore, deve essere preso in considerazione per costumi interamente costituiti di poliuretano/neoprene. Il peso idrostatico di questi costumi, in accordo con il regolamento F.I.N.A. (Dubai Charter on F.I.N.A. requirements for swimwear approval 2009), deve essere minore di 1N.

Lo scopo di questo lavoro era di valutare le differenze di galleggiamento idrostatico di nuotatori che indossano (o non indossano) un costume costituito di poliuretano/neoprene (gomme sintetiche) e relazionare i risultati con le possibili variazioni in volumi polmonari.

## 6.2. Materiali e metodi

A nove nuotatori maschi ( $23.25 \pm 3.01$  anni di età;  $1.80 \pm 0.03$  m di statura;  $75.45 \pm 6.96$  kg di massa corporea) è stato chiesto di effettuare due differenti test. Nel primo è stato misurato il loro galleggiamento idrostatico (temperatura dell'acqua:  $27.5^{\circ}\text{C}$ ) mentre indossavano un costume tradizionale (S) o un costume tecnico in gomma sintetica (da spalle a caviglie) (X-glide Power-skin Arena Italy, non modificato: Xg).

Prima della misurazione ai soggetti è stato chiesto di effettuare un riscaldamento di 10 minuti. Una particolare attenzione è stata posta alla riproduzione delle situazioni pre-gara chiedendo ai nuotatori di non effettuare manovre “non convenzionali” di “adattamento” del costume. Dopo il riscaldamento, i soggetti sono stati trattenuti per 10 secondi sotto la superficie dell'acqua. Sono stati tenuti in posizione attraverso un cavo, connesso a un sistema di traino sul bordo della piscina e fissato mediante una cintura alla vita del nuotatore (figura 18). Il cavo era inoltre connesso ad una cella di carico (Tesy 400, Globus, Italy), posizionata sul margine della piscina ed in grado di misurare la spinta di galleggiamento idrostatico dei soggetti (la forza con il quale il loro corpo tende a tornare sopra la superficie dell'acqua). Dieci misurazioni sono state effettuate in entrambe le condizioni di costume (con S e con Xg). Durante questo test i soggetti trattenevano in respiro a seguito di una massima inspirazione forzate e non espiravano per tutta la durata del test.

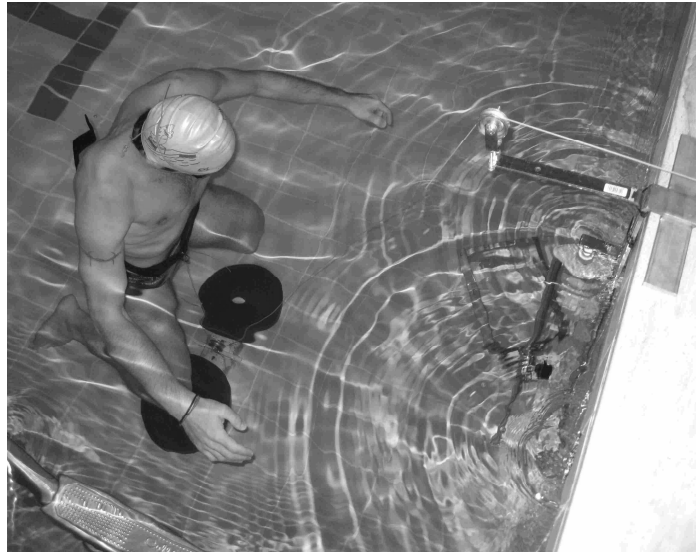


Figura 18. Il settaggio utilizzato per misurare il peso idrostatico dei soggetti. In questo caso il soggetto indossa un costume tradizionale.

Il secondo test è stato eseguito in laboratorio: è stata misurata la circonferenza a seguito di una massima inspirazione e di una massima espirazione mentre il soggetto indossava il costume S o XG. I volumi polmonari (VC: Capacità Vitale, ERV: Volume di Riserva Espiratoria, VT: Volume Corrente, IRV: Volume di Riserva Inspiratoria) sono stati misurati nelle due condizioni di costume (Standard Lung Function Test) utilizzando uno spirometro portatile (K4 Cosmed, Italy).

Questi test sono stati eseguiti in accordo con le procedure tecniche standard (Guidelines for lung function test 1994). I soggetti hanno familiarizzato con le procedure; è stato chiesto loro di ripetere la misura per quattro volte, il valore medio di questo test è stato utilizzato per ulteriori analisi.

### 6.3. Risultati

Il valore medio ( $\pm 1DS$ ) del galleggiamento idrostatico era  $14.51 \pm 4.53$  N per S e  $14.33 \pm 3.99$  N per Xg. Così, anche se il galleggiamento del materiale del costume (come indicato dal produttore) era di 1N, il peso idrostatico del soggetto era minore indossando il costume tecnico Xg. Il coefficiente di correlazione intraclasse (ICC) è stato calcolato sulle 10 prove ( $R = 0.94$ ) mostrando una buona attendibilità delle misurazioni. Così, il valore medio è stato utilizzato per successive analisi.

Il test non parametrico Wilcoxon è stato usato per comparare i valori medi di galleggiamento idrostatico nelle due condizioni di costume; è stata osservata una differenza significativa ( $P < 0.05$ ) anche se la differenza tra le due serie di dati era molto piccola (la differenza media di forza era di  $0.18 \pm 1.63N$ ).

Il valore medio ( $\pm 1SD$ ) della circonferenza toracica durante l'inspirazione massima ( $R=0.86$ ) era  $88.6 \pm 3.70$  cm per S e  $86.6 \pm 3.39$  cm per Xg, mentre durante l'inspirazione massima ( $R=0.99$ ) era  $97.3 \pm 3,26$  per S e  $95.6 \pm 2,48$  per Xg.

In entrambi i casi non sono state osservate differenze statistiche significative ( $P > 0.05$ ).

I valori medi dei volumi polmonari investigati in questo studio sono riportati in Tabella 1. Differenze statisticamente significative sono state osservate in tutti i casi tranne che per VT. Questi dati indicano un generale decremento dei volumi polmonari e della circonferenza toracica indossando un costume tecnico in poliuretano/neoprene e suggeriscono che questo tipo di costume genera una compressione meccanica della zona torace/addome. Questo giustifica il fatto che indossando un costume tecnico i soggetti avessero meno galleggiamento statico rispetto al vestire un costume tradizionale (vedi

sotto), nonostante l'incremento di galleggiamento di 1N dovuto al materiale del costume tecnico.

Tabella 1. Valori medi ( $\pm 1SD$ ) dei volumi polmonari indossando un costume tradizionale (S) e un costume tecnico (Xg).

		Xg	S	Xg-S	P
Volumi Polmonari	IRV	3.47 $\pm$ 0.48	3.26 $\pm$ 0.44	6.5%	< 0.05
	VT	0.88 $\pm$ 0.17	0.94 $\pm$ 0.19	-6.3%	NS
	ERV	1.79 $\pm$ 0.45	2.12 $\pm$ 0.47	-15.5%	< 0.01
	VC	6.14 $\pm$ 0.79	6.31 $\pm$ 0.72	-2.8%	< 0.01

#### 6.4. Discussione e conclusioni

In letteratura non ci sono condivisioni sull'effetto che causa il vantaggio in velocità di nuoto utilizzando un costume tecnico, anche se i miglioramenti prestativi promessi dai produttori sono indubitabili.

Alcuni autori, misurando il drag attivo o passivo con e senza i costume tecnici, suggeriscono che il loro utilizzo determina un consistente vantaggio in velocità di avanzamento e attribuiscono questa differenza a riduzioni di drag (Toussaint et al. 2002, Pendergast et al. 2006). Delle tre componenti che determinano il drag (pressione, onda e frizione), la componente di frizione sembra quella su cui il costume ha una larga influenza. Tuttavia, come indicato da (Mollendorf et al. 2004; Blixer et al. 2007) il drag di frizione è solo il 10-15% del drag totale; quindi la riduzione di questa sola componente è probabilmente non sufficiente per giustificare la larga differenza in prestazione dovuta all'utilizzo dei costumi tecnici in gomma sintetica.

In accordo con altri autori, il galleggiamento statico può essere un fattore in grado di influenzare la prestazione (McLean and Hinrichs 2000). Sembra possibile che il nuovo tipo di costume tecnico possa modificare questo parametro, infatti la Commissione Tecnica F.I.N.A. mostra come possibile effetto di questo indumento l'intrappolamento di aria causato da depositi di aria imprigionati tra il costume ed il nuotatore. Il peso idrostatico di questi costumi deve essere minore di 1N in accordo con i regolamenti F.I.N.A. (Dubai Charter on F.I.N.A. requirements for swimwear approval 2009). Numerosi studi hanno mostrato un sollevamento idrostatico maggiore indossando numerosi tipi di costumi tecnici (Yamamoto, 1999; Benjanuvatra 2002; Tomikawa 2003; Roberts 2003; Perrier 2002; Perrier, 2004; Tomikawa 2009; Chatard 2008); tuttavia, alcuni di questi sono costumi prodotti per il triathlon, con spessore particolarmente grosso e non usati nelle gare di nuoto. Per quanto riguarda i costumi tecnici utilizzati in vasca molti ricercatori non trovano nessuna differenza significativa in galleggiamento statico (Benjanuvatra et al. 2002, Chatard and Wilson 2008, Roberts et al. 2003). Cordain and Kopriva (1991) suggeriscono anche che un incremento di galleggiamento ottenuto artificialmente restituisce un effetto negativo sulla prestazione tecnica.

In questo studio, è stato trovato un sollevamento idrostatico medio minore (nonostante la differenza sia minima) quando il soggetto indossa un costume tecnico costituito di gomma sintetica. Queste conclusioni potrebbero essere messe in relazione con l'osservata riduzione di circonferenza toracica durante una massima espirazione o inspirazione, ed alla riduzione dei volumi polmonari nelle prove in cui i soggetti indossavano il costume tecnico. Questi risultati possono essere attribuiti ad una compressione toracica o addominale causata dall'utilizzo di questi costumi. I dati

riportati in questo studio indicano un effetto opposto all'ipotesi di intrappolamento di aria tra costume e soggetto.

In conclusione, in accordo con i dati presentati, il miglioramento in prestazione causato dall'indossare il costume tecnico in gomma sintetica (Xg) non è in relazione con un incremento di galleggiamento statico, anche se questi costumi tecnici potrebbero produrre effetti differenti in condizione dinamica.



## **7. EFFETTI IDRODINAMICI PRODOTTI DAL COSTUME TECNICO IN GOMMA SUL DRAG PASSIVO E SULLA POSIZIONE DEL CORPO**

---

### **7.1. Introduzione**

La ridotta velocità di spostamento e l'elevato costo energetico che caratterizza lo sport del nuoto è dovuto principalmente ad una forte azione frenante (drag) determinata dalla elevata viscosità dell'acqua (Mollendorf, 2004). Il valore del drag è dipendente principalmente da tre fattori: la forma del corpo e la separazione che questi determina nel flusso (drag di pressione); le caratteristiche dello strato limite attorno al corpo (drag di frizione); la formazione di onda davanti al corpo stesso (drag d'onda) (Di Prampero, 1974).

Proprio con l'obiettivo di ridurre la resistenza idrodinamica e migliorare la prestazione è stato proposto nel 2000, il primo costume intero tecnico da nuoto in materiale tessile. I primi studi eseguiti hanno confermato questo indirizzo, riportando riduzioni di drag attivo (Toussaint, 2002; Benjanuvatra, 2002; De Lucas, 2000; Pendergast, 2006) e tra il 2% ed il 5% di drag passivo in superficie, (Benjanuvatra, 2002; Smith, 2007). L'azione di questi costumi è sembrata particolarmente indirizzata a ridurre la componente di drag di pressione tramite variazione del flusso attorno al nuotatore (Mollendorf, 2004). Secondo alcuni ricercatori (Mollendorf 2004; Chatard 2008) è confermata la relazione tra la quantità di superficie corporea coperta dal costume in tessuto e la percentuale di riduzione del drag. Non sono state invece

riscontrate variazioni per quanto riguarda la posizione assunta dal nuotatore in avanzamento (Roberts, 2003). Diversi autori sono concordi nell'affermare che i costumi tessili non hanno nessun effetto sul galleggiamento statico (Roberts, 2003; Chatard, 2008).

Nel 2008 alcuni costumi tecnici sono stati prodotti in gomma sintetica (poliuretano o neoprene), prima con parti inserite sul tessile, poi integralmente. Questi sviluppi hanno indubbiamente apportato un miglioramento significativo sulle velocità nel nuoto (Silveira, 2010; Santos, 2011), contribuendo al miglioramento di 43 record mondiali in un solo evento, risultato senza precedenti nel nuoto (O'Connor, 2011). Berthelot (2010) ha dimostrato che l'avvento dei costumi tecnici in gomma ha incrementato del 2% il trend di miglioramento della prestazione nel nuoto, risultato probabilmente dovuto agli effetti del materiale utilizzato (Neiva, 2010). Bixler (2007) per primo ha posto l'attenzione su questa generazione di costumi, evidenziando l'importanza di inserire materiale in poliuretano in specifiche zone del costume dove si ritiene vi sia un maggiore impatto con l'acqua. Sembra infatti che questi "pannelli" siano in grado di ridurre il coefficiente di Drag (Moria, 2011b). E' inoltre dimostrato che gli effetti del costume si manifestano in modi differenziati e non in misura proporzionale in ciascun nuotatore (Touissant, 2011), tanto da promuovere teorie che ipotizzano la riduzione del drag dovuta alla significativa compressione meccanica determinata da questo tipo di costume sul corpo del nuotatore (Oliveira, 2009) con conseguenti vantaggi sulla prestazione (Kainuma, 2009; Montagna, 2009).

Attorno al corpo del nuotatore la dinamica del flusso è misurata nel numero di Reynolds ( $Re$ ), un valore adimensionale determinato nel nuotatore dalle variabili di velocità e lunghezza del corpo e la costante di viscosità cinematica.  $Re$  nei nuotatori

oscilla in valori da  $5 \times 10^5$  a  $5 \times 10^7$  (Fox, 1992) definendo un regime di transizione laminare/turbolento dove il drag di forma presenta un intervento di percentuale maggiore in confronto al drag di frizione e d'onda (Toussaint, 1988) con valori che variano con l'aumento della velocità (52 – 74%, Pendergast, 2005). Al contrario alcuni autori riportano differenti rapporti tra drag di pressione, frizione ed onda in funzione della velocità con maggiore influenza di frizione (Vorontsov, 2000) o onda (Vennel, 2006).

Lo studio della forma assunta dal nuotatore in avanzamento è stato affrontato per primo da Clarys nel 1979, riportando un'alta correlazione tra valori di sezione di impatto del corpo e valori di drag di forma, mantenendo la migliore posizione idrodinamica durante uno scivolamento. Ma la posizione di massima orizzontalità del corpo non è mantenuta con facilità. E' noto che in situazione statica, la forma e la particolare composizione del corpo umano, genera una non equilibrata disposizione di forze tra peso e galleggiamento che si traduce in un momento di torsione del nuotatore con conseguente affondamento delle gambe (Gagnon, 1981; McLean, 1998; Zamparo, 2009). Nelle fasi dinamiche questo effetto di galleggiamento influenza il costo energetico del nuotatore che aumenta in funzione dell'affondamento delle gambe (Pendergast, 1977; Chatard, 1990). Se il nuotatore è in movimento questo effetto diminuisce poichè la velocità solleva il corpo del nuotatore e favorisce il sollevamento delle gambe (Lavoie, 1986). L'inclinazione del tronco, determinata dall'affondamento delle gambe, influenza il drag del nuotatore come conseguenza di una maggiore sezione di impatto frontale (Zamparo, 2009). Strzala (2010) conferma come l'inclinazione del tronco o angolo di attacco sia negativamente correlato con la velocità di nuoto in giovani nuotatori.

Per studiare le basi e gli effetti fisici della riduzione del drag dovuta ad indumenti tecnologici, il metodo più appropriato è la misurazione del drag passivo poiché elimina le potenziali interferenze della tecnica natatoria (Chatard, 1990), considerando la questione controversa riguardo i metodi di misurazione ed i valori di Drag attivo (Di Prampero, 2011). Lo scopo di questo lavoro è quello di indagare gli effetti dei costumi tecnici sulla posizione del corpo del nuotatore osservando la relazione tra la posizione del corpo ed il drag passivo. Con questo obiettivo sono stati misurati posizione del corpo e drag durante il traino passivo ( $D_p$ ) di 14 nuotatori che indossavano o non indossavano il costume tecnico in tessuto o in gomma sintetica.

## **7.2. Metodi**

### **7.2.1. Partecipanti**

Quattordici nuotatori maschi (età  $24 \pm 4$  anni, altezza  $180 \pm 4$  cm e massa corporea di  $73.5 \pm 3.9$  kg) hanno partecipato a questo studio su base volontaria. Tutti i partecipanti hanno firmato un consenso informativo per la partecipazione al test.

### **7.2.2. Procedura sperimentale**

Il protocollo prevedeva la misurazione del drag passivo e dell'inclinazione dei segmenti tronco e gambe. E' stato svolto un pre-test per permettere ai partecipanti di prendere confidenza con la procedura ed assumere una posizione stabile durante tutto la durata del traino.

**Prove.** Sono state effettuate sei prove di 20 m di traino passive in superficie rispettivamente alla velocità di 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 and 2.0 m/s, separate da 3 minuti di recupero. Il protocollo è stato ripetuto in ordine casuale in quattro condizioni di costume specificate di seguito. Il nuotatore assumeva durante il traino un atteggiamento stabile nella miglior posizione idrodinamica di scivolamento, con la testa in linea in mezzo alle braccia estese sopra la testa, le mani unite, gambe e piedi in massimo allungamento.

**Costumi.** Le quattro condizioni di costume analizzate erano: 1) *Rs*; il nuotatore indossa un costume tecnico intero (da spalle a caviglie) costituito di gomma sintetica (X-glide Power-skin, Arena, Italy); 2) *Ts* = il nuotatore indossa un costume tecnico intero (da spalle a caviglie) costituito di materiale tessile; (R-Evolution+ Power-skin, Arena, Italy); 3) *S* = il nuotatore indossa un costume tradizionale; 4) *PB* = il nuotatore indossa un costume tradizionale ed un pull-buoy (21 x 12.5 x 8 cm, Finis, Livermore, USA).

La densità dei costumi *Rs* e *Ts* è in accordo con le procedure standard dei requisiti per l'approvazione 2009 dei costumi, periodo di utilizzo di questa generazione di costumi tecnici. Tutti i costumi erano asciutti prima di iniziare il test e i nuotatori prima di entrare in vasca comprimevano eventuali residui di aria tra costume e corpo utilizzando le loro mani come da procedura in Mollendorf (2004).

**Misurazione del drag passivo.** Per misurare la forza (N) di drag passivo dei nuotatori è stato utilizzato il sistema di traino Ben-Hur (ApLap, Roma, Italia) costituito da un traino-motore elettromeccanico che tira il nuotatore mediante un cavo a velocità controllate e modulate (Zamparo, 2009).

**Posizione del corpo.** I nuotatori erano filmati alla frequenza di campionamento di 50 Hz con una telecamera subacquea (Sony Hyper Had, TS-6021PSC, Giappone). La

telecamera era posizionata perpendicolarmente alla direzione di avanzamento del soggetto sul piano sagittale, 15 m distante dalla partenza, 0.30 m sotto la superficie dell'acqua ed a 3 m di distanza dal nuotatore. La camera registrava 2 m della parte centrale della prova di traino del nuotatore.

### 7.2.3. Analisi dei dati

**Drag passivo.** Il  $D_p$  (espresso in Newtons) era acquisito e registrato usando il programma Sport DAQ (ApLap, Roma, Italia).

**Posizione del corpo.** La calibrazione dei parametri intrinseci delle telecamere era ottenuta da una acquisizione a secco di una scacchiera, corretta per le applicazioni subacquee (Lavest, 2003). Un fattore di correzione di 1.333 è stato applicato per la correzione della distorsione dell'acqua (Lavest, 2003). L'area di acquisizione dati è stata calibrata con un metodo precedentemente utilizzato in letteratura (Clothier, 2004).

La stima dei parametri è stata confermata utilizzando il Camera Calibration Toolbox per Matlab (Bouquet, 2008). Il tracking automatico dei features è stato eseguito per ciascuna sequenza utilizzando una applicazione basata sulla tecnica di registrazione proposta da Lucas (1981) e sviluppata da Tomasi (1991).

I features erano attaccati ai seguenti punti di riferimento anatomici: angolo inferiore della scapola (AS), grande trocantere (GT) e testa della fibula (HF). In questa maniera è stato possibile stimare i seguenti angoli: l'angolo tra l'orizzontale e il segmento del tronco passante da AS e GT ( $TI$ ) e l'angolo tra l'orizzontale e il segmento degli arti inferiori passante per GT e HF ( $LI$ ) (figura 19).

Il valore angolare medio dei valori angolari calcolati da tutti i fotogrammi acquisiti e analizzati di ciascun video era considerato rappresentativo del nuotatore alla specifica velocità e nella specifica condizione di costume utilizzato.

Per avere un indice di accuratezza della misurazione, è stata stimata la distanza tra GT e HF per tutti i fotogrammi a tutte le velocità di traino in un soggetto e la deviazione standard era di 0.8 cm.

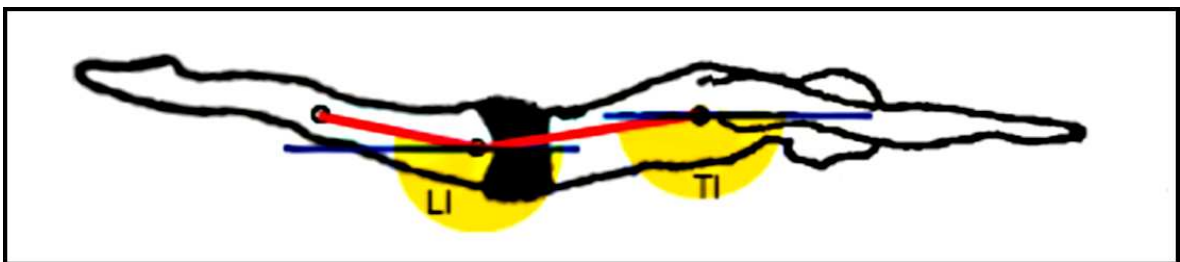


Figura 19. Il nuotatore nella migliore posizione di scivolamento.

**Calcoli.** La superficie corporea totale è stata stimata per ciascun soggetto con la seguente equazione, come indicato in Shuter and Aslani (2000):

$$BSA = 71.84 * BM^{0.425} * BH^{0.725}$$

dove BM è la massa corporea (kg) e BH è la statura (cm).

Il BSA è stato utilizzato per calcolare l'area effettiva di impatto ( $A_{eff}$ , m<sup>2</sup>) per ciascun nuotatore come proposto da Mollendorf (2004) ma considerando solamente la parte di superficie corporea che in posizione orizzontale impatta l'acqua. *LI* è maggiore di 180° a tutte le velocità e quindi, riguardo la superficie di impatto frontale durante il nuoto trainato, il tronco copre completamente gli arti inferiori. E' stata quindi considerata superficie di impatto la parte anteriore della testa, delle braccia e del tronco ovvero il 27,1% del BSA come proposto da Tikuisis (2001):

$$A_{eff} = A_f * \cos \alpha + (27.1\% BSA) \sin \alpha$$

dove  $\alpha$  è  $TI$  espresso in radianti,  $A_f$  è l'area frontale quando il soggetto è orizzontale ( $\alpha = 0$ ).

Per il calcolo di  $A_f$  è stato utilizzato il metodo proposto da Clarys (1990):

$$A_f = 6.9256 * BM + 3.5043 * BH - 377.156$$

Alle velocità del nuotatore il drag di pressione ( $W_d$ ) è il maggior determinante del Drag totale (Toussaint, 1988; Pendergast, 2005).  $W_d$  è stato calcolato come proposto da Mollendorf (2004) usando la seguente equazione:

$$W_d = \frac{1}{2} \rho * A_{eff} * C_d * V^n$$

dove  $\rho$  è la densità dell'acqua ( $997 \text{ kg} * \text{m}^{-3}$  at  $25^\circ$ ),  $C_d$  è il coefficiente di drag,  $V$  è la velocità misurata,  $n$  è il coefficiente stimato attraverso l'interpolazione dei valori di drag passivo misurati nel traino alle differenti velocità e nelle differenti condizioni di costume utilizzato.

Il valore di  $K$  effettivo è calcolato con l'equazione di calcolo del drag (Karpovich, 1933):

$$K = \frac{Dp}{V^2}$$

#### 7.2.4. Analisi statistica

Tutti i dati sono presentati come medie  $\pm$  DS. Verificate le assunzioni di normalità e omoschedasticità, è stata utilizzata una ANOVA a due vie per misure ripetute con test post-hoc di Bonferroni per valutare l'effetto della velocità di nuoto, del tipo di costume, e della loro interazione su  $LI$  e  $A_{eff}$ . E' stato quindi analizzato, attraverso un modello di



regressione lineare multipla, l'effetto del costume utilizzato, di  $A_{eff}$  e di  $LI$  (predittori) sul  $k$  (variabile dipendente). In tutte le analisi, il livello di significatività è fissato a  $\alpha = 0.05$ . Le analisi statistiche sono state effettuate con il Software SPSS Rel. 14.0.0 (SPSS Inc., Chicago, IL) ed R (R Development Core Team, Vienna, Austria).

### 7.3. Risultati

$D_p$  aumenta con tendenza quadratica all'aumentare della velocità, le condizioni  $TS$ ,  $RS$  e  $Sp$  non modificano l'andamento quadratico con cui il  $D_p$  agisce sul nuotatore (Figura 20).

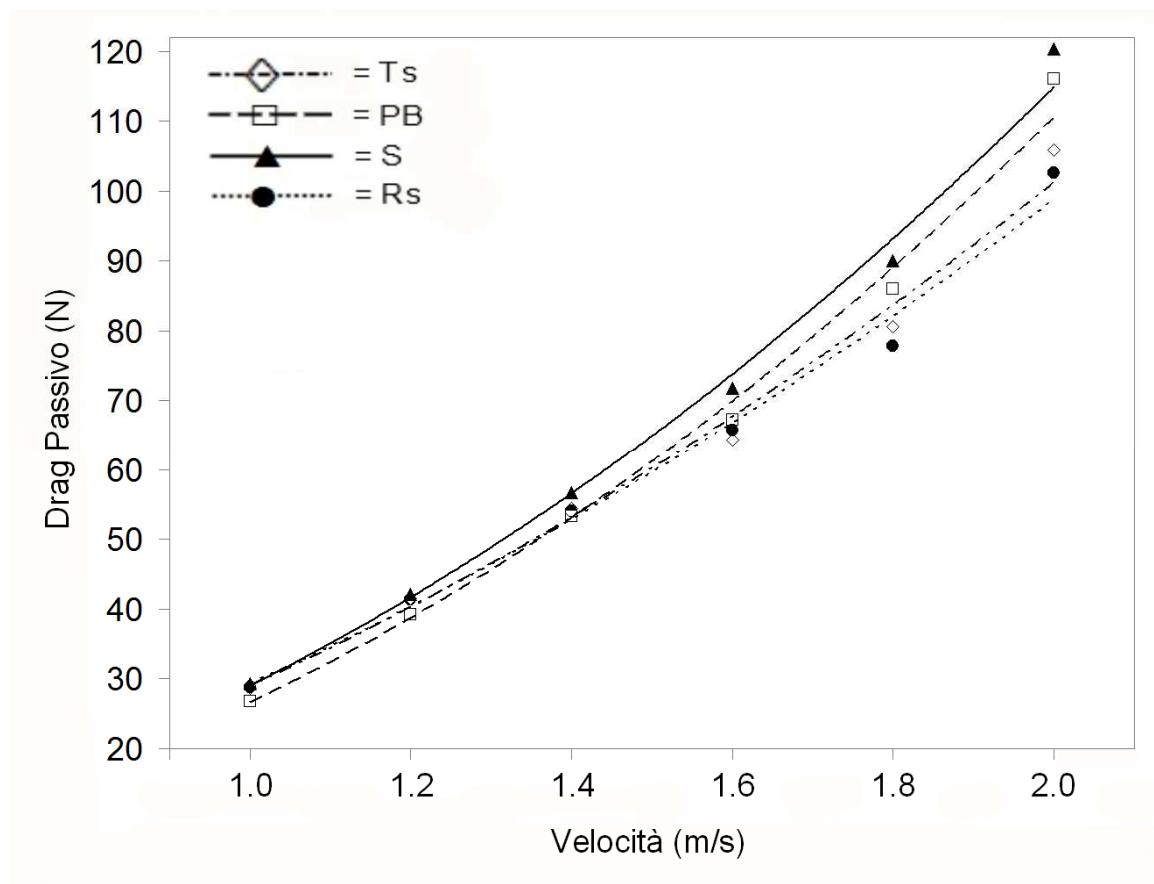


Figura 20.  $D_p$  alle 6 velocità analizzate per ciascuna condizione di costume

$Dp$  misurato in vasca, nella condizione  $RS$  risulta minore rispetto alla condizione  $TS$  anche se in maniera non significativa ( $p>0.05$ ). Il  $Dp$  nel  $RS$  e  $TS$  è significativamente minore ( $p<0.05$ ) rispetto alla condizione  $S$  (Tabella 2). Il  $Dp$  nella condizione  $Sp$  è minore rispetto alle altre condizioni alle velocità basse (1.0 – 1.2 m/s) mentre è alla pari con le altre condizioni nell'incremento di velocità.

Il valore medio di  $BSA$  ( $m^2$ ) calcolato da *eq.1* è di  $0.53 \pm 0.03$ . Il valore medio di  $Af$  ( $m^2$ ) calcolato con *eq.3* è di  $0.078 \pm 0.006$ . Nessuna differenza significativa ( $p>0.05$ ) è stata osservata tra i valori medi di  $A_{eff}$  ( $m^2$ ) con l'aumento della velocità, né tra le diverse condizioni di costume o nell'interazione tra costume e velocità (Tabella 2).

Con l'aumento della velocità il valore medio di  $Cd$  aumenta significativamente tra 1.0 e 1.2 m/s, per poi stabilizzarsi a 1.6 m/s e diminuire a 1.8 e 2.0 m/s. Il valore medio di  $Cd$  in  $Rs$  è significativamente minore rispetto alla condizioni a  $S$  in tutte le velocità, rispetto a  $Ts$  a 1.2 e 1.4 m/s e rispetto a  $Pb$  a 1.2, 1.4 e 1.8 m/s (Tabella 2).

Tabella 2.  $Pd$ ,  $A_{eff}$  e  $Cd$  alle condizioni di costume e velocità analizzate

	Velocità di traino (m/s)					
	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
$A_{eff}$ in $Ts$ ( $m^2$ )	$0.16 \pm 0.03$	$0.15 \pm 0.04$	$0.14 \pm 0.03$	$0.13 \pm 0.03$	$0.14 \pm 0.03$	$0.14 \pm 0.03$
$A_{eff}$ in $Pb$ ( $m^2$ )	$0.14 \pm 0.02$	$0.14 \pm 0.03$	$0.14 \pm 0.02$	$0.14 \pm 0.02$	$0.14 \pm 0.04$	$0.16 \pm 0.04$
$A_{eff}$ in $S$ ( $m^2$ )	$0.15 \pm 0.04$	$0.14 \pm 0.03$	$0.14 \pm 0.03$	$0.14 \pm 0.04$	$0.14 \pm 0.03$	$0.15 \pm 0.04$
$A_{eff}$ in $Rs$ ( $m^2$ )	$0.17 \pm 0.04$	$0.16 \pm 0.05$	$0.17 \pm 0.03$	$0.16 \pm 0.04$	$0.14 \pm 0.03$	$0.15 \pm 0.04$
$Cd$ in $Ts$	$0.36 \pm 0.07$	$0.40 \pm 0.11$	$0.41 \pm 0.08$	$0.40 \pm 0.10$	$0.39 \pm 0.08$	$0.39 \pm 0.06$
$Cd$ in $Pb$	$0.40 \pm 0.08$	$0.40 \pm 0.07$	$0.40 \pm 0.07$	$0.38 \pm 0.06$	$0.39 \pm 0.09$	$0.39 \pm 0.10$
$Cd$ in $S$	$0.41 \pm 0.08$	$0.42 \pm 0.10$	$0.43 \pm 0.08$	$0.43 \pm 0.10$	$0.40 \pm 0.07$	$0.44 \pm 0.11$
$Cd$ in $Rs$	$0.34 \pm 0.07$	$0.32 \pm 0.05$	$0.34 \pm 0.03$	$0.33 \pm 0.06$	$0.35 \pm 0.09$	$0.36 \pm 0.07$

$TI$  tende ad aumentare in maniera non significativa con l'incremento della velocità (Figura 21). Questo andamento non si presenta soltanto in  $Sp$  ma l'interazione tra costume e velocità non raggiunge la significatività. Il valore medio di  $TI$  delle 6 velocità

è rispettivamente:  $172.8 \pm 1.2$  in *Ts*;  $173.0 \pm 1.0$  in *PB*;  $173.0 \pm 0.5$  in *S*;  $171.2 \pm 1.2$  in *Rs*. *LI* tende ad aumentare con l'incremento della velocità in tutte le condizioni di costume, seppure in maniera non significativa. Il valore medio di *LI* delle 6 velocità è rispettivamente:  $187.8 \pm 1.4$  in *Ts*;  $189.0 \pm 0.6$  in *PB*;  $185.7 \pm 1.3$  in *S*;  $188.4 \pm 1.2$  in *Rs*. Una differenza significativa ( $p < 0.05$ ) è stata trovata tra *S* e tutte le restanti condizioni di costume (Figura 22), mentre non si è rivelato nessun effetto significativo tra il tipo di costume e la velocità.

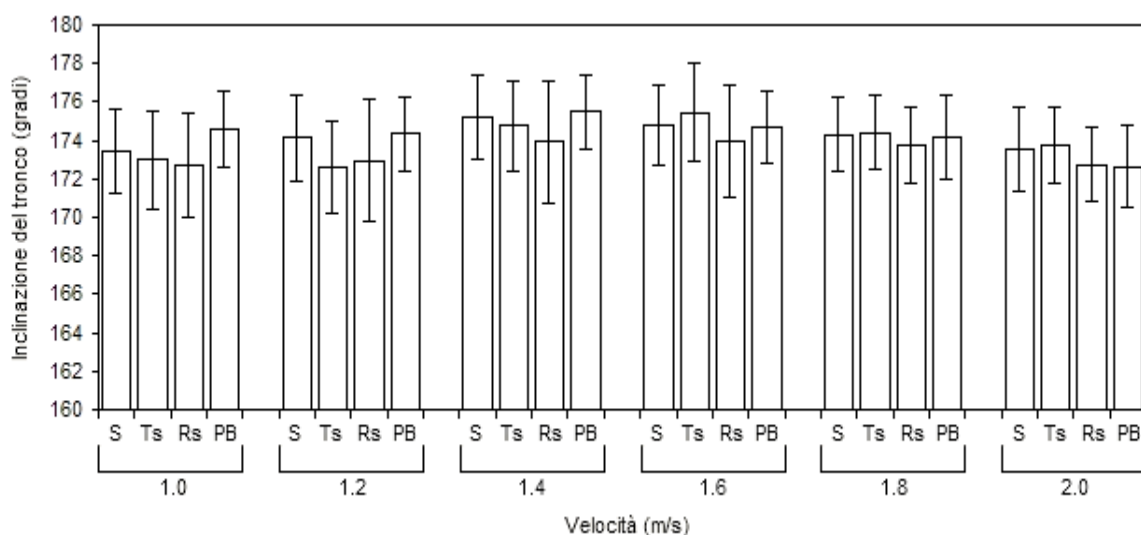


Figura 21. *TI* alle sei velocità analizzate in ciascuna condizione di costume.

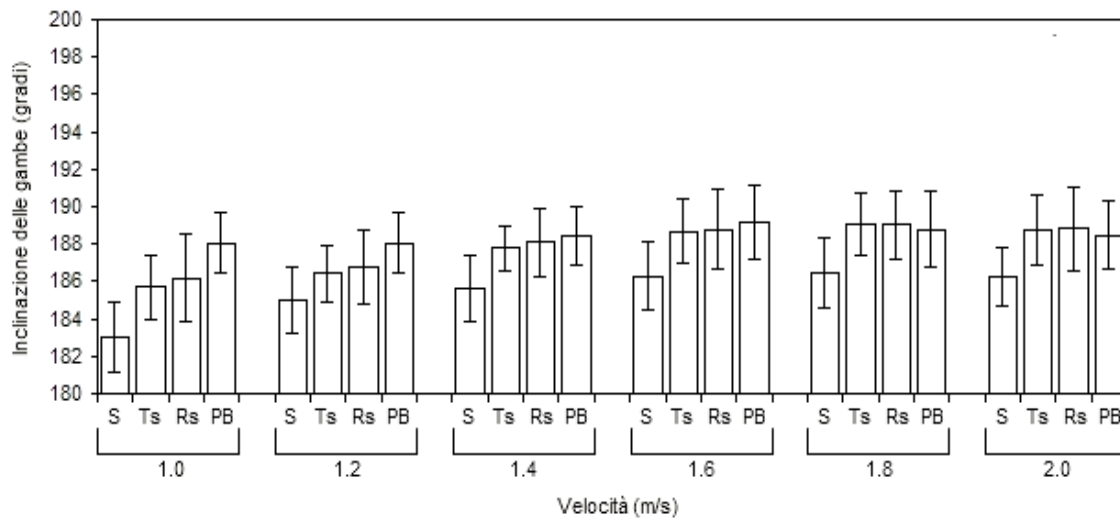


Figura 22. *LI* alle sei velocità analizzate in ciascuna condizione di costume.

**Regressione multipla.** In via preliminare, sono state analizzate le correlazioni tra *K* e *LI*, e tra *K* e *Aeff*, considerando congiuntamente i valori relativi a tutte le condizioni di costume e a tutte le velocità. E' stata osservata una correlazione media ( $r = -0.56$ ,  $p \cong 0$ ) tra *K* e *LI* (Figura 23). Assumendo *LI* come predittore, emerge che tale variabile spiega il 30.9% della varianza di *K*, ignorando l'effetto di *Aeff*. Per valutare se e in che misura tale correlazione fosse influenzata dall'*Aeff*, è stata calcolata la correlazione parziale tra *K* e *LI*, rispetto ad *Aeff*. Tale correlazione è risultata solo leggermente inferiore a quella complessiva ( $r = -0.46$ ,  $p \cong 0$ ). Quindi a prescindere dalla condizione di costume e dalla velocità ed escludendo l'effetto di *Aeff*, *LI* spiega il 21.0% ( $R^2$ ) della varianza di *K*.

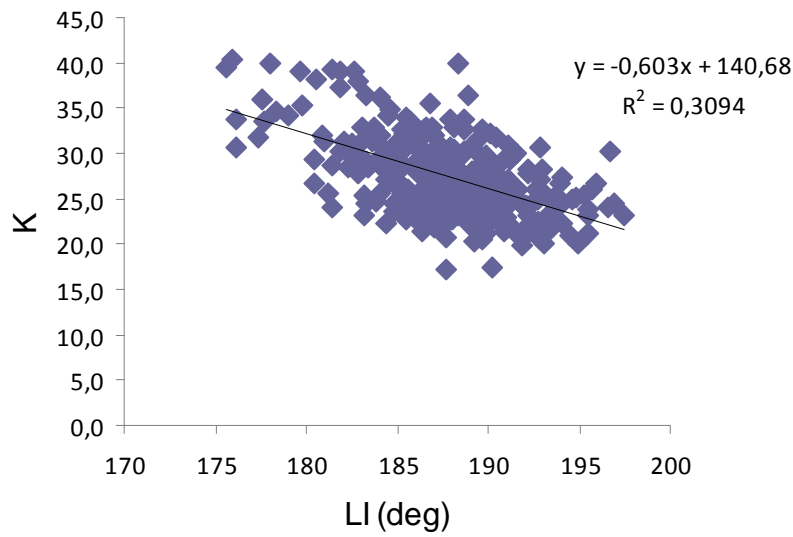


Figura 23. Relazione tra  $K$  e  $LI$  a prescindere da tipo di costume e velocità.

Una correlazione media ( $r = 0.50$ ,  $p \cong 0$ ) è stata osservata anche tra  $K$  e  $A_{eff}$  (Figura 24).  $A_{eff}$  spiega pertanto il 25.3% ( $R^2$ ) della varianza di  $K$ , ignorando l'effetto combinato di  $LI$ . La correlazione parziale tra  $K$  e  $A_{eff}$ , escludendo l'effetto dovuto alla variazione di  $LI$  risulta anche in questo caso solo leggermente inferiore alla correlazione complessiva ( $r = -0.38$ ,  $p \cong 0$ ), dimostrando un effetto di  $A_{eff}$  che, a prescindere dal comportamento di  $LI$ , spiega il 14.6% ( $R^2$ ) della varianza di  $K$ .

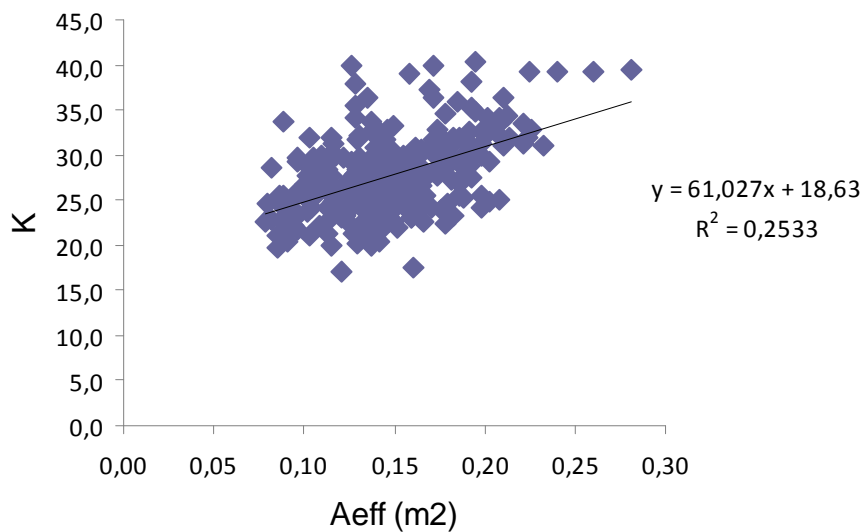


Figura 24. Relazione tra  $K$  e  $A_{eff}$  a prescindere da tipo di costume e velocità.

Emerge pertanto che sia  $A_{eff}$  che  $LI$  hanno un effetto specifico su  $K$ . E' stato quindi stimato un modello di regressione lineare multipla con  $K$  come variabile dipendente e  $A_{eff}$  e  $LI$  come variabili indipendenti. L'equazione di previsione di  $K$  derivata dal modello di regressione multipla è:

$$K = 104.8325 + 41.6619 * A_{eff} - 0.44422 * LI$$

I coefficienti e l'intercetta sono tutti significativamente diversi da 0 ( $p \cong 0$ ). Nel complesso, il modello spiega il 40.3 % della variazione nel  $K$  ( $R^2=0.403$ ).

E' stata quindi inserita nel modello di regressione la variabile tipo di costume come predittore. Essendo tale variabile categorica e non quantitativa, è stata selezionata una categoria di riferimento (costume  $S$ ) e sono stati quindi stimati gli effetti relativi alle altre tre condizioni di costumi ( $Rs$ ,  $Pb$  e  $Ts$ ) come variabili dummy. Le stime dei coefficienti nel modello di regressione sono i seguenti:

	Coefficiente	Significatività (p)
<i>Intercetta</i>	97.1844	< 2e-16
<i>Rs</i>	-1.7166	0.00275
<i>Pb</i>	-0.3427	0.53453
<i>Ts</i>	-1.2175	0.02528
<i>TI</i>	-0.4030	1.93e-12
<i>Aeff</i>	46.3645	2.07e-13

Attraverso questo modello, la varianza spiegata è del 42.65%. L'equazione di tale modello è:

$$K = 97.1844 - 1.7166 * I_{(Rs)} - 0.3427 * I_{(Pb)} - 1.2175 * I_{(Ts)} + 46.3645 * Aeff - 0.4030 * TI$$

L'intercetta ed i coefficienti che descrivono *Aeff* e *TI* sono significativamente diversi da 0 ( $p \cong 0$ ) mostrando come ci sia un generale effetto di *Aeff* e *TI* sulla variazione di *K*.

I coefficienti che descrivono *Ts* e *Rs* sono significativamente diversi da 0 (rispettivamente  $p = 0.01$  e  $p \cong 0$ ) rispetto alla condizione di riferimento del modello (*S*), mostrando come questi due costumi, a prescindere da *Aeff* e *TI*, possano influenzare il valore di *K*. Indossare *Rs* determina un *K* predetto mediamente più basso di 1.7166 rispetto allo slip, mentre indossando *Ts* il valore è più basso (1.2175). Questo conferma come la riduzione di *Dp* nelle prove *Ts* e *Rs* non derivi solamente da una variazione di posizione del corpo (*Aeff* e *TI*) ma da ulteriori fattori evidentemente legati a proprietà intrinseche dei costumi.

Il coefficiente che descrive *Pb* non è significativamente diverso da 0 ( $p > 0.05$ ) rispetto alla condizione di riferimento del modello (*S*), mostrando come, a prescindere da *Aeff* e *TI*, non ci sia una differenza tra *S* e *Pb* nel valore di *K*. Questo conferma come la riduzione di *Dp* nelle prove *Pb* possa essere sostanzialmente attribuibile ad una variazione di posizione del corpo (*Aeff* e *TI*) e non ad ulteriori fattori.

## 7.4. Discussione e conclusioni

Gli effetti prodotti dall'introduzione in vasca del costume tecnico hanno incrementato la prestazione nel nuoto in breve tempo con un miglioramento senza precedenti (O'Connor, 2011). L'obiettivo di questo lavoro è stato quello di indagare gli effetti del costume tecnico sulle resistenze passive e sulla posizione del corpo del nuotatore in scivolamento.

La relazione di potenza con cui la velocità influenza il drag (Karpovich, 1933), viene confermata nei dati di questo lavoro anche con l'utilizzo del costume tecnico in gomma o tessuto come proposto nel nuotatore in scivolamento passivo con costume tradizionale (Havriluk, 2005). Il modello di regressione multipla utilizzato nel lavoro si adatta ai dati osservati in vasca. I valori di  $D_p$  stimati e misurati mostrano come la copertura della superficie del corpo con costumi prodotti in gomma o tessuto riduca il valore di drag passivo mediamente del 6-8% rispetto ai costumi tradizionali alle velocità del nuotatore, con valori che si accostano alle riduzioni precedentemente riportate in letteratura indossando costumi in gomma (Toussaint (2011).

Alle velocità del nuotatore il drag passivo è influenzato in misura maggiore dalla componente di pressione ( $W_d$ ) (Toussaint, 1988; Pendergast, 2005). In questo lavoro il valore di drag è stato stimato dall'equazione del drag di pressione dove la significativa diminuzione di  $D_p$  dovuta all'utilizzo del costume tecnico è funzione della variazione dell'area effettiva di impatto ( $A_{eff}$ ) e del coefficiente idrodinamico ( $C_d$ ). Come suggerito da Mollendorf (2004), le variazioni dell'area effettiva di impatto sono determinate dall'inclinazione del tronco del nuotatore in avanzamento. I risultati mostrano come, a prescindere da velocità e condizione di costume,  $A_{eff}$  spieghi il



14.6% della variazione di  $Dp$  attraverso  $K$ , quindi come il variare della posizione del tronco in scivolamento possa incidere sulla resistenza idrodinamica del nuotatore. Indossare il costume tecnico ha un effetto su  $A_{eff}$  maggiore rispetto al non utilizzare il costume tecnico. Infatti  $A_{eff}$  influenza maggiormente la variazione di  $Dp$  (17.7% e 26.4%) utilizzando rispettivamente il costume  $R_s$  e  $T_s$ . La posizione del tronco in scivolamento passivo sembra quindi subire significative variazioni in funzione del costume utilizzato. Questo risultato è in opposizione al lavoro di Roberts (2003) in cui si sostiene che l'affondamento del tronco non viene modificato vestendo un costume tecnico, ma questa disparità può essere attribuibile alle caratteristiche intrinseche differenti dei costumi tecnici analizzati.

Un aspetto non ancora analizzato in letteratura, per nostra conoscenza, è la posizione degli arti inferiori nello scivolamento passivo. Dai dati dello studio emerge che sia  $A_{eff}$  che  $LI$  hanno un effetto specifico su  $K$ . Nel complesso, il modello spiega come il 40.3% della variazione di  $K$  sia dovuto ad una combinazione della inclinazione del tronco e degli arti inferiori a prescindere dalla velocità e dal costume utilizzato. In particolare l'effetto dell'inclinazione dei soli arti inferiori sembra condizionare la resistenza passiva del nuotatore per il 21%. Indossare un costume tecnico riduce l'effetto con cui  $LI$  condiziona il drag rispetto all'utilizzo di un costume tradizionale, sia per  $R_s$  (14.4%) che per  $T_s$  (14.9%).

Ad una velocità comune nel nuoto, 2.0 m/s, sono stati stimati e quantificati in maniera esemplificativa ed attraverso il modello di regressione multipla, gli effetti che incidono sulla riduzione del drag dovuti al costume tecnico. Comparando la condizione di costume  $R_s$  ad  $S$ , a 2.0 m/s, la riduzione di  $K$  a favore della condizione  $R_s$  è di 2.61 che riporta un vantaggio in drag passivo di 5.2 N (9%). Questa riduzione di drag

utilizzando il costume prodotto in gomma sintetica è dovuta ad un effetto combinato della posizione del corpo attraverso la variazione dell'inclinazione dei segmenti tronco e arti inferiori. Inoltre un effetto legato a proprietà intrinseche dei costumi tecnici, probabilmente prodotto dalle caratteristiche del materiale che potrebbe aver effetti sulla resistenza idrodinamica nella componente di frizione (Moria, 2010) o nella componente di pressione (Mollendorf, 2004) condiziona la riduzione di drag passivo. Dai risultati emerge come la riduzione di  $Dp$  mostrata con l'utilizzo del costume tecnico sia un effetto combinato di  $A_{eff}$ ,  $LI$  e proprietà intrinseche del costume. Nella diminuzione di  $Dp$  determinata dall'utilizzo del costume  $R_s$  rispetto ad  $S$ , le proprietà intrinseche del costume influenzano il vantaggio per il 40-55% con un effetto maggiore al crescere della velocità di scivolamento, per il 25-35% da  $LI$  con un leggero aumento al crescere della velocità e per il 5-25% da  $A_{eff}$  con un effetto minore a maggiori velocità (a 2.0 m/s, 56%, 37% e 7%, rispettivamente per effetti attribuibili a proprietà del costume,  $LI$  e  $A_{eff}$ ).

La riduzione di  $K$  nella prova  $T_s$  rispetto alla prova  $S$  a 2.0 m/s è simile alla prova con costume tecnico in gomma (2.35) e riporta un vantaggio in drag passivo di 4.7 N (8%). La diminuzione è prodotta per il 52% da proprietà intrinseche del costume, per il 42% da  $LI$  e per il 6% da  $A_{eff}$ , con effetti simili a  $R_s$  in funzione della velocità di scivolamento.

Il confronto tra la prova  $R_s$  e la prova  $P_b$  a 2.0 m/s conferma come le proprietà intrinseche del costume tecnico abbiano un effetto primario sulla riduzione del drag. La riduzione di  $Dp$  nella prova  $R_s$  rispetto alla prova  $P_b$  è di 4.1 N prodotta da una diminuzione di  $K$  di 2.03. In queste due condizioni di costume la posizione del corpo è simile con valori prossimi di  $A_{eff}$  e  $TI$ . Pertanto la riduzione di drag è effetto

prevalentemente affidata alle proprietà intrinseche del costume (68%) mentre dovuta alla posizione del corpo ( $A_{eff} + TI$ ) per solamente il 32%.

In conclusione, i dati di questo studio confermano che l'utilizzo del costume tecnico riduce le resistenze passive all'avanzamento. Una parte della riduzione nella resistenza passiva è legata a proprietà intrinseche dei costumi tecnici. Tuttavia, le variazioni di posizione del corpo in scivolamento sono in grado di variare le resistenze idrodinamiche nel nuotatore (Pendergast, 2006). L'effetto di variazione della posizione del corpo in traino passivo mostra una marcata influenza sulla resistenza idrodinamica del nuotatore. Oltre alla riduzione di resistenza prodotta dal materiale di composizione del costume, la riduzione di drag durante lo scivolamento passivo effettuato con costume tecnico da nuoto è attribuibile ad una variazione della posizione del corpo del nuotatore.

## 8. BIBLIOGRAFIA

---

- Barbosa TM, Costa MJ, Marques MC, Silva AJ, Marinho DA. (2010). *A model for active drag force exogenous variables in young swimmers*. Journal of Human Sport & Exercise. 5. 379-388.
- Barthlott W, Schimmel T, Wiersch S, Koch K, Brede M, Barczewski M, Walheim S, Weis A, Kaltenmaier A, Leder A, Bohn HF. (2010). *The Salvinia paradox: Superhydrophobic surfaces with hydrophilic pins for air retention under water*. Advanced Materials. 22(21). 2325–2328.
- Batchelor GK. (1970). *An introduction to fluid dynamics*. Cambridge. Cambridge University Press.
- Bechert DW, Bruse M, Hage W, Meyer R. (1997). *Biological surfaces and their technological application – laboratory and flight experiments on drag reduction and separation control*. AIAA. 28th Fluid Dynamics Conference. Snowmass Village. CO. 1997-1960.
- Bechert DW, Bruse M, Hage W, Meyer R. (2000). *Fluid mechanics of biological surfaces and their technological application*. Naturwissenschaften. 87. 157–171.
- Benjanuvattra N, Dawson G, Blanksby BA, Elliott BC. (2002). *Comparison of buoyancy, passive and net active drag forces between Fastskin and standard swimsuits*. Journal of Science and Medicine in Sport. 5(2). 115-23.

- Bernard AB, Busse MR. (2004). *Who Wins the Olympics: Economic Resources and Medal Totals*. Review of Economics and Statistics. 86. 413–417.
- Berry MJ, McMurray RG. (1987). *Effects of graduated compression stockings on blood lactate following an exhaustive bout of exercise*. American Journal of Physical Medicine. 66. 121-132.
- Berthelot G, Hellard P, Len S, Tafflet M, Toussaint JF. (2010). *Technology and swimming: Three steps beyond physiology*. XIth International Symposium for Biomechanics and Medicine in Swimming. Oslo. June 16–19.
- Bhushan B. (2012). *Bioinspired Structured Surfaces*. Langmuir. 28(3). 1698–1714.
- Bixler B, Pease D, Fairhurst F. (2007). *The accuracy of computational fluid dynamics analysis of the passive drag of a male swimmer*. Sports Biomechanics. 6(1). 81-98.
- Blasius H. (1908). *Grenzschichten in Flüssigkeiten mit kleiner Reibung*. Zeitschrift für Mathematik Physik. 56. 1-37.
- Bouguet JY. (2008). *Camera calibration toolbox for Matlab*. [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/index.html](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html)
- Bringard A, Perrey S, Belluye N. (2006). *Aerobic energy cost and sensation responses during submaximal running exercise-positive effects of wearing compression tights*. International Journal of Sports Medicine. 27(5). 373-378.

- Buder J, Odenwald S. (2010). *Performance validation of swimsuits by mechanical testing*. 8th Conference of the International Sports Engineering Association. Procedia Engineering. 2, 3373–3378.
- Capelli C, Zamparo P, Cigalotto A, Francescano MP, Soule RG, Termin B, Pendergast DR, Di Prampero PE. (1995) *Bioenergetics and biomechanics of front crawl swimming*. Journal of Applied Physiology. 78. 674–679.
- Caspersen C, Berthelsen PA, Eik M, Pâkozdi C, Kjøndlie PL. (2010). *Added mass in human swimmers: age and gender differences*. Journal of Biomechanics. 26. 43(12). 2369-73.
- Chatard JC, Colloimp C, Maglischo E, Maglischo C. (1990). *Swimming skill and stroking characteristics of front crawl swimmers*. International Journal of Sports Medicine. 11. 156-161.
- Chatard JC, Senegas X, Selles M, Dreanot P, Geysant A. (1995). *Wet suit effect: a comparison between competitive swimmers and triathletes*. Medicine and Science in Sports and Exercise. 27(4). 580-6.
- Chatard JC, Wilson B. (2008). *Effect of fast-skin suits on performance, drag, and energy cost of swimming*. Medicine and Science in Sport exercises. 40(6). 1149-54.
- Chollet D, Chalies S, Chatard JC. (2000). *A new index of coordination for the crawl: description and usefulness*. International Journal of Sports Medicine. 21(1). 54-9.

- Chollet D, Chavallard F, Seifert L, Lemaitre F. (2010). *Do Fastskin Swimsuits Influence Coordination in Front Crawl Swimming and Glide?* XIth International Symposium for Biomechanics and Medicine in Swimming. Oslo. 2010.
- Clarys JP. (1978). *Relationship of human body form to passive and active hydrodynamic drag.* In: Biomechanics VI-B (eds Asmussen E. & Jorgensen K.). 120–125. University Park Press, Baltimore.
- Chatard JC, Lavoie JM, Lacour JR. (1990). *Analysis of determinants of swimming economy in front crawl.* European Journal Applied Physiology. 61. 88-92.
- Clothier PJ, Payne WR, Harvey JT, Blanksby BA, Benjanuvatra N. (2004). *The use of subject derived scale factors for one-camera 2D analysis in underwater swimming.* Journal of Human Movement Studies. 46. 333-345.
- Cordain L, Kopriva R. (1991). *Wetsuits, body density, and swimming performance.* British Journal of Sports Medicine. 25. 31-33.
- Costill DL, Kovalesski J, Porter D, Kirwan J, Fielding R, King D. (1985). *Energy expenditure during front crawl swimming: predicting success in middle-distance events.* International Journal of Sports Medicine. 6. 266-270.
- De Lucas RD, Balikian P, Neiva CM, Greco CC, Denadai BS. (2000). *The effects of wet suits on physiological and biomechanical indices during swimming.* Journal of Science and Medicine in Sport. 3(1). 1-8.
- Dean BD. (2011). *The Effect of Shark Skin Inspired Riblet Geometries on Drag in Rectangular Duct Flow.* Master thesis of science. Ohio State University. Mechanical Engineering.

- Delextrat A, Bernard T, Hausswirth C, Vercruyssen F, Brisswalter J. (2003). *Effects of swimming with a wet suit on energy expenditure during subsequent cycling*. *Canada Journal of Applied Physiology*. 28(3). 356-69.
- Di Prampero PE, Pendergast DR, Wilson D, Rennie DW. (1974). *Energetics of swimming in man*. *Journal of Applied Physiology*. 37. 1–5.
- Di Prampero PE. (1986). *The energy cost of human locomotion on land and in water*. *International Journal of Sports Medicine*. 7. 55-72.
- Doan B, Kwon YH, Newton R, Shim J, Popper E, Rogers R, Bolt LR, Robertson M, Kraemer WJ. (2003). *Evaluation of a lower-body compression garment*. *Journal of Sports Sciences*. 21. 601-610.
- Fox RW, McDonald AT. (1978). *Introduction to Fluids Mechanics*. John Wiley and Sons.
- Gagnon M, Montpetit R. (1981). *Technological development for the measurement of the center of volume in the human body*. *Journal of Biomechanics*. 14. 235-241.
- Gonjo T, Ichikawa H, Tsubakimoto S, Takagi H. (2010). *A Comparison of Characteristics of High Functional Swimwear for Competitive Swimming*. XIth International Symposium for Biomechanics and Medicine in Swimming, Oslo, 2010.
- *Guidelines for the measurement of respiratory function. Recommendations of the British Thoracic Society and the Association of Respiratory Technicians and Physiologists*. (1994). *Respiratory Medicine*. 88. 165–194.



- Hay JG. (1993). *The Biomechanics of Sports Techniques*. Prentice-Hall. Englewood Clinics. NJ.
- Hinrichs RN, Morrison BJ, McLean SP. (2003). *Do bodysuits from different manufacturers aid a swimmer's buoyancy?* 27th Annual Meeting of the American Society of Biomechanics. Toledo. OH.
- Hobæk TC, Leinan KG, Leinaas HP, Thaulow C. (2011). *Surface Nanoengineering Inspired by Evolution*. Journal of Bionanoscience. 1. 63–77.
- Hue O, Benavente H, Chollet D. (2003). *The effects of wetsuit use by triathletes analysis of the different phase of arm movement*. Journal of Sports Sciences. 21. 1025-30.
- Hutteau M, Bertucci W, Lodini A. (2006). *Effect of using a complete wetsuit and a tri function on swimming speed and amplitude in triathlon*. Science and Sports. 22. 60–62.
- Jackson J. (2009). *World Records Tumble at Swimming Championships*, <http://jojackson.suite101.com/world-records-tumble-at-swimming-championships-a136275>.
- Johnson DKN, Ali A. (2004). *A Tale of Two Seasons: Participation and Medal Counts at the Summer and Winter Olympic Games*. Social Science Quarterly. 85(4). 974-993.
- Jung YC, Bhushan B. (2010). *Biomimetic structures for fluid drag reduction in laminar and turbulent flows*. Journal of Physics: Condensed Matter. 22. 035104.

- Kainuma E, Watanabe M, Tomiyama-Miyaji C, Inoue M, Kuwano Y, Ren H, Abo T. (2009). Proposal of alternative mechanism responsible for the function of high-speed swimsuits. *Biomedical Research*. 30(1). 69-70.
- Karpovich PV. (1933). *Water resistance in swimming*. Research Quarterly. 4. 21–28.
- Keatinge WR. (1969). *Survival in Cold Water*. Oxford and Edinburgh. Blackwell Scientific Publications.
- Keul S, Bieder A, Wahl P. (2010). *Effects of New Hightech-Swim-Suits on Passive Drag*. XIth International Symposium for Biomechanics and Medicine in Swimming. Oslo. 2010.
- Koch K. (2009). *Multifunctional surface structures of plants: An inspiration for biomimetics*. Progress in Materials Science. 54. 137–178.
- Koeltzsch K, Dinkelacker A, Grundmann R. (2002). *Flow over convergent and divergent wall riblets*. Experiments in Fluids. 33. 346–350.
- Kolmogorov SV, Duplisheva OA. (1992). *Active drag, useful mechanical power output and hydrodynamic force coefficient in different swimming strokes at maximal velocity*. Journal of Biomechanics. 25. 311–318.
- Kraemer WJ, Bush J, Newton RU, Duncan ND, Volek J, Denegar CR, Canavan P, Johnston J, Putukian M, Sebastianelli W. (1998). *Influence of a compressive garment on repetitive power output production before and after different types of muscle fatigue*. Sports Medicine, Training and Rehabilitation. 8. 163-184.

- Lang AW, Motta P, Hidalgo P, Westcott M. (2008). *Bristled shark skin: a microgeometry for boundary layer control?* *Bioinspiration and Biomimetics*. 3. 1–9.
- Lavest JM, Rives G, Lapreste' JT. (2003). *Dry camera calibration for underwater applications*. *Machine Vision and Applications*. 13(5–6). 245–253.
- Lavoie JM, Montpetit R. (1986). *Applied physiology of swimming*. *Sports Medicine*. 165. 165-189.
- Lee SJ, Lee SH. (2001). *Flow field analysis of a turbulent boundary layer over a riblet surface*. *Experiments in Fluids*. 30. 153-166.
- Lienhard JHIV, Lienhard JHV. (2000). *A heat transfer textbook*. Cambridge. MA.
- Lowdown BJ, Mckenzie D, Ridge DR. (1992). *Effects of clothing and water temperature on swim performance*. *Australian journal of Science and Medicine in Sports*. 24. 33-38.
- Lowensteyn I, Signorile J, Glitz K. (1994). *The effect of varying body composition on swimming performance*. *Journal of Strength and Conditioning Research*. 8(3). 149-154.
- Lucas BD, Kanade T. (1981). *An iterative image registration technique with an application to stereo vision*. *Intl Joint Conference on Artificial Intelligence*. 3. 674-679.
- Luebbers M. (2009). *The big deal about super swimsuits - technological doping and why it matters*. [http://swimming.about.com/od/swimsuits/a/The\\_Big\\_Deal\\_About\\_Super\\_Swimsuits\\_Technological\\_Doping\\_.htm](http://swimming.about.com/od/swimsuits/a/The_Big_Deal_About_Super_Swimsuits_Technological_Doping_.htm). Retrieved 29/07/2009.

- Lyttle A, Blanksby B. (2000). *A look at gliding and underwater kicking in the swim turn*. In: ISBS. Applied Proceedings of the XVIII International Symposium on Biomechanics in Sports. Hong Kong.
- Magdalinski T. (2009). *Sport, Technology and the Body: The Nature of Performance*. London. New York. Routledge.
- Maitland ME, Vandertuin JF. (2002). *The Effect of Compression Clothing on Muscular Strength and Endurance*. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 34(5). 173.
- Marinho DA, Mantha VR, Vilas-Boas JP, Machado L, Rouboa AI, Silva AJ. (2012). *The effect on swimmer's hydrodynamic drag of wearing a swimsuit*. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. In press.
- Matthews Jerney NA. (2008). *Low-drag suit propels swimmers*. *Physics Today*. 61(8). 32-33.
- McLean SP, Hinrichs R. (1998). *Sex difference in the center of buoyancy location of competitive swimmers*. *Journal of Sports Science*. 16. 373-383.
- McLean SP, Hinrichs RN. (2000). *Buoyancy, Gender, and Swimming Performance*. *Journal of Applied Biomechanics*. 16. 248-63.
- Miller DI. (1975). *Biomechanics of swimming*. *Exercise and Sport Sciences Reviews*. Academic Press, New York. 219–248.
- Mollendorf JC, Termin AC, Oppenheim E, Pendergast DR. (2004). *Effect of swim suit design on passive drag*. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 36. 1029–1035.

- Montagna G, Catarino A, Carvalho H, Rocha AM. (2009). *Study and optimization of swimming performance in swimsuits designed with seamless technology*. Presented at World Textile Conference, Izmir Turkey.
- Moria H, Chowdhury H, Alam F, Subic A, Smits AJ, Jassim R, Bajaba NS. (2010). *Contribution of Swimsuits to Swimmer's Performance*. 8th Conference of the International Sports Engineering Association. Procedia Engineering. 2. 2505–2510.
- Moria H, Chowdhury H, Alam F, Subic A. (2011). *Aero/hydrodynamic Study of Speedo LZR, TYR Sayonara and Blueseventy Pointzero Swimsuits*. Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering. 5(1). 1995-6665.
- Moria H, Chowdhury H, Alam F, Subic A. (2011). *An evaluation of swimsuit performance*. 5th Asia-Pacific Congress on Sports Technology. Procedia Engineering. 13. 382–388.
- Munson B, Young D, Okiishi T. (2005) *Fundamentals of Fluid Mechanics, 5th ed.* Wiley. New York.
- Naemi R, Easson WJ, Sanders RH. (2009). *Hydrodynamic glide efficiency in swimming. A review*. Journal of Science and Medicine in Sport. 13(4). 444-8.
- Neiva H, Vilas-Boas JP, Barbosa T, Silva A, Marinho D. (2011). *13th FINA World Championships: Analysis of Swimsuits Used By Elite Male Swimmers*. Journal of Human Sport & Exercise. 6(1). 87-93.
- Nelson R, Pike N. (1978). *Analysis and comparison of swimming starts and strokes*. Swimming and Medicine IV. 347-360. Baltimore. University Park Press.

- Nicolaou KD, Kozusko JM, Bishop PA. (2001). *The effect of wetsuits on swim performance*. Journal of Swimming Research. 15. 20-26.
- Ogita F, Huang Z, Kurobe K, Ozawa G, Taguchi T, Tanaka T. (2010). *Effects of Recently Developed Swimwear on Drag During Front Crawl Swimming*. XIth International Symposium for Biomechanics and Medicine in Swimming. Oslo. 2010.
- Oliveira S. (2009). *Measurement of compression in different last generation swimsuits using three-dimensional body scanner*. Undergraduate Thesis submitted to the Faculty of Desporto. University of Porto.
- Parsons L, Day SJ. (1986). *Do wet suits affect swimming speed?* British Journal of Sports Medicine. 20. 129-31.
- Peeling P, Landers G. (2007). *The effect of a one-piece competition speedsuit on swimming performance and thermoregulation during a swim-cycle trial in triathletes*. Journal of Science and Medicine in Sport. 10. 327-333.
- Pendergast DR, Mollendorf J, Zamparo P, Termin A, Bushnell D, Paschke D. (2005). *The influence of drag on human locomotion in water*. Undersea and Hyperbaric Medicine. 32. 45-58.
- Pendergast DR, Mollendorf JC, Cuviallo R, Termin II. (2006). *Application of teoretical principles to swimsuit drag reduction*. Sports Engineering. 9. 65-76.
- Perrier D, Monteil M. (2002). *Vitesse de nage en triathlon: étude comparative du cycle de bras en combinaison intégrale et sans manche*. Science and Sports. 17(3). 117-21. French.

- Perrier D, Monteil K. (2004). *Triathlon Wet Suit and Technical Parameters at the Start and End of a 1500-m Swim*. *Journal of Applied Biomechanics*. 20. 3-13.
- Roberts BS, Kamel KS, Hedrick C, McLean SP, Sharp RL. (2003). *Effect of a FastSkintm suit on submaximal freestyle swimming*. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 35(3). 519-24.
- Rogowski I, Monteil K, Lengreneur P, Lanteri P. (2006). *Influence of swimsuit design and fabric surface properties on the butterfly kinematics*. *Journal of Applied Biomechanics*. 22. 61-6.
- Romyantsev VA. (1982). *Biomechanics of Sport Swimming*. Central State Institute of Physical Culture. Moscow.
- Santos KB, Bento PCB, Rodacki ALF. (2011). *Efeito do uso do traje de neoprene sobre variáveis técnicas, fisiológicas e perceptivas de nadadores*. *Revista Brasileira de Educação Física e Esporte*. 25(2). 189-195.
- Sharp R, Costill D. (1989). *Influence of body hair removal physiological responses during breaststroke swimming*. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 21(5). 576-580.
- Shiraki T, Wakayoshi K, Hata H, Yamamoto T, Tomikawa M. (2010). *The Effects of Rubber Swimsuits on Swimmers Using a Lactic Acid Curve Test*. XIth International Symposium for Biomechanics and Medicine in Swimming. Oslo. 2010.
- Shuter B, Aslani A. (2000). *Body surface area: Du Bois and Dubois revisited*. *European Journal of Applied Physiology*. 82. 250–254.

- Silveira RP, Kanefuku JY, Moré FC, Castro FAS. (2010). *Effects of a Blueseventy Bodysuit on Spatial-Temporal and Coordinative Parameters During an All-Out 50-M Front Crawl Stroke*. XIth International Symposium for Biomechanics and Medicine in Swimming, Oslo, 2010.
- Smith J, Joseph M, Pascoe D. (2007). *The influence of a compressive laminar flow body suit for use in competitive swimming*. The Journal of Swimming Research. 17. 10-16.
- Stager JM, Tanner DA. (2005). *Swimming. Handbook on sports medicine and science*. Oxford. Blackwell Science Ltd.
- Starling RD, Costill DL, Trappe TA, Jozsi AC, Trappe SW, Goodpaster BH. (1995). *Effect of swimming suit design on the energy demands of swimming*. Medicine and Science in Sports and Exercise. 27(7). 1086-9.
- Strzała M, Krężałek P. (2010). *The Body Angle of Attack in Front Crawl Performance in Young Swimmers*. Human Movement. 11(1). 23–28.
- Textile world. (2011). [http://www.textileworld.com/Articles/2011/March/Hohenstein\\_Tests\\_High-Tech\\_Swimsuit.html](http://www.textileworld.com/Articles/2011/March/Hohenstein_Tests_High-Tech_Swimsuit.html).
- Tikuisis P, Meunier P, Jubenville CE. (2001). *Human body surface area : measurement and prediction using three dimensional body scan*. European Journal Applied Physiology. 85. 264-271.
- Tomasi C, Kanade T. (1991). *Technical Report: Detection and Tracking of Point Features*. Carnegie Mellon University. 91-131.
- Tomikawa M, Shimoyama Y, Ichikawa H, Nomura T. (2003). *The effects of triathlon wet suit on stroke parameters, physiological parameters and*



- performance during swimming*. In Chatard JC (eds). *Biomechanics and Medicine in Swimming IX*. 517-22. Université de St.Etienne.
- Tomikawa M, Nomura T. (2007). *Relationships between swim performance, maximal oxygen uptake and peak power output when wearing a wetsuit*. *Journal of Science Medicine and Sport*. 12(2). 317-22.
  - Tomikawa M, Shimovana Y, Nomura T. (2008). *Factors related to the advantageous effects of wearing a wetsuit during swimming at different submaximal velocity in triathletes*. *Journal of Science Medicine and Sport*. 11(4). 417-23.
  - Toussaint HM, de Groot G, Savelberg HH, Vervoorn K, Hollander AP, van Ingen Schenau GJ. (1988) *Active drag related to velocity in male and female swimmers*. *Journal of Biomechanics*. 21. 435–438.
  - Toussaint HM, Knops W, De Groot G, Hollander AP. (1990). *The mechanical efficiency of front crawl swimming*. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 22. 408–402.
  - Toussaint HM, Beek PJ. (1992). *Biomechanics of competitive front crawl swimming*. *Sports Medicine*. 13. 8 – 24.
  - Toussaint HM. (2001). *The Fastskin, hip, hype, but does it work?*. FINA Coach Clinic, Antwerp.
  - Toussaint HM, van Stralen M, Stevens E. (2002). *Wave drag in front crawl swimming*. In: Gianikellis K (Ed.), *Proceedings of the XXth International Symposium on Biomechanics in Sports*. Universidad de Extremadura. Spain. 279–282.

- Toussaint HM, Truijens M, Elzinga MJ, Van de Ven A, de Best H, De Groot G. (2002). *Effect of a Fast-skin “body” suit on drag during front crawl swimming.* Sports Biomechanics. 1(1). 1-10.
- Toussaint HM. (2011). *Measurement of drag to assess the effect of swim suits.* Revista Portuguesa de Ciências do Desporto/Portuguese Journal of Sport Sciences. 11. 77-80.
- Trappe TA, Pease DL, Trappe SW, Troup JP, Burke ER. (1996). *Physiological responses to swimming while wearing a wet suit.* International Journal of Sports Medicine. 17. 111-14.
- Van Manen JD, Rijken H. (1975). *Dynamic measurement techniques on swimming bodies at the Netherlands Ship Model Basin.* In Lewillie L, Clarys JP (eds.). *Swimming II.* 70-77. Baltimore. University Park Press.
- Van Manen JD, Van Oossanen P. (1988). *Resistance.* In: Lewis E. (Ed.), *Principles of Naval Architecture.* Society of Naval Architects and Marine Engineers. USA. 5. 1–125.
- Vennell R, Pease D, Wilson B. (2006). *Wave drag on human swimmers.* Journal of Biomechanics. 39(4). 664-671.
- Vorontsov AR, Rummyantsev VA. (2000). *Resistive forces in swimming.* In: Zatsiorsky V (Ed.), *Biomechanics in Sports: Performance Enhancement and Injury Prevention.* Blackwell. IOC Medical Commission.
- Walsh M, Weinstein L. (1978). *Drag and heat transfer on surfaces with small longitudinal fins.* In: AIAA. 11th Fluid Dynamics Conference. Seattle. WA.

- Wang YL, Bhushan B, Maali A. (2009). *Atomic force microscopy measurement of boundary slip on hydrophilic, hydrophobic, and superhydrophobic surfaces*. *Journal of Vacuum Science and Technology*. 27(4). 754–760.
- Wilson BD, Thorp R. (2003). *Active drag in swimming*. In: Chatard JC, Puget JM (Eds.), *Proceedings of the IX World Symposium. Biomechanics and Medicine in Swimming*. St Etienne. 21–26.
- Yamamoto K, Miyachi M, Hara S, Yamaguchi H, Onodera S. (1999). *Effect of a floating swimsuit on oxygen uptake and heart rate during swimming*. In Keskinen K, Komi PV, Hollander AP. (eds). *Biomechanics and Medicine in Swimming VIII*. 375-79. University of Jyväskylä.
- Zamparo P, Capelli C, Termin AB, Pendergast DR, Di Prampero PE. (1996). *The effect of the underwater torque on the energy cost, drag and efficiency of front crawl swimming*. *European Journal of Applied Physiology*. 73. 195–201.
- Zamparo P, Capelli C, Cautero M, Di Nino A. (2000). *Energy cost of front crawl swimming at supramaximal speeds and underwater torque in young swimmers*. *European Journal of Applied Physiology*. 83. 487–491.
- Zamparo P, Pendergast DR, Mollendorf J, Termin A, Minetti AE. (2005). *An energy balance of front crawl*. *European Journal of Applied Physiology*. 94. 134-144.
- Zamparo P, Lazzer S, Antoniazzi C, Cedolin S, Avon R, Lesa C. (2008). *The interplay between propelling efficiency, hydrodynamic position and energy cost of front crawl in 8 to 19-year-old swimmers*. *European Journal of Applied Physiology*. 104. 689–699.

- Zamparo P, Gatta G, Capelli C, Pendergast DR. (2009). *Active and passive drag, the role of trunk incline*. European Journal of Applied Physiology. 106. 195–205.
- Zamparo P, Capelli C, Pendergast DR. (2011). *Energetics of swimming: a hystorical perspective*. European Journal of Applied Physiology. 111. 367-378.