

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

CAMPUS DI CESENA
SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

CORSO DI LAUREA
IN INGEGNERIA BIOMEDICA

**METODI ENERGETICI PER LA
DETERMINAZIONE DELLA
RESISTENZA PASSIVA NEL NUOTO
SPORTIVO**

Elaborato in

BIOINGEGNERIA

Relatore:

Prof. Silvia Fantozzi

Candidato:

Alessandro Neri

Correlatore:

Prof. Alessandro Talamelli

Prof. Giorgio Gatta

Prof. Gabriele Bellani

Sessione II

Anno Accademico 2012-2013

INDICE

Sommario.....	5
Capitolo 1. Cenni di fluido dinamica nel nuoto sportivo	
1.1. Definizioni fondamentali.....	7
Resistenza fluidodinamica.....	7
1.2. Resistenza passiva.....	10
1.2.1. Resistenza d'attrito.....	10
1.2.2. Resistenza di forma.....	11
1.2.3. Resistenza d'onda.....	12
1.2.4. Resistenza totale.....	13
1.2.5. Fattori che influenzano la resistenza: numero di Reynolds.....	14
1.2.6. Massa aggiunta.....	15
1.2.7. Lo scivolamento.....	16
1.2.8. Coefficiente di scivolamento.....	17
1.3. Ipotesi semplificativa del problema.....	18
1.4. Scopo della tesi.....	19
Capitolo 2 Metodi di indagine e parametri idrodinamici	
2.1. Tipologie di indagine.....	21
2.1.1. Metodo analitico.....	21
2.1.2. Indagine numerica.....	21
2.1.3. Indagini sperimentali.....	23
2.2. Misura indiretta della resistenza.....	26
Capitolo 3 Analisi della scia	
3.1. Interpretazione energetica della scia.....	27
3.2. Equazione di bilancio della quantità di moto.....	28

3.3	Metodo di Onorato.....	31
3.3.1	Premessa.....	31
3.3.2	Il metodo.....	32
3.4	Applicazioni sperimentale del metodo di onorato.....	34
3.4.1	Dispositivo sperimentale.....	34
3.4.2	Modelli e risultati di bilancio.....	35
3.4.3	Risultati.....	37
3.4.4	Conclusioni.....	39
Capitolo 4. Tecniche sperimentali per l'applicazione del metodo		
4.1	Premessa.....	41
4.2	PIV (Particle Image Velocimetry).....	42
4.3	Analisi della scia mediante misure di pressione.....	46
4.4	Probabili risultati.....	47
Conclusioni.....		48
Bibliografia.....		49

SOMMARIO

Oggetto di questa tesi è lo studio di metodologie sperimentali per la valutazione della resistenza fluidodinamica passiva su un nuotatore. In primo luogo è stata effettuata una panoramica sulle resistenze alle quali un corpo è sottoposto in ambiente natatorio e sui parametri principali che le influenzano. Scopo principale della tesi è quello di valutare la possibilità di misurare la resistenza idrodinamica passiva attraverso tecniche alternative che prevedano una valutazione della resistenza mediante la misura dell'energia cinetica contenuta nella scia che il corpo genera. In particolare viene descritto il metodo di Onorato che sembra fornire la migliore formulazione per la determinazione della resistenza di un corpo immerso in un fluido. Infine, vengono descritte possibili tecniche sperimentali attraverso le quali possono essere determinati i termini di velocità e pressione presenti nelle equazioni del metodo.

CAPITOLO 1

CENNI DI FLUIDODINAMICA NEL NUOTO SPORTIVO

1.1 DEFINIZIONI FONDAMENTALI

Resistenza fluidodinamica

La **resistenza fluidodinamica** è quella forza che si oppone all'avanzamento di un corpo in un fluido. In riferimento al moto nei liquidi è anche indicata come **resistenza idrodinamica**. Un corpo che si muove in un fluido scambia con esso delle forze la cui direzione e intensità dipendono dalla tipologia del moto (velocità, forma e assetto del corpo) e dalle caratteristiche fisiche del fluido. Una tra le caratteristiche fisiche che gioca un ruolo fondamentale è la viscosità. La viscosità è una proprietà intrinseca di ogni fluido ed è legata alla tendenza di una particella fluida nel resistere alle deformazioni. Sotto certe condizioni, tale proprietà può essere misurata cronometrando quanto tempo impiega una data quantità di fluido per uscire da un recipiente attraverso un foro calibrato. Maggior tempo indica maggiore viscosità.

Più in generale l'entità della resistenza fluidodinamica dipende:

- dalla densità del fluido
- dalla viscosità del fluido
- dalla velocità e angolo relativo tra fluido e corpo
- dalla forma geometrica del corpo

Densità e viscosità sono parametri fissati (ed ovviamente sono i parametri dell'acqua) quindi gli unici parametri variabili sono velocità, assetto e geometria del soggetto preso in esame. In particolare, la resistenza di un nuotatore è fortemente influenzata da: posizionamento degli arti superiori, posizione della testa, l'inclinazione del busto e la posizione delle gambe. Tutto ciò infatti influenza in maniera considerevole l'area di contatto con il fluido. Ad esempio, un corpo posizionato con mani giunte e braccia distese sopra il capo tenderà a minimizzare tale superficie. Un particolare di rilievo è quello riguardante il posizionamento della testa che, se inserita tra le braccia permette di ottenere una superficie piana nella parte dorsale del corpo e quindi presumibilmente favorevole alla scorrevolezza idrodinamica. Altro fattore determinante per l'analisi geometrica del corpo è inoltre il posizionamento degli arti inferiori la cui massa costituisce circa il 40% di tutto il peso corporeo. Questi infatti, al contrario della parte superiore, che rimane piuttosto sollevata grazie all'aria contenuta nei polmoni, tendono ad affondare e ad aumentare quindi l'angolo di incidenza rispetto al flusso. Si presume quindi che il posizionamento ottimale degli arti inferiori si possa ottenere mantenendo in posizione flessa le punte dei piedi unendo il più possibile le gambe in modo tale da avere un controllo unico e rigido della parte inferiore, dal bacino alla punta dei piedi. Tuttavia, data la complessità delle interazioni fluidodinamiche, minime variazioni di postura possono influenzare notevolmente la resistenza idrodinamica, che a sua volta ha un impatto diretto sulle prestazioni del nuotatore. Pertanto è importante mettere appunto metodi di analisi precisi e rigorosi.

In linea di principio la resistenza andrebbe valutata in tutto l'arco di un'azione natatoria.

La stima della resistenza nel caso più generale, quello cioè in cui il soggetto si muove liberamente fornendo la propulsione necessaria allo spostamento, è chiamata in letteratura resistenza attiva (D_a). Le difficoltà nell'effettuare questa stima sono molteplici, e derivano principalmente dal fatto che tale valore non può essere misurato in maniera diretta in quanto la forza che resiste al moto è bilanciata dalla spinta propulsiva. Quindi la misura della cosiddetta resistenza attiva è in realtà una stima indiretta della potenza erogata per imporre una certa accelerazione o mantenere una data velocità, basata su una serie di ipotesi riguardanti la fisiologia umana (legate

ad esempio al $VO_{2,max}$). Un problema aggiuntivo deriva dalla scarsa ripetibilità di questo tipo di misura, dovuto alla difficoltà di registrare e riprodurre movimenti identici da un esperimento all'altro.

Per questo motivo, spesso si preferisce analizzare il problema da un punto di vista statico, ponendo il nuotatore in un assetto prefissato e studiare la resistenza al variare dei parametri. La resistenza misurata in assetto fisso è tipicamente chiamata resistenza passiva (resistenza passiva, D_p).

I dati che si trovano in letteratura in merito alle differenze tra misura passiva e stima della resistenza attiva sono abbastanza contraddittori. Sono riportati sia casi in cui la resistenza attiva ha un valore due o tre volte superiore rispetto a quello della resistenza passiva mentre altri in cui le due resistenze si equivalgono. Nel primo caso le differenze sono state attribuite al fatto che la resistenza passiva non tiene conto delle azioni idrodinamiche create dai movimenti del nuotatore per fornire la propulsione nel fluido e che durante l'azione stessa il corpo è meno idrodinamico offrendo al flusso una maggiore area frontale. Nel secondo caso, l'equivalenza tra resistenza attiva e passiva è stata attribuita al fatto che i tratti del braccio e della gamba (durante la fase di propulsione) permettono a parte del corpo di essere sollevata sulla superficie, quindi in tal caso il nuotatore presenta una superficie frontale minore rispetto a quando il corpo è trainato passivamente alla stessa velocità attraverso il fluido, compensando così gli effetti negativi dovuti all'azione propulsiva.

Ad esempio, per quanto riguarda l'area proiettata frontale (A_{eff}) [1] propone la seguente formula:

$$A_{eff} = A_f \cos\alpha + \left(\frac{BSA}{2}\right) \sin\alpha \quad (1.1)$$

dove A_f è l'area frontale quando il nuotatore è in posizione orizzontale ($\alpha = 0$) e BSA è la sua area superficiale. In questa tesi ci soffermeremo sulle tecniche di analisi della resistenza passiva e proporremo un metodo aggiuntivo, l'analisi della scia, che proviene dal mondo aeronautico/automobilistico. Prima però è importante capire quali siano i meccanismi principali che contribuiscono a creare resistenza idrodinamica per capire quali termini è possibile trascurare per semplificare l'analisi.

1.2 RESISTENZA PASSIVA

Con il termine resistenza passiva intendiamo la forza idrodinamica dovuta al moto relativo tra l'acqua e un corpo. La resistenza passiva può essere costante quando il corpo si muove a velocità ed assetto costante, non variando la propria posizione ed orientamento, o più in generale può essere funzione del tempo.

Da un punto di vista matematico, la resistenza è la somma di tutte le azioni normali e tangenziali che agiscono sul corpo. Queste sono il risultato di diversi meccanismi fisici, sulla base dei quali è possibile scomporre la resistenza in diverse componenti. Ad esempio, parte della resistenza è dovuta alle azioni tangenziali che si generano tra il fluido e la superficie del corpo, che è quindi proporzionale al totale della superficie bagnata (resistenza d'attrito). Un'altra parte è dovuta alla distribuzione di pressione che si genera intorno al corpo che dipende fortemente dalla forma dell'oggetto e dalla scia che questo genera. Un'ultima componente della resistenza è legata all'energia spesa per generare le onde che si formano e che si propagano sulla superficie del fluido (resistenza d'onda). Di seguito analizzeremo le varie componenti nel dettaglio.

1.2.1 Resistenza d'attrito

L'attrito nel nostro specifico caso è dovuto alla resistenza creata dalla pelle a contatto con l'acqua ed è dovuta alla presenza dello strato limite definito come quella regione di fluido nelle immediate vicinanze della superficie solida in cui la velocità varia da zero, quando a contatto con il corpo, fino al valore della corrente fluida indisturbata. Si può dimostrare che tale regione all'aumentare del numero di Reynolds (cfr. capitolo 1.2.5) risulta essere molto sottile aumentando di spessore mano a mano che si procede lungo la direzione del moto. Alcuni studi riguardo la resistenza d'attrito hanno dimostrato che, considerando un corpo completamente immerso in acqua dove perciò la resistenza d'onda è considerata trascurabile, corrisponde ad un quarto della resistenza totale. [2]

La resistenza di attrito è influenzata inoltre dalla rugosità superficiale. A tal proposito sono stati introdotti particolari costumi per diminuire il più possibile tale rugosità superficiale, favorendo così la diminuzione delle appena citate resistenze durante un'azione di scivolamento statico.

1.2.2 Resistenza di forma

La resistenza legata alla distribuzione delle pressioni intorno al corpo invece viene denominata resistenza di forma ed è legata alla viscosità del fluido attraverso il meccanismo della separazione delle linee di flusso.

Se il fluido non fosse viscoso si genererebbero campi di velocità e pressione tali che l'integrale delle pressioni a monte e valle del corpo (cioè tra la zona anteriore e quella posteriore, considerando come anteriore la regione che viene investita dal flusso, nel nostro caso acqua) risulterebbe nullo.

A causa della viscosità lo strato limite perde energia aggirando il corpo e ciò genera la separazione delle linee di flusso che, a sua volta, formeranno una zona detta *zona di ricircolazione*, o scia, nella regione posteriore.

La scia è caratterizzata da una regione in cui sono presenti vortici dove la pressione statica è tipicamente minore rispetto alla zona a monte. Questa differenza di pressione tra monte e valle genera appunto la resistenza di forma.

Una caratteristica determinante di tale resistenza è la propria dipendenza dall'area di proiezione del flusso ed in particolare, durante queste azioni, parti del corpo che sporgono oltre l'area di sezione trasversale massima del torace aumentano l'area proiettata, e di conseguenza la resistenza di pressione. Un aumento dell'angolo di attacco, cioè, l'angolo del corpo rispetto alla direzione del flusso, può anche determinare un aumento dell'area proiettata (secondo alcuni studi un angolo da 3 a 4,5 gradi può produrre un aumento della resistenza del 2,3/2,4% rispetto allo 0% ad angolo nullo). In aggiunta ai parametri antropometrici, la forma e il contorno del corpo sono fattori importanti che influenzano la resistenza di pressione perché determinano il modo in cui il flusso scorre sul corpo, per esempio i corpi dei mammiferi acquatici sono sagomati in modo che le particelle non si separino fino in prossimità del bordo di uscita del corpo cosa che invece non accade nel corpo umano nel quale avviene una separazione consistente del flusso in varie parti del corpo, come spiegato precedentemente. Di conseguenza il corpo umano nella miglior posizione idrodinamica possibile avrà comunque una resistenza 5 volte maggiore rispetto a quella di un corpo mammifero acquatico a parità di profondità, peso, e velocità. [2, 3, 4, 5]

1.2.3 Resistenza d'onda

Ultimo termine che andiamo ad analizzare è la resistenza d'onda. A tale riguardo è stato osservato che ad una profondità tre volte superiore rispetto allo spessore del corpo la resistenza d'onda diventa trascurabile. Studi recenti a riguardo hanno stabilito che la resistenza d'onda è trascurabile ad una profondità di circa 0.6 m sotto la superficie; al contrario, si è riscontrato che, alla velocità di 2,5 m/s sulla superficie la resistenza d'onda contribuisce ad almeno il 40% della resistenza complessiva. In una situazione intermedia, per esempio a 2 m/s ed a una profondità di 0,4 m tale resistenza corrisponde al solo 15% della resistenza [8]. Pertanto, nelle fasi di scivolamento in partenze e virate, i nuotatori devono cercare una profondità sufficiente per ridurre al minimo l'effetto della resistenza d'onda senza ovviamente compromettere le prestazioni. Tornando alle caratteristiche di tale resistenza, possiamo affermare che essa agisce su di un corpo quando esso si muove in prossimità della superficie dove parte dell'energia data dal movimento del corpo è usata per sollevare l'acqua contro la gravità causando la formazione di onde sulla superficie. La resistenza d'onda è inoltre fortemente legata ad un numero adimensionale denominato numero di Froude (Fr) che mette in relazione la forza d'inerzia e la forza gravitazionale (o forza peso) sulle particelle fluide. Questo rapporto adimensionale è quantificabile come:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{L \cdot g}} \quad (1.2)$$

dove v è la velocità del corpo in movimento, L è la lunghezza del corpo lungo la direzione del flusso e g è l'accelerazione gravitazionale. Si ritiene che la resistenza d'onda aumenti con il numero di Froude infatti, come nel nostro caso, distendendo le braccia in posizione idrodinamica aumenteremo la lunghezza del corpo e quindi avremo una riduzione del numero di Froude e conseguentemente andremo incontro ad una diminuzione della resistenza d'onda rispetto a quella che si avrebbe ponendo le braccia lungo i fianchi dove è stata riscontrata una resistenza maggiore del 21,5% rispetto a quella riscontrata in posizione idrodinamica[6].

1.2.4 Resistenza totale

La somma dei diversi tipi di resistenza, denominata come “resistenza totale”, può essere indicata attraverso la definizione del coefficiente di resistenza:

$$D_d = \frac{1}{2} c_d \cdot \rho \cdot A_{eff} \cdot v^2 \quad (1.3)$$

dove D_d è la resistenza totale idrodinamica, ρ è la densità dell'acqua, v è la velocità del corpo, c_d è il coefficiente di resistenza e A è l'area di riferimento. In accordo con quanto citato da Vogel (1994) è possibile investigare come e se un corpo in acqua cambia “configurazione” in relazione ad un cambiamento di velocità, riportando in un grafico la resistenza totale su velocità al quadrato (D_d/v^2). Se il rapporto (D_d/v^2) è funzione negativa della v significa che il soggetto in esame ha una resistenza inferiore ad elevate velocità. Dal momento che a velocità inferiori di 1.4 m s^{-1} la resistenza di forma D_{pr} è quella predominante rispetto alle altre forme di resistenza possiamo assumerla come totale ($D_d \approx D_{pr}$).

Nel caso del corpo umano, a causa della dominanza di tale resistenza, se sommerso a una profondità adeguata, l'area proiettata (A_{eff}) sostituisce l'area di riferimento nella resistenza totale. Quando il corpo è ben allineato al flusso con un angolo d'incidenza nullo l'area proiettata ha il suo valore minimo ed è uguale all'area della sezione trasversale del corpo.

Per quanto riguarda invece il coefficiente di resistenza (c_d) è per definizione proporzionale a D_d/v^2 (Vogel, 1994), di conseguenza, i cambiamenti del rapporto D_d/v^2 in relazione con la velocità possono indurci a pensare che vi saranno anche cambiamenti di c_d con v , supposizione che non è tradizionalmente considerata nelle ricerche sul nuoto.

D'altro canto, il corpo tende ad assumere una posizione più snella in acqua con l'aumento di velocità dovuto alla spinta idrostatica, quindi cambi di D_d/v^2 con la velocità indurranno anche cambiamenti di A_{eff} con v . Lo studio del rapporto D_d/v^2 in relazione con v a confronto con l'analisi di come cambia A_{eff} con l'aumentare della velocità, può quindi permettere di indagare riguardo l'interazione tra c_d e A_{eff} nel determinare la resistenza idrodinamica nella gamma di velocità di solito tenute in

ambito natatorio dove c_d dovrebbe risultare relativamente costante nel range delle velocità d'istruttoria, in quanto le variazioni di D_d/v^2 sarebbero dovute principalmente alle variazioni di A_{eff} .

Il coefficiente di resistenza adimensionale c_d è una costante che dipende dalla forma del corpo, angolo di attacco, rugosità superficiale e dalle caratteristiche di flusso. c_d è stato stimato essere tra 0,65 e 0,75 per un nuotatore nella miglior posizione idrodinamica superficiale, mentre quello stimato per un corpo umano sommerso ad una profondità adeguata è risultato essere di circa 0,30. Il risultato appena citato verrà trattato in maniera più approfondita nel capitolo successivo quando si andrà a parlare di metodi di indagine e dei parametri idrodinamici [7 8 9].

1.2.5 Fattori che influenzano la resistenza: numero di Reynolds

Per apprendere al meglio i fattori che contribuiscono all'efficienza dello scivolamento, è necessario conoscere le caratteristiche e le tipologie di flusso che possono essere presenti in tale moto.

Le due tipologie di flusso sono per l'appunto il flusso laminare e il flusso turbolento. Nel primo caso le particelle si muovono in condizioni di "equilibrio" scorrendo dolcemente l'una sopra l'altra senza alcun rimescolamento mentre per il secondo tipo di flusso siamo di fronte ad un fenomeno nel quale, a causa di meccanismi di instabilità, le forze di inerzia sovrastano le forze viscosse spezzando così la regolarità del flusso e provocando un mescolamento tra i diversi strati di fluido in cui le particelle cominciano a muoversi in modo caotico e non prevedibile.

Il tipo di flusso che agisce su di un corpo è specificato dal numero di Reynolds, il quale determina la grandezza delle azioni inerziali rispetto quelle di tipo viscoso ed è definito nel modo seguente:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} \quad (1.4)$$

dove ρ rappresenta la densità v la velocità e L la lunghezza del corpo in direzione del flusso, mentre μ rappresenta la viscosità [10].

Per una piastra piana liscia, senza irregolarità superficiali, la transizione da un flusso laminare ad un flusso turbolento avviene per numeri di Reynolds nell'ordine di 5×10^5 .

Supponendo che tale transizione avvenga allo stesso numero di Reynolds, se non inferiori, per un corpo umano in posizione idrodinamica ad una velocità di circa $2,5(m/s)$ (velocità comune durante la fase di planata) risulterà che solo circa 20 cm di lunghezza del corpo rimane coinvolta in un flusso laminare.

Possiamo perciò concludere che in fase di planata il corpo è soggetto prevalentemente ad un flusso turbolento [11].

1.2.6 Massa aggiunta

Nel caso in cui un corpo si muova di moto accelerato, in aggiunta ai termini finora descritti bisogna considerare un termine ulteriore, che in acqua può costituire una parte considerevole della resistenza. Tale componente è legata alla 'massa' di fluido che viene accelerata durante il moto del corpo. Tale massa si va ad aggiungere al contributo inerziale dato dalla massa del corpo. Il corpo immerso in un fluido sarà soggetto ad una decelerazione dipendente dalle forze resistive e dalle proprietà inerziali del corpo. Le prime sono forze opposte all'azione del moto del corpo e la loro grandezza è strettamente legata alla velocità, mentre l'inerzia di un corpo in accelerazione è data dalla massa del corpo più la massa di acqua trascinata dal corpo denominata "massa aggiunta" la cui somma ci darà la "massa virtuale".

Come abbiamo appena enunciato la resistenza al cambiamento in moto di un corpo è la sua 'inerzia'. Nel vuoto l'unica fonte di inerzia è la massa del corpo, mentre in presenza di un fluido la massa, che necessita accelerazione (o decelerazione), è contraddistinta da quella del corpo e quella di una porzione di fluido attorno al corpo; notiamo così che la massa apparente (virtuale) che resiste all'accelerazione è maggiore della massa fisica (corpo).

L'entità della massa aggiunta dipende dal campo idrodinamico generato dal nuotatore ed è quindi in un certo qual modo legata essa stessa alle fenomenologie idrodinamiche quali lo strato limite, la separazione di flusso e la presenza di onde in superficie.

Un'altra fonte di massa aggiunta è data dalla formazione della scia. Nelle aree di separazione di flusso, infatti, si forma una zona in cui la velocità delle particelle fluide rispetto al corpo è zero. Durante la decelerazione questa massa di fluido decelera allo stesso ritmo del corpo, agendo quindi come inerzia aggiunta.

La massa aggiunta aumenta quando un nuotatore sta scivolando in superficie, infatti le onde create dal movimento del nuotatore si muovono alla stessa velocità del corpo e agiscono come fonte di massa aggiunta.

Quando il coefficiente di massa aggiunta (c_a) è definito come il rapporto tra la massa accelerata e la massa del fluido spostata dal corpo, allora la massa aggiunta può essere scritta secondo la seguente formula:

$$m_a = c_a \cdot \rho \cdot V \quad (1.5)$$

dove m_a è la massa aggiunta, ρ è la densità dell'acqua e V è il volume del corpo.

A causa della forma irregolare del corpo umano non ci sono informazioni disponibili sulla quantità di massa aggiunta che determina l'entità della decelerazione durante una planata e come per il coefficiente di resistenza anche il coefficiente di massa aggiunta diminuisce con il miglioramento della posizione tenuta in fase di scivolamento.

Per quanto riguarda il coefficiente di massa aggiunta possiamo dire che, per un corpo in posizione fissa e ad una certa profondità, può variare con la variazione di velocità e questo può essere attribuito al fatto che cambiamenti di velocità comporterebbero variazioni nello spessore dello strato limite e variazioni nel volume scia. Con l'adozione di una posizione idrodinamica e di planata ad una profondità adeguata, il nuotatore diminuisce le dimensioni della scia e la quantità di onde formate, questo si traduce in una diminuzione della massa aggiunta è stato dimostrato che l'effetto complessivo risulta essere benefico [12].

1.2.7 Lo scivolamento (Glide efficiency)

Gli effetti legati alla massa aggiunta si vedono soprattutto nelle fasi del nuoto in cui è presente una forte accelerazione come lo scivolamento. Lo scivolamento rappresenta la fase passiva della nuotata in cui il nuotatore tenta di mantenere la propria velocità

iniziale, solitamente fino a quando tale velocità è maggiore di quella sostenibile con una azione propulsiva. Durante tale azione il nuotatore cerca di raggiungere la miglior idrodinamicità possibile posizionando il corpo come spiegato all'inizio del capitolo con le braccia in massima distensione sopra il capo sovrapponendo le mani e flettendo ed unendo i piedi, il cui effetto sarà quello di ridurre il volume di impatto, di rafforzare il mantenimento di tale posizione, acquisendo così un maggior equilibrio e soprattutto una considerevole diminuzione di resistenza di forma.

Un indice che può determinare l'efficacia della nostra azione è dato dalla "velocità media" la quale dipende dall'entità della decelerazione e dalla durata del nostro scivolamento. Tale parametro è inoltre connesso alla velocità iniziale, che invece dipende ovviamente dall'intensità di spinta sul muro o dalla velocità di ingresso in acqua sulla quale influiscono inoltre altri fattori come l'angolo d'ingresso e nuovamente il posizionamento del nostro corpo.

1.2.8 Coefficiente di scivolamento

Andiamo ora ad analizzare un parametro molto importante ai fini dell'analisi completa del moto di un nuotatore; il coefficiente di scivolamento che, nel nostro specifico caso avendo assunto il nuotatore in moto a v costante, possiamo trascurare. Riguardo lo studio sull'efficienza di scivolamento due studiosi (Naemi e Sanders) [13] sostengono che, basandosi sull'equazione del moto di un corpo in posizione idrodinamica, lo scivolamento risulta essere soggetto ad una minor decelerazione in corrispondenza ad una maggiore massa virtuale o/e minori fattori resistivi. Tale affermazione viene espressa attraverso la seguente equazione:

$$M \cdot \frac{dv_x}{dt} = -C_R \cdot v_x^2 \quad (1.6)$$

tale equazione, per mezzo del rapporto tra velocità al quadrato e decelerazione, può essere usata come misura dell'efficienza di scivolamento. Tale rapporto è definito come "fattore di scivolamento", rappresentato come il rapporto tra la massa virtuale e fattori resistivi sotto il punto di vista idrodinamico e sta ad indicare la capacità di un

corpo di minimizzare la decelerazione [eq 1.7].

$$C_G = \frac{M}{C_R} = \frac{m + c_a \cdot \rho \cdot V}{\frac{1}{2} \cdot (A \cdot \rho \cdot c_d)} \quad (1.7)$$

Nello stesso modo si dimostra inoltre che gli effetti dovuti alle dimensioni e alla forma nell'efficienza di scivolamento possono essere distinti considerando il fattore di scivolamento come prodotto di una costante di scivolamento (relativa alle dimensioni) e un coefficiente di scivolamento (relativo alla forma). Questo tipo di relazione si ottiene ridefinendo la massa virtuale come prodotto fra il coefficiente di massa virtuale (adimensionale ed influenzato dalla forma del corpo) e la massa del corpo, riscritto secondo la seguente equazione:

$$C_G = \frac{m}{\frac{1}{2} \cdot (A \cdot \rho)} \cdot \frac{c_m}{c_d} \quad (1.8)$$

dove il primo rapporto a destra dell'equazione è definito come costante di scivolamento λ (in metri) mentre il secondo rapporto fra il coefficiente di massa e il coefficiente d'attrito definisce il coefficiente c_g di scivolamento (coefficiente adimensionale) con valore stimato di $2,14 \pm 0,35$, utilizzato in materia per determinare l'efficienza dello scivolamento, in relazione alla forma, per ciascun nuotatore indipendentemente dalle dimensioni del corpo.

1.3 IPOTESI SEMPLIFICATIVE DEL PROBLEMA

Per la determinazione della resistenza passiva abbiamo analizzato un caso particolare dell'azione di un nuotare. Il caso di nostro riferimento è quello di un nuotatore in posizione idrodinamica immerso completamente in acqua ad una profondità tale per cui come abbiamo visto è possibile trascurare la resistenza d'onda. Un altro aspetto che caratterizzerà la nostra analisi è quello di mantenere il nuotatore ad una velocità v costante in modo tale da poter trascurare effetti dovuti all'accelerazione come la

massa aggiunta. Ci concentreremo pertanto solo sugli aspetti relativi alla misura della resistenza di forma. Tale aspetto comporta non poche difficoltà per quanto riguarda l'analisi nel tempo per alcuni principali motivi:

- 1) La prima problematica da affrontare in questa analisi è di tipo logistico e sta nel fatto di aver solitamente a disposizione vasche da 25 o al limite da 50 mt che consentono perciò misurazioni a breve termine la cui interruzione e ripetizione crea incongruenze nell'analisi dei dati dovute a spinte e posizioni difficilmente eguagliabili ad ogni misurazione.
- 2) Una seconda problematica invece è data dalla natura del soggetto che, per misurazione protratta per diverso tempo, avrà problemi nel mantenimento di una determinata posizione. Vi sono infatti casi, come vedremo in seguito, in cui vengono utilizzati manichini fissati in posizione statica soggetti ad un flusso continuo, che tuttavia porteranno a valutare valori d'attrito e resistenza differenti rispetto a quelle di un soggetto vivo.

Per un'analisi della resistenza passiva su soggetti vivi possono essere quindi utilizzati due metodi, traino passivo attraverso un verricello oppure soggetto mantenuto in posizione statica soggetto ad un flusso costante. Tali metodi verranno poi esaminati in dettaglio nel capitolo seguente, anche per quanto riguarda acquisizione/elaborazione dati ed eventuali analisi dei pro e contro di ciascun metodo.

1.4 SCOPO DELLA TESI

Nei seguenti capitoli verranno analizzati alcuni metodi di misura della resistenza affrontando le possibili problematiche riguardo al loro utilizzo nel campo fluidodinamico da noi preso in esame. Scopo di questa tesi è quello di valutare la possibilità di misurare la resistenza idrodinamica passiva attraverso delle tecniche alternative che in passato sono state utilizzate con successo in settori ingegneristici molto diversi da quello bio-meccanico come quello aeronautico e automobilistico. Queste tecniche stimano il valore della resistenza attraverso una caratterizzazione della scia che il corpo oggetto di studio genera dietro di sé. Nei prossimi capitoli saranno in primo luogo introdotti i concetti fisico-matematici che stanno alla base di tali metodologie. Il metodo in questione verrà quindi descritto nei capitoli 3 e 4 dove

saranno discusse le sue potenzialità per la misura della resistenza di un soggetto in posizione idrodinamica trainato a velocità costante. Saranno infine descritte possibili tecniche sperimentali attraverso le quali possono essere caratterizzati i campi di velocità nella scia necessari a determinare, mediante una particolare specializzazione dei metodi oggetti di studio (Metodo di Onorato), la resistenza di un corpo immerso in un fluido.

CAPITOLO 2

METODI DI INDAGINE E PARAMETRI IDRODINAMICI

2.1 TIPOLOGIE DI INDAGINE

2.1.1 Metodo analitico

In principio, la resistenza di un corpo può essere determinata risolvendo analiticamente le equazioni del moto (equazioni di Navier-Stokes) con le appropriate condizioni al contorno. Tale approccio è applicabile solo a casi molto semplici come ad esempio il calcolo della resistenza di una sfera a bassi numeri di Reynolds o nel caso di calcolo della resistenza di una lamina piana ad incidenza nulla quando il flusso è laminare. In casi più complessi in cui la geometria da analizzare (es corpo di un nuotatore) e il regime del flusso (es flusso turbolento) non consentono di effettuare ipotesi semplificative, tale approccio risulta impraticabile.

2.1.2 Indagine numerica

Laddove non è possibile affrontare analiticamente il problema, l'avvento di moderni computer ha reso possibile la soluzione numerica delle equazioni di Navier Stokes.

Le simulazioni numeriche offrono la possibilità di accedere a tutte le variabili nell'intero dominio e permettono quindi di riconoscere le diverse fonti di resistenza tra cui resistenza di forma e di attrito.

Esistono diversi metodi per approssimare numericamente le equazioni di Navier-Stokes, e poiché generalmente sono operazioni dall'elevato costo computazionale, si

sono sviluppati approcci diversi a seconda del grado di precisione e la rapidità di calcolo richiesta. In particolare possiamo distinguere almeno tre livelli di approssimazione:

- **Direct Numerical Simulation** (*Simulazione Numerica Diretta: DNS*): è l'approccio concettualmente più semplice in cui si discretizzano lo spazio e il tempo con griglie di calcolo, dalle dimensioni legate al numero di Reynolds e alla geometria stessa del corpo, su cui si eseguono i calcoli. È l'approccio che restituisce risultati molto accurati ma ad un costo computazionale elevatissimo, e richiede l'uso di supercomputer. Per le applicazioni industriali risulta quindi troppo dispendioso.
- **Large Eddy Simulation** (*LES*): consiste nel calcolare numericamente il comportamento delle scale turbolente più grandi e modellare opportunamente le scale più piccole (Sub-grid Scale). Per operare questa suddivisione si introducono filtri numerici creati ad-hoc. Fornisce risultati meno accurati delle DNS con un costo computazionale inferiore, ma ancora abbastanza elevato. E' un metodo in forte sviluppo ma tuttora poco utilizzato in applicazioni pratiche in quanto comporta a sua volta un elevato costo computazionale.
- **Reynolds Averaged Navier-Stokes** (*Equazioni mediate alla Reynolds: RANS*): si basano sull'assunzione che si possa vedere il moto turbolento come formato da un moto medio e da una sua fluttuazione nel tempo. Le equazioni di Navier-Stokes vengono riscritte seguendo questa decomposizione e mediate nel tempo. Il risultato è una equazione che descrive il moto medio. Così facendo i tempi di calcolo vengono notevolmente ridotti in quanto le scale del moto medio risultano essere notevolmente maggiori di quelle del moto turbolento. La chiusura del sistema richiede l'utilizzo di modelli di turbolenza (ad esempio il modello $k-\epsilon$) che legano la parte fluttuante alle quantità medie. La precisione di questi modelli varia a seconda del problema affrontato e richiede spesso verifiche di tipo sperimentale.

In conclusione approcci di tipo DNS e LES risultano essere poco praticabili nel caso di una geometria complessa e dalla molteplici variabili come quella da noi presa in

esame. L'approccio di tipo RANS risulta essere fattibile in linea di principio; Tuttavia ci sono alcuni aspetti che ne limitano l'affidabilità. Il primo aspetto riguarda la capacità di discretizzare il dominio in modo da riprodurre in maniera realistica la geometria e le condizioni al contorno. Un secondo aspetto riguarda la scelta del modello di turbolenza più appropriato e la necessità di conoscere a priori le zone del corpo soggette a flusso laminare o turbolento. Infine un ulteriore aspetto riguarda l'implementazione di corrette condizioni al contorno, che date le limitate dimensioni del dominio di calcolo, possono presentare delle difficoltà. Da ciò si può concludere che, seppure l'approccio tramite RANS può essere un valido strumento di analisi, esso necessita comunque del supporto e della guida di dati sperimentali.

Ad ogni modo questo tipo di tecniche possono essere utilizzate per calcolare forze di resistenza su un modello di corpo virtuale basandosi ad esempio sulla geometria scansionata di un corpo umano reale. L'analisi in condizione stazionaria, a velocità costanti differenti, dimostra che le forze resistive calcolate hanno uno scostamento massimo del 4% rispetto ai valori riscontrati in un soggetto reale [15]. Le discrepanze riscontrate tra i risultati della CFD (fluidodinamica computazionale) e le forze di resistenza su un soggetto vivo potrebbero essere correlati alle possibili differenze nel livello di rugosità della pelle e nelle caratteristiche della turbolenza a monte nel modello.

2.1.3 Indagini sperimentali

Misura diretta della resistenza

Il metodo più semplice per determinare la resistenza è quello di misurare direttamente le forze agenti su un corpo investito da un flusso a velocità costante. Tale condizione può essere realizzata o trainando il corpo in un fluido in quiete (mediante ad esempio l'uso di un cavo) o vincolando il corpo mediante supporti e sottoponendolo ad una corrente costante.

Nel primo caso la resistenza si può determinare misurando la tensione del cavo, nel secondo misurando la forza applicata ai supporti, ad esempio attraverso apposite bilance come mostrato in Fig (2.1).

La misura della resistenza passiva di un soggetto in posizione statica soggetto ad un flusso costante viene effettuata utilizzando una riproduzione di un soggetto umano (per non incorrere in problematiche quali il mantenimento statico della posizione per lunghi periodi di misurazione) mantenuto ad una profondità prestabilita mediante un supporto in acciaio collegato ad un dispositivo per il calcolo della resistenza costituito da quattro estensimetri come illustrato in figura.

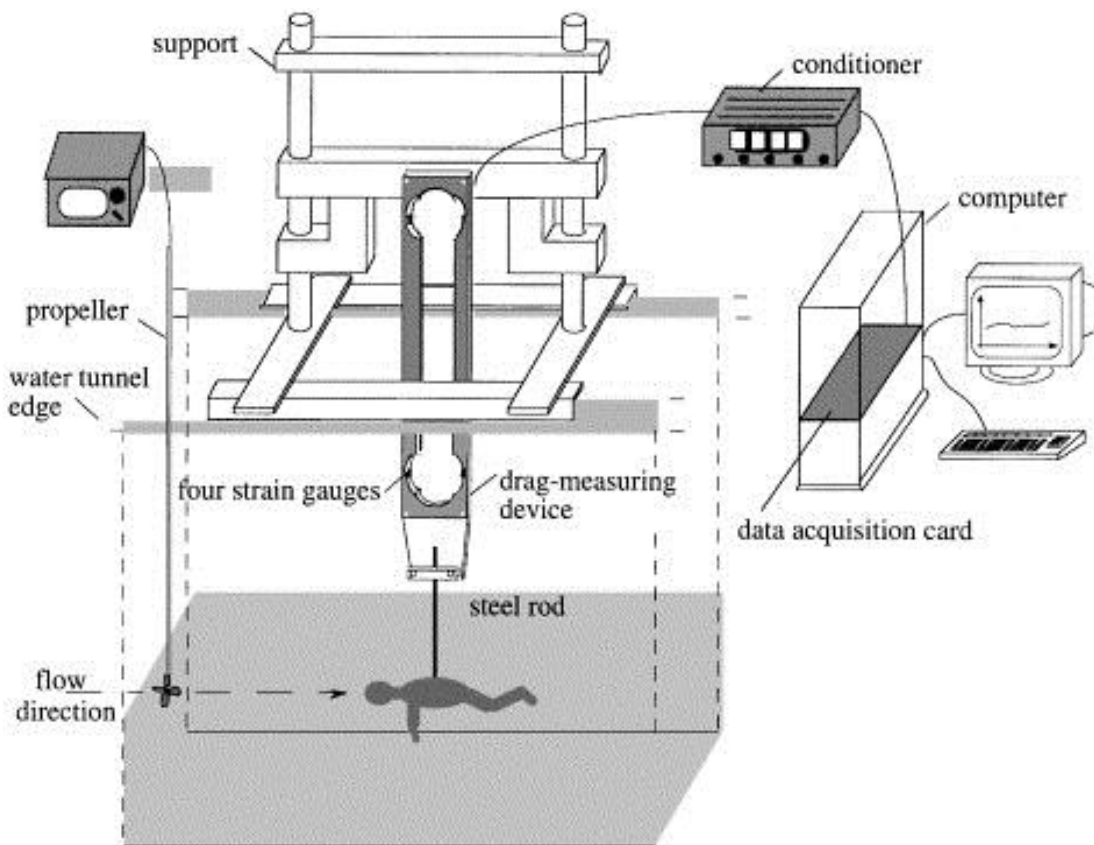


Fig (2.1): nella figura viene rappresentata la struttura mediante la quale il corpo viene sottoposto all'azione di un flusso costante per la misura della resistenza, che esso produce, mediante l'utilizzo di bilance ad estensimetri [14]

Questo tipo di misurazioni sono soggette ad alcune problematiche dovute sia alla turbolenza della corrente libera che all'onda creata dalla corrente del canale artificiale. Tale problematica viene accentuata quanto più il nostro soggetto è vincolato ai bordi di una piscina questo perché il flusso generato va ad infrangersi ripetutamente su di esso fornendo misurazioni alterate rispetto ad un corpo analizzato in spazi più ampi dove tuttavia per generare la stessa entità di flusso bisogna spostare

una massa d'acqua maggiore che a sua volta produrrà una turbolenza d'onda non indifferente. L'entità dei disturbi può essere ridotta ponendo il nostro manichino lontano dalla superficie. Da alcuni esperimenti risulta inoltre che la resistenza misurata su un modello artificiale può variare anche del 18% rispetto al caso in cui si utilizzi un modello umano [14].

Il secondo metodo di misurazione è applicabile ad un corpo che viene trascinato in acqua ferma. Otteniamo così una resistenza totale che corrisponde esattamente alla forza applicata per trascinare il corpo. L'apparecchiatura consiste tipicamente in un cavo passante attraverso un argano rotante applicato al bordo della vasca che applica un'azione di traino sul corpo come mostrato in Fig (2.2). Quando, dopo una prima fase di accelerazione, il corpo trainato raggiunge una velocità costante la forza di traino può essere considerata pari alla resistenza idrodinamica, che può essere misurata mediante un estensimetro o cella di carico.



Fig 2.2: nuotatore trainato a velocità costante mantenendo una posizione idrodinamica costante [17]

2.2 MISURA INDIRECTA DELLA RESISTENZA

Le metodologie descritte sopra soffrono di una forte limitazione poiché esse forniscono solamente una misura della resistenza, senza però dare alcun tipo di informazioni riguardo ai meccanismi fisici e ai punti critici da cui essa ha origine. Tramite le sole misure di resistenza è molto difficile effettuare considerazioni riguardo a strategie di ottimizzazione della postura e dell'azione natatoria.

E' certamente possibile integrare le misure di resistenza con alcuni strumenti da porre sulla superficie del nuotatore tramite l'ausilio di speciali tute strumentate. Ad esempio si può pensare di dotare tali tute di sensori di pressione o altri strumenti che possano fornire dati quantitativi o qualitativi sui dettagli del flusso che attraversa il nuotatore. Tuttavia questo approccio risulta costoso e complesso da attuare in pratica ed una forte limitazione deriva soprattutto dal fatto che il peso e l'ingombro della strumentazione può influire notevolmente sul flusso stesso, o sulla postura del nuotatore, inficiando quindi la misura.

Un'alternativa ai metodi diretti è la misura della resistenza tramite analisi della scia. Questa metodologia è stata introdotta da diversi anni in campo aerodinamico per la misura della resistenza di profili alari e altri oggetti di forma più complessa. [16] Queste misurazioni si basano sul principio che la forza trasmessa dal fluido al corpo, e quindi la resistenza, è pari alla quantità di moto trasferita dal corpo al fluido. Questa è pari alla variazione dell'energia cinetica del flusso a monte e a valle del corpo stesso. Sperimentalmente, questo si traduce nella valutazione dei termini dell'equazione del bilancio della quantità di moto in forma integrale. Il procedimento verrà discusso nel dettaglio nel capitolo successivo.

Nel proseguo ci si occuperà della valutazione della resistenza di corpi tozzi, corpi, cioè, caratterizzati da estese separazioni dello strato limite e da scie che presentano dimensioni del medesimo ordine di grandezza delle dimensioni trasversali del corpo stesso. Con questo metodo è possibile verificare immediatamente come una modifica della geometria influenza lo sviluppo della scia alle spalle del corpo e quindi come tale cambiamento si ripercuote sulla resistenza.

CAPITOLO 3

ANALISI DELLA SCIA

3.1 INTERPRETAZIONE ENERGETICA DELLA SCIA

Poiché la resistenza è per definizione l'unica componente a compiere lavoro all'interno di un fluido, ad essa dovrà corrispondere una variazione di energia del fluido stesso. Tale energia è trasferita al fluido inizialmente sotto forma di energia cinetica (o potenziale) la quale a sua volta si trasforma, tramite dissipazione, in energia interna (calore).

Quanto appena enunciato può essere spiegato con maggior precisione considerando un corpo che si muove in un fluido viscoso con direzione concorde al piano x e con velocità U . Stabilendo un piano cartesiano avremmo nel piano normale all'asse x l'integrale $E(x)$ dell'energia cinetica, e dal momento che si considera un piano di riferimento fisso con il fluido, tale integrale rappresenta l'energia cinetica di perturbazione, cioè quell'energia che il corpo con il suo moto induce sul fluido fig(3.1).

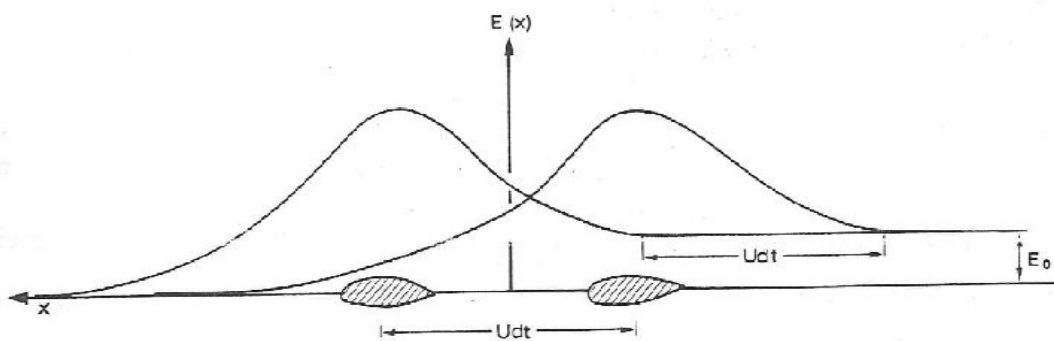


Fig 3.1: rappresentazione dell'energia cinetica formata dall'unione di due strati limite, causa dell'azione viscosa del fluido.

In questo caso essendo in un sistema di riferimento solidale con il fluido l'energia cinetica tenderà a zero a monte, mentre assumerà un valore costante diverso da zero a valle del profilo a causa dell'energia rilasciata nella scia. Quindi la quantità di energia $E(x)$ può anche essere interpretata come l'integrale, della somma dell'energia cinetica e dell'energia interna, esteso ad ogni piano $x = \text{costante}$.

Facendo una considerazione di tipo temporale notiamo che in un intervallo dt dove il corpo si sposta di una quantità Udt , avremo un aumento di energia globale presente nel fluido pari a $EoUdt$.

In un sistema adiabatico, tale aumento di energia dovrà perciò corrispondere al lavoro di una forza (Fx) compiuto sul fluido:

$$EoUdt = FxUdt \quad (3.1.1)$$

Sul corpo perciò agirà una forza direttamente opposta a ($-fx$) che in modulo sarà uguale a Eo , dove Eo è l'integrale dell'energia del fluido esteso al piano $x = \text{infinito}$ a valle del corpo.

Come abbiamo detto l'energia è inizialmente sotto forma di energia cinetica pertanto Eo sarà determinata attraverso l'equazione:

$$E = \int_{x=\infty} \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2 + w^2) dy dz \quad (3.1.2)$$

dove u, v, w sono le componenti della velocità in un sistema di riferimento solidale con il fluido. Nel seguito si cercherà, quindi, di determinare un'espressione che consenta di ricavare la resistenza di un qualsiasi corpo attraverso misurazioni di pressione e di velocità, effettuate in un piano a valle del corpo stesso.

3.2 EQUAZIONI DI BILANCIO DELLA QUANTITÀ DI MOTO

In un sistema adiabatico la variazione di energia cinetica è legata alla variazione della quantità di moto. Il prossimo passo è quindi quello di scrivere le equazioni di bilancio della quantità di moto da cui ricavare un'espressione che ci consenta di determinare la resistenza.

Cominciamo dall'enunciare la legge di bilancio della quantità di moto: la variazione nel tempo della quantità di moto di un volume materiale di fluido, cioè un volume di

fluido in moto, costituito sempre dalle stesse particelle, è uguale alla forza risultante agente sul volume stesso. Tale assunto può essere espresso attraverso la seguente relazione, valevole per qualsiasi tipo di corpo:

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} (m\vec{V}) \quad (3.2.1)$$

dove $m\vec{V}$ è la quantità di moto del corpo di massa m .

Nel caso di un corpo di massa costante, la relazione assume la classica forma della seconda legge di Newton:

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

La relazione (3.2.1) va, specializzata all'ambito della dinamica dei fluidi e per fare ciò si impiegherà un modello di volume di controllo di dimensioni finite, fissato nello spazio, attraverso il quale il flusso può liberamente muoversi. In questo caso, quindi, il volume V del volume di controllo e la superficie S della superficie di controllo (che racchiude V), sono costanti con il tempo, mentre la massa di fluido contenuta all'interno del volume di controllo può variare in funzione del tempo, a causa delle fluttuazioni non stazionarie delle proprietà del campo di moto.

La relazione (3.2.1), che è un'equazione vettoriale, può essere riscritta come:

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} \iiint \rho \vec{V} dv \quad (3.2.2)$$

che può essere scissa nelle tre equazioni scalari:

$$F_i = \frac{d}{dt} \iiint \rho u_i dv \quad (3.2.3)$$

dove $i=1, 2, 3$.

Considerando allora un campo di moto in cui tutte le proprietà possano variare sia nello spazio che nel tempo, ad esempio $p = p(x, y, z, t)$. In questo campo di moto si prenda in esame il volume di controllo fissato nello spazio, mostrato in Fig(3.2).

In un punto sulla superficie di controllo S , la velocità del flusso è pari a \vec{V} e il vettore dell'area della superficie elementare è $d\vec{S} = \vec{n}dS$.

Inoltre dV è un elemento infinitesimo di volume all'interno del volume di controllo V .

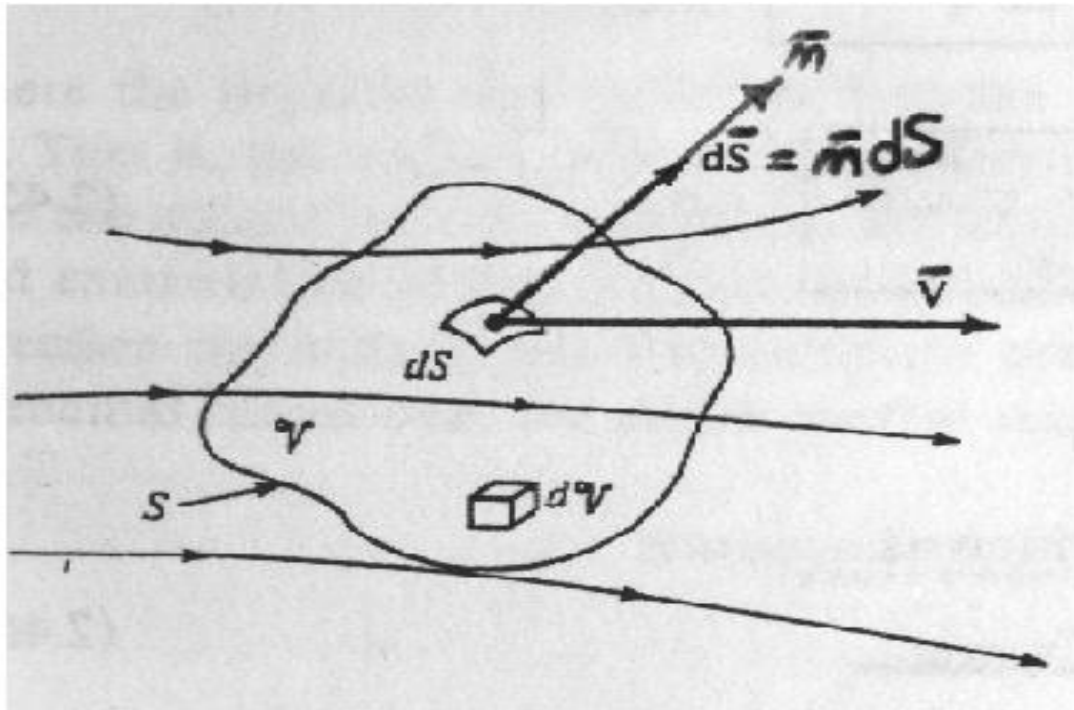


Fig 3.2 Volume di controllo fissato nello spazio (tratta da [24]).

Esaminando la figura si nota che la normale \vec{n} alla superficie è stata presa in modo da puntare verso l'esterno del volume di controllo. Si cerca, adesso, di ricavare il termine F_i dell'equazione (3.2.3), che corrisponde alla risultante delle forze agenti sul fluido che attraversa il volume di controllo considerato, in direzione i .

Tali forze possono essere suddivise in due contributi:

- Le forze di massa, come la forza di gravità o le forze elettromagnetiche, che agiscono sul volume di fluido a distanza;
- Le forze di superficie, che vengono trasmesse attraverso la superficie di contorno, dovute all'azione del resto del fluido su quello contenuto nel volume di controllo.

Perciò, è possibile riscrivere l'equazione (3.2.3) nella seguente forma:

$$\frac{d}{dt} \iiint \rho u_i dv = \iiint \rho f_i dv + \iint \vec{\tau}_i \cdot \vec{n} dS \quad (3.3.1)$$

in cui resta ancora da valutare il termine a sinistra del segno di uguaglianza. Esso rappresenta la variazione nel tempo della quantità di moto del fluido che attraversa il volume di controllo, ed è somma di due contributi:

- Flusso netto della quantità di moto fuori del volume di controllo attraverso la superficie S ;

- Variazione nel tempo della quantità di moto a causa di fluttuazioni non stazionarie delle proprietà del fluido presente all'interno di V.

La relazione (3.3.1), allora, può essere riscritta come:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint \rho u_i \, dv + \iint (\rho \vec{v} \cdot \vec{n} dS) u_i = \iiint \rho f_i \, dv + \iint \vec{t}_i \cdot \vec{n} dS \quad (3.3.2)$$

La forma integrale dell'equazione di bilancio della quantità di moto così ricavata verrà impiegata per ricavare la resistenza di un corpo immerso in una corrente, attraverso il cosiddetto "Momentum Method".

3.3 METODO DI ONORATO

3.3.1 Premessa

Il risparmio energetico è un parametro di fondamentale importanza nello studio del nuoto agonistico e dipende principalmente da fattori riguardanti l'idrodinamica e l'attrito del corpo. È noto che per un soggetto umano oltre l'85% della resistenza totale è dovuta alla distribuzione della pressione sul corpo in cui la parte anteriore contribuisce ad un massimo del 9% sulla resistenza di pressione totale ed il resto viene generato in corrispondenza dell'estremità posteriore del corpo [23].

L'entità di tale pressione alla base del corpo è strettamente legata alla struttura del complesso flusso generato nella scia. La struttura sviluppata dalla scia trasporta informazioni circa le forze idrodinamiche agenti sul corpo ed è conseguenza di tutte le caratteristiche del flusso attorno al corpo.

Per questa ragione, al fine di generare una migliore comprensione del meccanismo di generazione della resistenza, sono stati effettuati diversi studi ed indagini sperimentali sulla separazione del flusso a valle del corpo, utili anche per lo sviluppo di modelli matematici per il calcolo numerico delle caratteristiche idrodinamiche del soggetto [18,19, 20,21,22].

Il metodo di Onorato viene utilizzato per definire un volume di controllo e delle condizioni che permettono di operare con l'equazione di bilancio della quantità di moto in modo tale da ricavare la resistenza.

3.3.1 Il metodo

Una caratteristica chiave del campo di moto attorno al corpo è la presenza di vaste regioni di flusso separato, e quindi di un'ampia scia; risulta allora evidente, come il più importante contributo alla resistenza di un soggetto derivi dalla resistenza di pressione.

È possibile rilevare come la parte anteriore del corpo contribuisca alla resistenza di pressione fino ad un massimo del 9%, se, ivi, il flusso non subisce separazioni; la restante parte è generata nella zona posteriore del corpo ed è dipendente essenzialmente dal livello delle pressioni agenti sulla base del corpo.

Tale valore è strettamente correlato alla presenza nella scia di strutture vorticali, i cui meccanismi di formazione e le cui interazioni vanno ben comprese per poter procedere ad una qualche forma di controllo del flusso sia di tipo attivo che passivo.

Le separazioni del flusso che danno luogo a resistenza di pressione possono essere divise in due tipologie diverse.

Un primo tipo è quello che ha luogo in corrispondenza di una linea di separazione perpendicolare alla direzione del flusso. In tal caso si originano dei vortici i cui assi sono paralleli alla linea di separazione stessa. Tali vortici, causano componenti di velocità molto piccole parallele agli assi dei vortici stessi.

Il secondo tipo di separazione invece ha luogo nel momento in cui il flusso locale incontra uno spigolo ad incidenza formando dei vortici, con asse longitudinale.

Questi vortici presentano un contenuto energetico molto più elevato dei precedenti e danno luogo ad un campo di velocità indotte molto vasto.

La velocità circonferenziale di essi decresce all'aumentare della distanza dall'asse del vortice. L'unica zona in cui ciò non vale è il cosiddetto "viscous core" del vortice, dove la velocità circonferenziale è molto bassa o addirittura nulla, come accade in corrispondenza dell'asse del vortice.

Come più volte sottolineato, la struttura della scia già completamente sviluppata trasporta con sé informazioni circa le forze idrodinamiche agenti sul corpo, dal momento che essa è una conseguenza delle caratteristiche del flusso attorno al corpo stesso.

Applicando il teorema della quantità di moto al fluido compreso all'interno di un tubo di corrente che circonda il modello, come è visibile in Fig. 3.4, è possibile

risalire al coefficiente di resistenza, C_d secondo la relazione formulata da Onorato et al.[8]:

$$SC_d = \iint_{A_2} \left(\frac{P_{t1} - P_{t2}}{q_\infty} \right) dy dz - \iint_{A_2} \left(1 - \frac{V_{x2}}{V_1} \right)^2 dy dz + \iint_{A_2} \left[\left(\frac{V_{y2}}{V_1} \right)^2 + \left(\frac{V_{z2}}{V_1} \right)^2 \right] dy dz \quad (3.4)$$

in cui i pedici 1 e 2 si riferiscono alle sezioni A_1 e A_2 di Fig. 3.3.

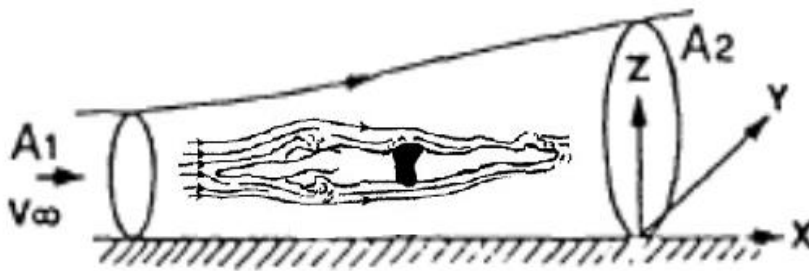


Fig.3.3. Tubo di flusso attorno al modello (tratta da [20]).

La sezione A_1 è posta sufficientemente a monte del corpo stesso, in modo che il flusso possa considerarsi pressoché indisturbato ed uniforme. Questa stessa sezione è presa in modo che sia larga abbastanza da poter supporre che la pressione agente sulla superficie esterna del tubo di flusso tra A_1 e A_2 sia costante ed eguale alla pressione statica del flusso indisturbato, P_1 .

La sezione A_2 è la sezione in cui sono effettuate le misurazioni ed è posta in un piano normale alla direzione della corrente indisturbata.

I simboli dell'espressione (3.4) presentano i seguenti significati: P_t è la pressione totale; $q_\infty = \frac{1}{2} \rho V_1^2$ è la pressione dinamica, in cui V_1 è la velocità rilevata nella sezione A_1 , S è l'area della massima sezione trasversale del corpo mentre V_x, V_y, V_z sono le componenti di velocità lungo gli assi del sistema di riferimento raffigurato in Fig.1.9.

I tre integrali rappresentano e quantificano tre diversi fenomeni che si manifestano nella scia del corpo.

Il primo integrale, $\iint_{A_2} \left(\frac{P_{t1} - P_{t2}}{q_\infty} \right) dy dz$, è dovuto alla non-isoentropicità dei processi a cui il flusso è sottoposto mentre fluisce attorno al corpo, e quindi, in generale, alle perdite energetiche che il fluido presente nella scia subisce; il secondo termine, $-\iint_{A_2} \left(1 - \frac{V_{x2}}{V_1} \right)^2 dy dz$, dipende invece dalla variazione della velocità longitudinale del flusso.

Infine, il terzo integrale, $\iint_{A_2} \left[\left(\frac{V_{y2}}{V_1} \right)^2 + \left(\frac{V_{z2}}{V_1} \right)^2 \right]$ rappresenta la già citata resistenza vorticale. Tale termine avrà un elevato peso laddove siano presenti nella scia del modello intensi vortici longitudinali, infatti, poiché tali strutture possano mantenersi nel campo di moto è necessario fornire loro una certa quantità di energia che viene messa a disposizione proprio sotto forma di lavoro prodotto dalla resistenza vorticale.

3.4 APPLICAZIONI SPERIMENTALE DEL METODO DI ONORATO

3.4.1 Dispositivo sperimentale

Come esempio dei risultati che possono essere ottenuti con questa tecnica, in questo paragrafo saranno riassunti alcuni test sperimentali effettuati su modelli di autovetture caratterizzate da diverse geometrie. Gli esperimenti sono stati condotti nelle gallerie del vento del Politecnico di Torino. Questo tunnel ha una sezione di prova con un diametro circolare di 3 metri ed una velocità massima riproducibile di 90 m s^{-1} , dotato di un pavimento adatto per test su auto. Lo strato limite piano è controllato mediante uno slot di aspirazione trasversale posto 0,40 m a monte del modello. Le misurazioni sono state eseguite con aspirazione. Le prove qui descritte sono state effettuate ad una velocità del vento di 40 ms^{-1} .

La caratterizzazione della scia è stata effettuata utilizzando una sonda di pressione montata su un sistema di movimentazione cartesiano.

La sonda, di forma conica a punta con nove buchi, è lo strumento di misurazione utilizzato per la misura della velocità e dell'angolo di direzione.

3.4.2 Modelli e risultati di bilancio

Le prove sono state effettuate con diversi modelli. Le dimensioni dei modelli erano in rapporto 1/4.25 con quelle di una autovettura reale. Partendo da un corpo di riferimento (A), sono state effettuate misure su tre modelli ottenuti aggiungendo al corpo anteriore (A) tre sezioni intermedie (A1, A2, A3); infine si è ottenuta la configurazione con minima resistenza implementando il modello con ulteriori tre corpi nel retrotreno (A11, A12, A13). In Fig.3.4 sono illustrate le forme del corpo analizzato mentre in tabella 3.1 sono riportati i coefficienti di resistenza per tutte le configurazioni del corpo.

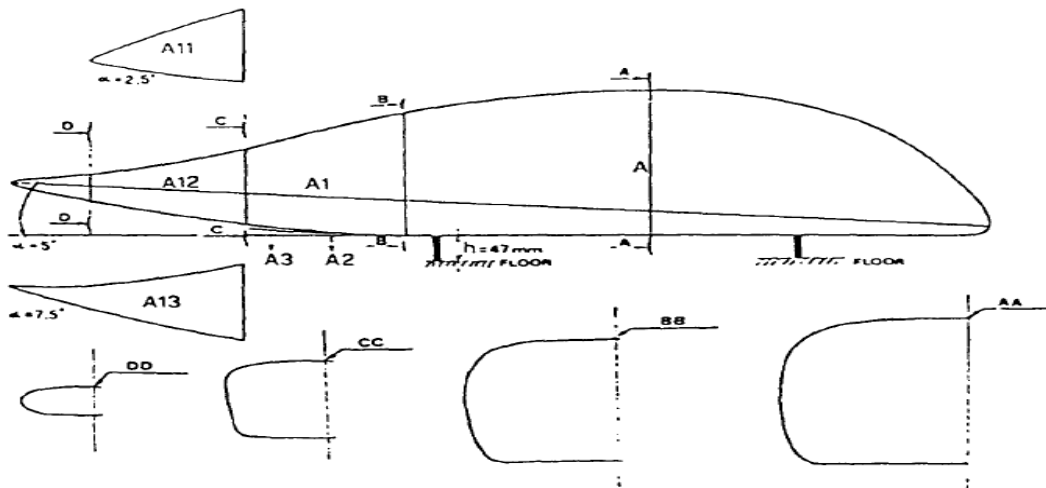


Fig.3.4 Modelli valutati per individuare il corpo aerodinamico ottimale. Lunghezza massima (A + A1 + A12) = 1,26 m. Altezza massima = 0.275 m. Area frontale = 0,0933 m [20].

Tabella 3.1

CONFIGURAZIONE	COEFFICIENTE DI RESISTENZA
A	0.176
A+A1	0.105
A+A2	0.146
A+A3	0.119
A+A1+A11	0.078
A+A1+A12	0.71
A+A1+A13	0.083

Il modello A + A1+ A12 è stato selezionato come il corpo aerodinamico di base. Per esaminare gli effetti numero di Reynolds, la configurazione A + A1 + A11 è stata testata a quattro diverse velocità i cui risultati sono riportati nella fig.3.5.

Dal corpo snello di base sono stati ricavati tre i modelli, ciascuno dei quali esibisce una struttura reale di un veicolo stradale come possiamo vedere nelle bozze rappresentate in fig.3.6 Nella tabella 2 sono invece riportati i risultati di misurazioni in condizioni di equilibrio.

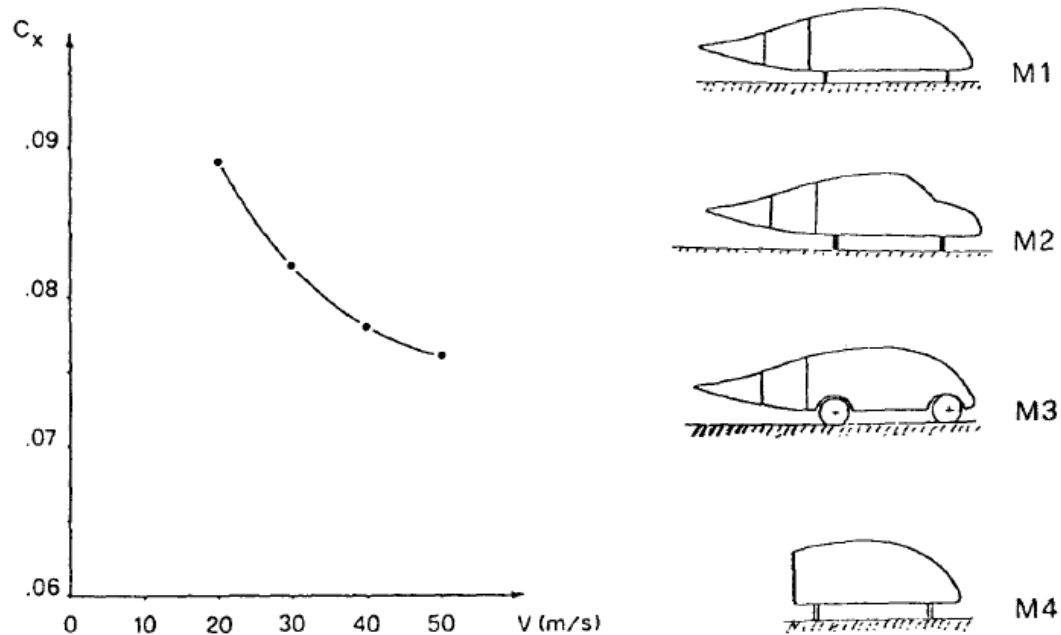


Fig.3.5 Effetto numero di Reynolds (Configurazione A + A1 + A11) [20].

Fig.3.6 Serie di modelli [20].

MODELLO	COEFFICIENTE DI RESISTENZA
M1	0.071
M2	0.074
M3	0.158
M4	0.176

3.4.3 Risultati

Le misurazioni della scia del flusso sono state prese ad una distanza dall'estremità posteriore del modello di 0,35 m. I risultati della scia del flusso a valle del corpo aerodinamico di base sono mostrati nella seguente figura dove vengono rappresentati i contorni della resistenza locale (R) 3.7a, del coefficiente di pressione (C_{pt}) 3.7b, della velocità longitudinale (V_x/V_1) 3.7c ed i vettori velocità del flusso 3.7d.

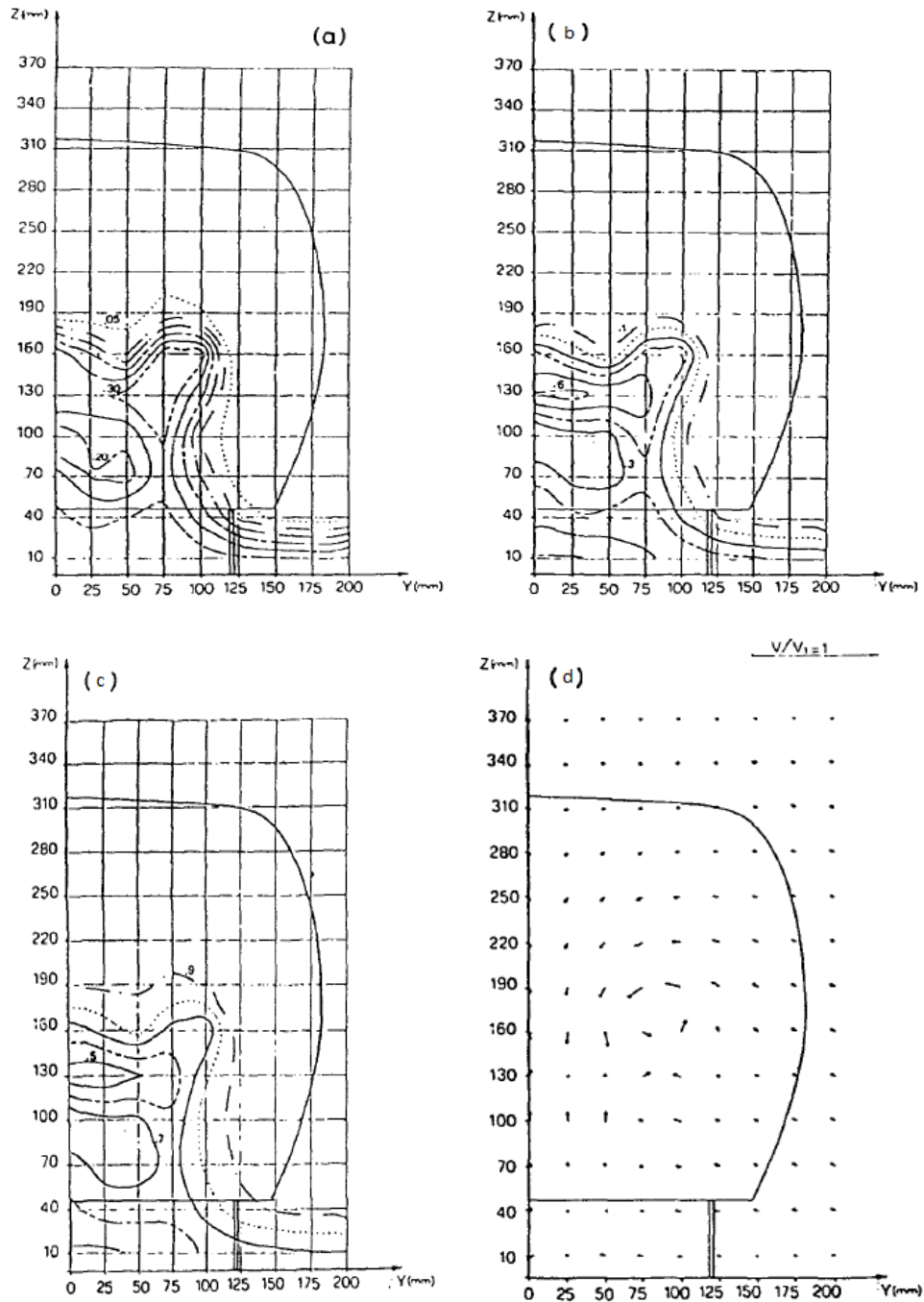


Fig.3.7: Distribuzioni nel piano di riferimento di: a) curve a $R=costante$, b) curve a $C_{pt}= costante$, c) curve a $V_x/V_1= costante$, d) vettori di velocita del flusso.[20]

Il massimo valore del contributo locale alla resistenza è $R = 0,3$ e si trova corrispondenza della parte superiore/esterna del modello e nella regione vicino alla suolo. Un contributo di minore entità è dovuto al flusso sottostante al corpo ed è certamente influenzato dallo strato di confine tra il suolo ed il modello. Un contributo fondamentale alla resistenza deriva dal flusso vorticoso che ha origine sulla parte superiore e sulla zona laterale inferiore del modello come visualizzato in fig. 3.7d dove vettori del campo velocità del flusso indicano la presenza di vortici longitudinali. Maggiori dettagli sono inoltre riportati nei contorni di vorticità rappresentati in fig.3.8

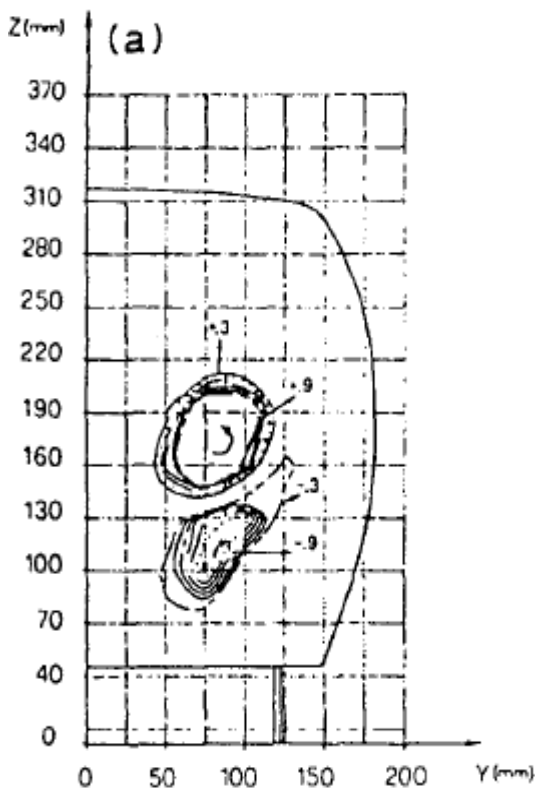


Fig 3.8 rappresentazione dei contorni di vorticità (curva con $\omega=costante$)[20]

Due vortici contrapposti, aventi circa la stessa intensità, provengono dalla regione superiore e laterale/inferiore del modello . Entrambi i vortici sono deboli e

dimostrano la presenza di tre dimensioni di separazione del flusso nella parte del posteriore modello. La perdita di pressione totale a causa dei vortici longitudinali e al flusso vicino al terreno è visibile in fig3.7a

Linee di velocità longitudinale costanti (Fig.3.7b) forniscono invece una stima dell'origine del flusso rispetto alla geometria del corpo; inoltre, il flusso proveniente dalla parte inferiore e quello proveniente dal lato superiore del corpo può essere identificato con riferimento al primo valore di $C_{pt} = 0,3$ registrato nella parte centrale dando prova di effetti viscosi subiti dal flusso.

Questi effetti sono presumibilmente a causa dell'unione dello strato limite del corpo e del suolo, probabilmente come conseguenza della separazione del flusso nella regione posteriore del modello. Dalla Fig 3.7a risulta che il valore della funzione di R in quella regione varia da 0,2 a 0,3 dando un contributo sostanziale al valore della resistenza totale. La linea di perdita totale di pressione, pari a 0,1 può essere considerata come il confine viscoso della scia e confrontando la forma di questa linea con i profili delle sezioni trasversali modello, si può dedurre che il flusso era quasi attaccato alla parte superiore e laterale del corpo per un tratto maggiore della lunghezza del modello stesso.

Come osservazione conclusiva, dopo l'analisi della scia di base di un corpo aerodinamico, si può osservare che la forma di questo corpo non può essere considerata come completamente ottimizzata: il suo coefficiente di resistenza potrebbe ancora essere ridotto, per esempio, migliorando la forma della parte posteriore del sottoscocca e rimuovendo i vortici osservati o almeno diminuendo la loro forza.

3.4.4 Conclusioni

Indagini sulla scia eseguite a valle di una serie di modelli di veicoli semplificati tramite l'utilizzo di sonde di pressione a nove fori con il suolo fissato e lo strato limite controllato tramite aspirazione, hanno permesso di ricavare le informazioni trasportate dalla scia che sono state poi analizzate per spiegare le variazioni di resistenza prodotte aggiungendo ad un corpo aerodinamico alcune caratteristiche reali di un veicolo stradale, come ad esempio il parabrezza inclinato(M2), le ruote(M3) e la sezione posteriore quadrata (M4).

I risultati dimostrano che l'analisi scia può essere un'aggiunta molto utile alle indagini aerodinamiche classiche.

Nel seguente capitolo osserveremo come valutare sperimentalmente l'equazione ricavata attraverso il metodo di Onorato. A tale scopo ci si pongono di fronte alcune problematiche che verranno discusse in modo più approfondito, come ad esempio la definizione del volume di controllo e la determinazione degli strumenti di misura da utilizzare per valutare i termini di velocità e pressione espressi nell'equazione (3.4).

CAPITOLO 4

TECNICHE SPERIMENTALI PER L'APPLICAZIONE DEL METODO

4.1 Premessa

La prima problematica a cui si deve far fronte nell'analisi della scia, consiste nel valutare con particolare attenzione la distanza alla quale effettuare l'analisi sul modello prescelto per evitare misurazione a distanze troppo ravvicinate o troppo distanti dal soggetto che porterebbero ad una difficile valutazione dell'energia cinetica.

Per quanto riguarda invece l'analisi dei parametri esplicitati nell'equazione di Onorato, vedremo in seguito una possibile soluzione per quanto riguarda la determinazione dei termini velocità e pressione individuando due differenti tipologia di analisi.

Queste tipologie di analisi sperimentale prevedono l'utilizzo di una piattaforma scorrevole che seguendo il nuotatore nell'azione di traino, a velocità costante, consente di effettuare misurazioni riguardanti la scia. Essa per l'appunto è un fenomeno fluidodinamico che si verifica ogni qual volta un corpo solido si muove attraverso un fluido: con il suo passaggio, esso perturba e trascina il fluido in modo che, dietro al corpo, si muove nella stessa direzione del suo moto. Questo fenomeno è spesso accompagnato da turbolenza e formazione di vortici. Tale approccio è di fondamentale importanza essendo alla base della soluzione del nostro problema.

Il modello utilizzato per tali esperimenti può essere in scala o meno, con il soggetto umano considerato in base agli spazi e ai mezzi a nostra disposizione.

Misure del bilancio possono essere eseguite su modelli differenti ottenuti tramite modifiche e miglioramenti sulla sezione principale. Tali modifiche saranno

principalmente orientate allo snellimento del corpo tramite l'utilizzo di particolari costumi o di particolare plantari che porteranno così sensibili miglioramenti riguardo la resistenza del corpo.

Al fine di esaminare gli effetti del numero di Reynolds, le varie configurazioni devono essere testate a diverse velocità.

4.2 PIV (Particle Image Velocimetry)

La PIV è un metodo ottico di visualizzazione del flusso utilizzato per ottenere misure riguardo le velocità istantanee e le proprietà relative dei fluidi.

Nel fluido in esame vengono immesse alcune particelle traccianti sufficientemente piccole per far sì che seguano fedelmente la dinamica del flusso (il grado in cui le particelle seguono fedelmente il flusso è rappresentato dal numero Stokes). Il fluido con le particelle in sospensione viene illuminato in modo tale da rendere ben visibili le particelle traccianti. Il moto di tali particelle viene poi utilizzato per calcolare velocità e direzione del flusso in fase di studio.

L'apparecchiatura PIV tipica è costituita da una telecamera, una lampada stroboscopica o una sorgente laser con una disposizione ottica per limitare la regione fisica illuminata (normalmente una lente cilindrica per convertire un fascio di luce ad una lama) e un sincronizzatore atto al controllo della telecamera e del laser.

“Seeding”

Le particelle traccianti sono una componente critica del sistema PIV infatti a seconda del fluido in esame, le particelle devono essere in grado di soddisfare le proprietà del fluido per mantenere un buon grado di accuratezza dell'analisi. Un parametro di rilievo delle particelle è costituito dall'indice di rifrazione che deve necessariamente essere differente da quello del fluido, in modo tale che solo le particelle di nostro interesse saranno direzionate verso la telecamera.

Per quanto riguarda il dimensionamento, le particelle dovrebbero avere un diametro sufficientemente piccolo in modo che il tempo di risposta delle stesse al moto del

fluido sia ragionevolmente breve da seguire con precisione il flusso, ma abbastanza grande per disperdere una quantità significativa della luce laser incidente.

Telecamera

Per eseguire l'analisi PIV sul flusso è necessario che le telecamere siano in grado di rilevare due esposizioni di luce laser sul flusso. Originariamente, con l'incapacità delle telecamere di catturare più fotogrammi a velocità elevate, entrambe le esposizioni venivano catturate sullo stesso frame poi utilizzato per determinare il campo di velocità attraverso un metodo matematico di autocorrelazione. Tuttavia, come risultato di questa autocorrelazione, la direzione del flusso diventava poco chiara, in quanto non è chiaro quali particelle provengano dal primo impulso e quali dal secondo. Miglioramenti tecnologici hanno poi permesso di sviluppare videocamere in grado di catturare due fotogrammi ad alta velocità, permettendo così che ogni esposizione sia isolata e consentendo una correlazione incrociata più accurata. La limitazione di tali telecamere è riguardante il numero di scatti in successione, questo perché ogni coppia di scatti deve essere trasferita al computer prima che un altro paio di scatti possa essere presa.

Laser e ottiche

Per configurazioni PIV macro, i laser sono predominanti a causa della loro capacità di produrre fasci di luce ad alta potenza con breve durata degli impulsi. Questo produce tempi di esposizione inferiori per ogni fotogramma. Un cavo a fibre ottiche montato sull'apparato sperimentale potrebbe essere inoltre utilizzato per dirigere la luce laser.

Le ottiche invece, sono costituite da una lente sferica e da una combinazione lenti cilindriche. La lente cilindrica permette l'espansione del raggio laser, mentre la lente sferica la comprime riducendola ad una lama sottile. Lo spessore minimo è dell'ordine della lunghezza d'onda della luce laser ed avviene ad una distanza finita dal setup ottica (punto focale della lente ottica) che corrisponde al luogo ideale in posizionare l'area di analisi dell'esperimento.

Sincronizzatore

Il sincronizzatore agisce come un trigger esterno sia per la telecamera che per il laser. Controllato da un computer, il sincronizzatore può dettare i tempi di ogni frame della fotocamera in concomitanza l'emissione del raggio laser (precisione:1 ns). La conoscenza di questa tempistica è fondamentale in quanto è necessaria per determinare la velocità del fluido nell'analisi PIV.

Analisi

I frame sono suddivisi in un numero elevato di aree di interrogazione o finestre. È poi possibile calcolare il vettore di spostamento per ogni finestra con l'utilizzo di elaborazione dei segnali e tecniche di autocorrelazione o cross-correlazione. Tale vettore viene poi convertito in una velocità utilizzando le dimensioni fisiche di ciascun pixel della fotocamera e il tempo tra le emissioni laser. La dimensione della finestra di interrogazione deve essere scelta in modo tale da avere almeno 6 particelle per finestra in media. Un esempio visivo di analisi PIV può essere visto in fig(4.2).

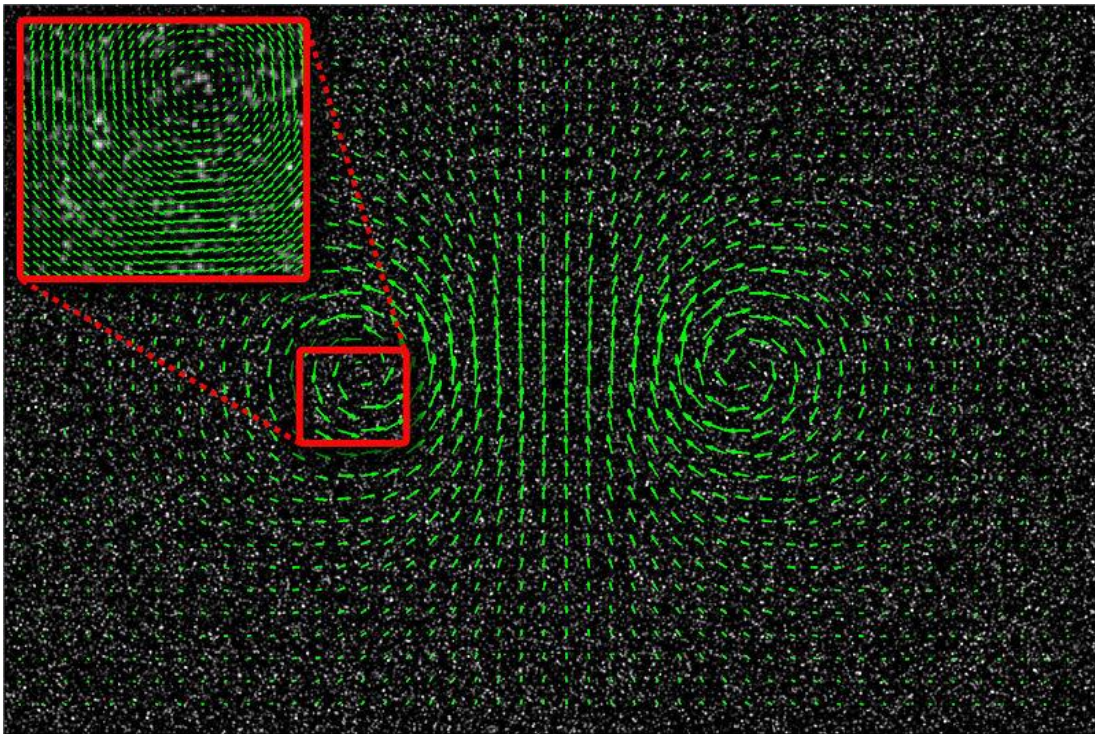


Figura 4.2: visualizzazione di un singolo pixel all'interno del quale vengono racchiuse 6 particelle [14]

Per una analisi PIV accurata, è ideale che la regione del flusso di interesse visualizzi

uno spostamento medio delle particelle di circa 8 pixel. Si tratta di un compromesso tra distanza e tempo dal momento che un tempo più lungo consentirebbe alle particelle di viaggiare tra più fotogrammi ma renderebbe così più difficile identificare quale finestra di interrogazione abbia viaggiato verso quel punto, mentre una spaziatura tempo più minore renderebbe eccessivamente difficile l'identificazione di qualsiasi spostamento all'interno del flusso.

Vantaggi e svantaggi

La tecnica appena discussa presenta alcuni vantaggi tra cui elevata accuratezza e non invasività del metodo. Inoltre i traccianti aggiunti nel fluido, se scelti in modo adeguato, causano una distorsione trascurabile del flusso. L'elaborazione dei dati ad alta velocità consente inoltre la generazione di un gran numero di coppie di immagini che tramite computer possono essere analizzate in tempo reale o in un momento successivo, acquisendo in modo continuativo una elevata quantità di informazioni.

Per quanto concerne invece gli aspetti negativi di tale tecnica possiamo notare che in alcuni casi le particelle a causa della loro maggiore densità non seguono perfettamente il moto del fluido (gas /liquido). Se gli esperimenti sono condotti ad esempio in acqua, è facile trovare particelle molto economiche e adatte al nostro utilizzo (ad esempio polvere di plastica con diametro di circa 60 micron) avente la stessa densità dell'acqua. Se la densità fosse ancora troppo grande è possibile allora agire sulla temperatura stessa dell'acqua.

Il metodo PIV generico non è inoltre in grado di misurare componenti della velocità lungo l'asse z. Questi problemi possono essere bypassati utilizzando una PIV stereoscopica, che utilizza due telecamere poste a 90° l'una dall'altra per misurare tutte e tre le componenti di velocità configurazione che sarà discussa nel paragrafo successivo

Ovviamente, un ultimo significativo svantaggio è costituito dal costo dell'intero sistema, che a seconda delle caratteristiche richieste può essere molto elevato (<100K €). Questo aspetto fa sì che un sistema di questo tipo sia difficilmente reperibile anche in laboratori Universitari.

PIV stereoscopica

La PIV stereoscopica come precedentemente discusso utilizza due telecamere con angoli di visualizzazione differenti per permettere l'analisi dello spostamento dell'asse z. Entrambe le telecamere devono essere focalizzate sullo stesso punto nel flusso e tutto ciò deve essere opportunamente calibrato.

Nella meccanica dei fluidi, un spostamento entro un tempo unitario in X, Y e Z è comunemente definito dalle variabili U, V e W. Attraverso la PIV generica si estraggono gli spostamenti U e V come funzioni del piano X e direzione Y. Ciò consente calcoli dei gradienti di velocità $U(x)$, $V(y)$, $U(y)$ e $V(x)$. L'analisi PIV stereoscopica in più garantisce anche la componente di spostamento dell'asse Z, W, all'interno di suddetto piano. Questo non solo conferisce il termine velocità dell'asse Z del fluido in corrispondenza del piano di interesse, ma permette inoltre la determinazione di ulteriori due gradienti di velocità: $W(x)$ e $W(y)$.

4.3 ANALISI DELLA SCIA MEDIANTE MISURE DI PRESSIONE

Indagini sulla scia per determinare i parametri di pressione individuati nell'equazione (3.4) possono essere condotte utilizzando una sonda di pressione montata su un carrello, che permette una rappresentazione cartesiana rettangolare lungo la larghezza e altezza della sezione di prova ad una data distanza dal modello. Le sonde possono essere di tipo standard o multiforo per la caratterizzazione anche delle componenti V e W. La sonda, di forma conica a punta con nove fori, rappresenta per esempio uno strumento di misurazione dell'imbardata. L'angolo di imbardata del flusso viene determinato ruotando l'asse verticale della sonda finché la differenza di pressione generata dai due orifizi sul piano orizzontale diventa zero. In questa condizione, le curve di calibrazione danno l'angolo d'incidenza del flusso come funzione della differenza di pressione tra i due orifizi nel piano verticale, la pressione totale come funzione della pressione registrata al vertice del cono e la pressione

statica viene assunta come funzione del valore medio della pressione data dai quattro orifizi sulla parte conica della punta della sonda.

La direzione del flusso invece è rilevata attraverso due coppie di orifizi sulla punta del cono, una coppia sul piano verticale ed una coppia sul piano orizzontale.

Un approccio sperimentale di questo tipo ci permette di determinare l'idrodinamicità del corpo analizzando l'angolo di attacco, già citato nel primo capitolo, che fornisce una stima della resistenza di forma agente sul modello. Per sistemi di questo tipo occorre verificare l'utilizzabilità delle sonde e dei relativi trasduttori in acqua.

4.4 POSSIBILI RISULTATI

Un aspetto interessante riguarda il fatto che avendo a disposizione le mappe di velocità nel piano di scia potrà essere facilmente valutato il campo di vorticità identificando regioni critiche e possibili margini di intervento per ridurre la resistenza complessiva.

In base alle immagini rilevate e alle mappe di energia o perdita di quantità di moto sarà possibile identificare quindi quali parti del nuotatore contribuiscono maggiormente alla resistenza complessiva. Dai risultati già disponibili in letteratura sembrerebbe che il valore massimo della partecipazione locale alla resistenza venga generato in corrispondenza della parte superiore (esterna) del modello e nella regione vicino al fondo della vasca, nel caso in cui il nostro modello sia a profondità tale da risentire degli effetti di bordo. Il primo contributo della resistenza deriva dal flusso vorticoso che ha origine sul lato superiore e inferiore del modello.

CONCLUSIONI

Oggetto di questa tesi è l'analisi dei metodi per la valutazione della resistenza idrodinamica nel nuoto. Dopo aver fatto un'introduzione sui diversi meccanismi fisici che contribuiscono alla resistenza di un nuotatore nel caso più generale, ci siamo concentrati sull'analisi della resistenza nel caso di un nuotatore ad assetto fissato e velocità costante. In questo caso è possibile misurare la resistenza in maniera diretta, ad esempio misurando la tensione di un cavo che traina un nuotatore a velocità costante. Questi metodi di misura diretta non consentono però fare analisi approfondite sul meccanismo fisico che genera tale resistenza, in quanto non consentono di avere informazioni né sulla distribuzione di forze sulla superficie del nuotatore né sulle caratteristiche della scia e del flusso generati dal passaggio del corpo.

In questa tesi abbiamo presentato una metodologia per la misura indiretta della resistenza basata sull'analisi della scia e la legge di bilancio della quantità di moto. Per prima cosa abbiamo descritto la legge del bilancio della quantità di moto in forma integrale. A partire da questa, abbiamo mostrato come, definendo opportunamente un volume di controllo attorno al corpo in moto, sia possibile ricavare un'espressione che legghi la resistenza del corpo a delle quantità misurabili sperimentalmente. Tale metodo è tipicamente usato in applicazioni aeronautiche, dove le misure possono essere effettuate con sonde di pressione (tubi di Pitot, prese statiche, etc). Questo tipo di misura è molto più complesso da realizzare in acqua. Nell'ultima parte della tesi abbiamo analizzato quindi la possibilità di utilizzare tecniche ottiche per la misura del campo della velocità quali la cosiddetta Particle Image Velocimetry. Infine, abbiamo mostrato una serie di esempi di risultati che potrebbe portare questa tecnica se applicata all'analisi della resistenza di un nuotatore.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Mollendorf et al. (2004)
- [2] Bixler B, Pease D, Fairhurst F. The accuracy of computational fluid dynamics analysis of the passive drag of a male swimmer. *Sports Biomech* 2007
- [3] Counsilman JE. Forces in swimming two types of crawl stroke. *Res Quart* 1955; 26:127–39.
- [4] Miyashita M, Tsunoda R. Water resistance in relation to body size. In: Eriksson B, Furberg B, editors. *International series of sport sciences; swimming medicine IV*, vol. 6. Baltimore: University Park Press; 1978.p. 395–401.
- [5] Maiello D, Sabatini A, Demarie S, et al. Passive drag on and under the water surface. *J Sports Sci* 1998; 16(5):420
- [6] Vorontsov AR, Rumyantsev VA. Resistive forces in swimming. In: Zatsiorsky V, editor. *Biomechanics in sport*. 1st ed. Oxford: Blackwell Science Ltd.; 2000. p. 184–204.
- [7] Havriluk R. Performance level differences in swimming: a metaanalysis of resistive forces. *Res Quart Exerc Sport* 2005;76(2) p: 112–8.
- [8] Vennell R, Pease D, Wilson B. Wave drag on human swimmers. *J Biomech* 2006;39(4):664–71.
- [9] Vogel S. *Life in moving fluids; the physical biology of flow*. 2nd ed. Princeton 1994.
- [10] Fox WR, McDonald AT. *Introduction to fluid mechanics*. 4th ed. New York: John Wiley 1992.
- [11] Schlichting H. In: Schlichting H, Gersten K, editors. *Boundary-layer theory*, 8th rev. Berlin and London: Springer; 2000, translated by Katherine Mayes.

- [12] Lang TG, Daybell DA. Porpoise performance tests in a sea-water tank. U.S. Naval Ordnance Test Station, Technical Report, China Lake, California; 1963.
- [13] Naemi R, Sanders RH. A 'hydro-kinematic' method of measuring glide efficiency of a human swimmer. *J Biomech Eng-Trans ASME* 2008;13(061016).
- [14] *Journal of Biomechanics* Volume 32, Issue Pages 803-810, August 1999
- [15] Hydrodynamic glide efficiency in swimming Roozbeh Naemia, William J Easson b, Ross H Sanders Department of Physical Education, University of Edinburgh, United Kingdom Institute of Material and Processes, School of Engineering & Electronics 17 April 2009
- [16] *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (1986) 317-330 Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam (EXPERIMENTAL ANALYSIS OF VEHICLE WAKES)
- [17] Video tratto da studi sulla resistenza di traino condotti da Giorgio Gatta
- [18] H. Ludwig, Widerstandsreduzierung bei kraftfahrzeugahnlichen korpern, Symp. On Vortex Motion, 1982.
- [19] P.W. Bearman, J.K. Harvey and G.P. Davis, Wind tunnel investigation of vehicle wakes, Int. Symp. on Vehicle Aerodynamics, organized by Volkswagen werk AG-Research Division, Wolfsburg, 1982.
- [20] M. Onorato, A. Garrone et al., Flow visualization methods for vortical flow studies, 3rd Int. Symp. on Flow Visualization, Ann Arbor, U.S.A., 1983.
- [21] M. Onorato, A. Costelli and A. Garrone, Drag measurement through wake analysis.
- [22] J.F. Hackett, J.E. Williams and J. Patrick, Jr., Wake transverses behind production, cars and their interpretation, SAE Pap. 850280, 1985.
- [23] S.R. Ahmed, G. Ramm and G. Falin, Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake, SAE Pap. 840300, 1984.

- [24] J.D. Anderson, Jr.: Fundamentals of Aerodynamics, 2nd Edition, McGraw-Hill, 1991.
- [25] PIVlab - Time-Resolved Digital Particle Image Velocimetry Tool for MATLAB developed by Dipl. Biol. William Thielicke and Prof. Dr. Eize J. Stamhuis
- [26] <http://www.datwiki.net> Downwash Angle (aerodynamics)
- [27] Westerweel, J. (1993). "Digital Particle Image Velocimetry — Theory and Application".
- [28] Raffel, M.; Willert, C.; Wereley, S.; Kompenhans, J. (2007). Particle Image Velocimetry: A Practical Guide. Springer-Verlag.
- [29] Adrian, R.J.; Westerweel, J. (2011). Particle Image Velocimetry. Cambridge University Press.

