

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale



TESI DI LAUREA

Idrodinamica Biomimetica

Relatore:

Prof. Stefania Scarsoglio

Candidato:

Ivan Domenico Barbieri

Anno accademico 2016/2017

dedicato a Francesco Saverio Campanale

Indice

Indice	III
Indice Immagini	V
1 Introduzione	1
1.1 La Biomimetica.....	1
1.2 Idrodinamica Biomimetica.....	1
1.3 Struttura della Tesi.....	2
2 Idrodinamica della Fuga	3
2.1 Manovre Rapide.....	4
2.1.1 C-start e S-start.....	4
2.1.2 Simulazioni Robotiche con Pannelli.....	7
2.1.3 Possibili Sviluppi della Ricerca.....	10
2.2 Cambiamenti di Volume.....	11
2.2.1 Descrizione Fluidodinamica della Manovra.....	12
2.2.2 Robot Inspirato al Polipo.....	14
2.3 Principi Associanti.....	17

3	La Percezione del Flusso	19
3.1	Capacità Sensitive dei Pesci.....	20
3.1.1	La Linea Laterale.....	20
3.1.2	Mappe Tridimensionali.....	22
3.1.3	Sensori MEMS e NEMS.....	24
3.2	La Percezione dei Pinnipedi.....	25
3.2.1	Le Vibrisse delle Foche.....	25
3.2.2	Sensori di Flusso Bioispirati.....	27
4	Tecnologia dei Tubercoli	29
4.1	La Megaptera Novaengliae.....	30
4.1.1	I Tubercoli.....	30
4.1.2	Le Manovre.....	32
4.2	Risultati Teorico-Numerici e Prove Sperimentali.....	33
4.2.1	Studio Idrodinamico degli Effetti dei Tubercoli con CFD.....	35
4.2.2	Prove Sperimentali a Bassi Numeri di Reynolds.....	38
4.3	Applicazioni della Tecnologia dei Tubercoli.....	41
5	Considerazioni Conclusive	43
	Ringraziamenti	46
	Bibliografia	47

Indice Immagini

Figura 2.1: differenti modelli di flusso generati durante la manovra del C-Start.....	5
Figura 2.2: due tipi di partenza di un luccio (<i>Esox lucius</i>).....	6
Figura 2.3: modello fisico del movimento impulsivo del pannello simulatore del pesce.....	8
Figura 2.4: movimento della linea media dei tre pannelli flessibili.....	9
Figura 2.5: tracce della linea media del pannello e di un <i>Lepomis</i> durante una C-start.....	9
Figura 2.6: analisi della PIV del movimento di traslazione + rotazione del pannello.....	9
Figura 2.7: struttura esterna del robot metallico progettato da Marchese.....	10
Figura 2.8: confronto tra un polipo e il <i>modello in policarbonato</i>	11
Figura 2.9: dimensioni e forma dello scheletro interno del Robot.....	14
Figura 2.10: vista ingrandita della coda del robot.....	14
Figura 2.11: successione di frame del movimento del robot.....	15
Figura 2.12: grafici dell'andamento di velocità e della massa in funzione del tempo.....	16
Figura 3.1: illustrazione schematica di un neuromasto superficiale.....	20
Figura 3.2: schematizzazione della struttura interna alla linea laterale.....	21
Figura 3.3: una scia vorticoso di von Kármán.....	23
Figura 3.4: sensori MEMS ispirato a cellule ciliate SN.....	24
Figura 3.5: confronto tra un sensore e la forma della vibrissa di una foca portuale.....	25
Figura 3.6: sequenza di istantanee di una vibrissa all'interno della scia di un cilindro.....	26
Figura 3.7: sensore a forma di vibrissa su un diaframma piezoelettrico.....	27

Figura 4.1: esemplare di <i>Megaptera novaeangliae</i>	30
Figura 4.2: confronto tra una pinna di <i>Megaptera novaeangliae</i> e il profilo NACA 63-021..	31
Figura 4.3: distanza intertubercolare in funzione della distanza di ciascun tubercolo.....	31
Figura 4.4: generatore di vortici <i>Micro Dynamics</i>	33
Figura 4.5: modelli utilizzati nell'esperimento di Johari.....	34
Figura 4.6: i vari tipi di strike montati su un aereo.....	35
Figura 4.7: vista superiore delle geometrie dell'ala rettangolare e delle ali ondulate.....	35
Figura 4.8: coefficiente di portanza e di resistenza.....	36
Figura 4.9: coefficiente di pressione per l'angolo aerodinamico di $\alpha = 20^\circ$	37
Figura 4.10: coefficiente di pressione per l'angolo aerodinamico di $\alpha = 24^\circ$	37
Figura 4.11: disegno con vista tridimensionale del profilo che schematizza i CVP.....	39
Figura 4.12: vista frontale del fenomeno di generazione dei CVP.....	39
Figura 4.13: campo medio della vorticit� ($\bar{\omega}_x$) del modello di ala A9�18.75.....	40
Figura 4.14: vista dal retro del Umpty Squash (2005).....	41
Figura 4.15: modello di aereo jet commerciale con tubercoli.....	42
Figura 4.16: esempio dell'utilizzo della tecnologia dei tubercoli nell'industria eolica.	42

Capitolo 1

Introduzione

1.1 La Biomimetica

La Biomimetica, dal Greco βίος μίμησις, (bios mimesis, imitazione della vita), è una scienza in forte sviluppo che, attraverso l'osservazione e lo studio di peculiari caratteristiche degli esseri viventi, ne trae spunto ed ispirazione al fine di migliorare le risorse tecnologiche già esistenti ed inventarne di nuove. Il termine Biomimetica fu coniato da Otto Schmitt (1913-1998), uno studioso e inventore americano.

1.2 Idrodinamica Biomimetica

In questa tesi verrà sviluppato uno studio su una branca della *biomimetica*, quella relativa all'idrodinamica. Nello specifico verranno analizzate l'idrodinamica della sopravvivenza e la struttura morfologica delle pinne di uno specifico esemplare di mammifero acquatico, la *Megaptera Novaengliae*.

I pesci durante la loro evoluzione, intesa nel senso darwiniano del termine, hanno sviluppato oltre ad una struttura corporea che gli facilita i movimenti in un fluido denso come l'acqua, anche delle tecniche e capacità di sopravvivenza a dir poco stupefacenti. Queste ultime sono molteplici e variano da manovre celeri, alla capacità di tracciare mappe tridimensionali dell'ambiente marino che li circonda.

1.3 Struttura della Tesi

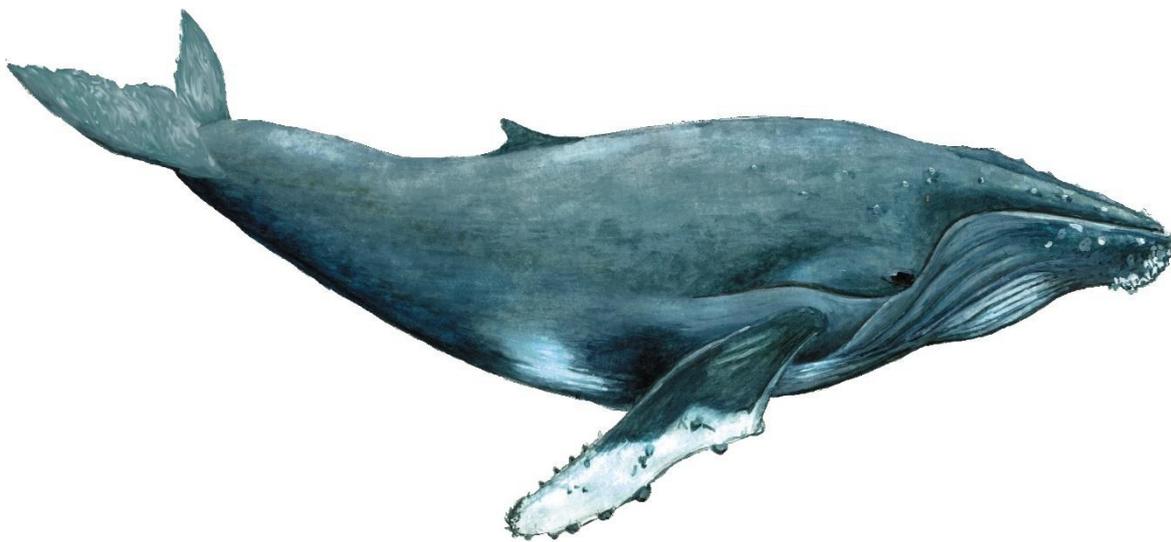
Lo scopo della tesi è quello di sviluppare uno studio di queste peculiarità per poi fare un excursus su come esse possano essere utilizzate in ambito ingegneristico per migliorare le prestazioni di veicoli o di componenti meccaniche.

Verrà inizialmente effettuato uno studio fluidodinamico riferito al momento in cui i pesci sono in procinto di effettuare uno scatto, dopo la percezione di un impulso generato dal movimento di un predatore o di una preda nei dintorni. In particolare verranno prese in analisi le C-start e le S-start, due tipi di scatti chiamate fast-start (partenze veloci), effettuate da pesci ossei (dotati di scheletro) ed i movimenti dei cefaloidi, caratterizzati da una notevole variazione del loro volume.

In secondo luogo verranno analizzate la capacità di alcuni animali acquatici di percepire le variazioni dei campi di pressione e velocità nel loro intorno e, sfruttando tale abilità, di generarne una mappa tridimensionale. In particolare verranno studiate le cellule ciliate (Hair Cells) disperse sul corpo dei pesci ed le vibrisse caratteristiche dei pinnipedi (nello specifico delle foche).

Infine verranno studiati gli effetti aerodinamici che una particolare forma di profilo alare, ispirato ad un genere di pinne caratteristico di un esemplare di *Balaenopteriidae*, la *Megaptera Novaengliae*, genera quando è in moto relativo con un fluido. La forma frastagliata delle pinne genera notevoli vantaggi, sia nella produzione di Portanza che nella riduzione di Resistenza, soprattutto nella fase riconosciuta nella polare di un profilo come fase post-stallo.

Tutti questi studi saranno accompagnati oltre che da prove sperimentali e analitico-computazionali, da esempi di applicazioni bio-ispirate, in fase di progetto o già introdotte nel mondo ingegneristico, oltre che da sporadiche opinioni personali sul loro possibile futuro impiego.



Esemplare di Megaptera Novaengliae.

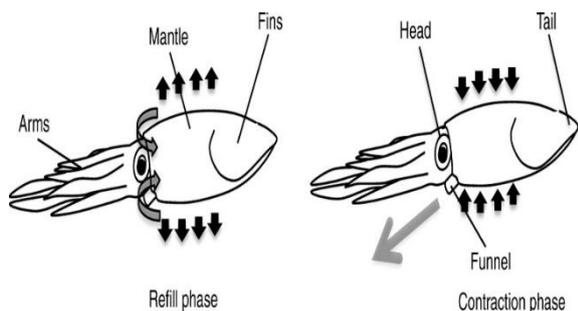
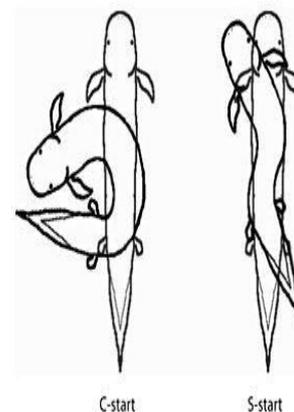
Capitolo 2

Idrodinamica della Fuga

In questo capitolo verranno analizzate quelle che sono le manovre sfruttate dai pesci quando attaccano o sono attaccati, e verranno poi studiati i principi fisici che entrano in gioco durante le loro realizzazioni.

I pesci riescono a raggiungere accelerazioni impressionanti in tempi minimi sfruttando delle tecniche che si basano su ampie flessioni del corpo, un metodo completamente diverso dalle manovre che un veicolo a carenatura rigida riesce ad attuare sott'acqua. Ci sono principalmente due classi di animali subacquei che attraverso la flessione del proprio corpo riescono ad effettuare manovre rapide: i pesci e i cefaloidi.

Per quanto riguarda la classe dei pesci, un esempio è l'affascinante partenza della *trota iridea*, studiata da [Webb \(1976\)](#). Questa si sviluppa in due fasi sequenziali: una preparatoria nella quale il pesce flette il proprio corpo in una forma simile alla lettera C (C-start) o S (S-start), ed una propulsiva nella quale l'animale si raddrizza cominciando dalla testa e finendo alla coda. Questo meccanismo è molto utile in quanto permette al pesce di sfruttare tutto il proprio corpo per spostare così la più grande massa di fluido possibile, e impartendogli quindi molta energia.



Un'altra classe di animali che subiscono grandi deformazioni durante le manovre di fuga è quella dei cefaloidi (ad esempio *polipi*, *seppie* o *calamari*), che iperflettendo il loro manto lo riempiono di fluido, per poi espellerlo tramite un orifizio e sfruttarlo quindi come propellente generando una spinta.

2.1 Manovre Rapide

Lo studio del moto dei pesci pone le proprie radici nelle pubblicazioni di [Weihs \(1973\)](#) & [Webb \(1975\)](#), e con il passare degli anni si è diffuso sempre più fino a coprire una notevole area nelle ricerche degli ultimi decenni. Quest'ampio argomento di studi si è tradotto in una letteratura notevole che tratta tutti gli aspetti del suddetto, dal controllo neuronale del moto ([Eaton 1984](#); [Korn e Faber 1996](#)), allo studio della biomeccanica dei movimenti (cito il lavoro più influente sotto questo aspetto: "*Fish Biomechanics*", [Webb e Weihs \(1983\)](#)).

Tuttavia i movimenti impulsivi, in risposta a stimoli esterni, che i pesci mettono in atto quando sono in procinto di scappare non sono ancora del tutto chiari da una prospettiva idrodinamica. Questo a causa delle numerose limitazioni e variabili che ci sono nello studio dell'argomento in questione. Un approccio possibile è quello di utilizzare modelli robotici che simulino la propulsione ed il movimento di un pesce.

2.1.1 C-start e S-start

I due tipi principali di partenze rapide (fast-start) sono le C-start e le S-start, chiamate così per la rispettiva forma che il pesce assume dopo la contrazione della muscolatura laterale. Solitamente le fast-start sono usate sia dai predatori per attaccare le prede, sia da queste per sfuggirgli.

Da un punto di vista biologico abbiamo prove scientifiche certe sulle C-start, che sono controllate dalla cellula neuronale di Mauthner, mentre non abbiamo dati certi sul controllo delle S-start.

In questa parte del paragrafo verranno analizzate le due partenze sia da un punto di vista descrittivo, che da un punto di vista fluidodinamico. Verranno cioè messi in evidenza i movimenti effettuati dal pesce che il mondo ingegneristico sta cercando di riprodurre nei veicoli marini, per poi studiarne quelli che sono i loro effetti sul fluido circostante, cioè la creazione di vortici, lo scambio di energia, i problemi dovuti alla separazione dello strato limite.

C-start

La prima trattazione che abbiamo sull'analisi delle **C-start** è quella degli studi sulla trota di [Weihs \(1973\)](#). Il biologo le chiamava inizialmente L-start e divise la manovra in 3 fasi che si susseguono. Durante lo Fase 1 il corpo dell'animale si piega sul lato assumendo una forma a C; nella Fase 2 il corpo si piega in un'onda propulsiva che genera una spinta in grado di muovere il pesce lontano dallo stimolo che ha causato la manovra; infine la Fase 3 è definita come una fase variabile, durante la quale il pesce continua a nuotare o si ferma. Così facendo l'animale accelera una quantità molto grande di acqua e, per il principio di azione e reazione, ne ricava una spinta tanto maggiore quanto è maggiore la massa accelerata.

Un'accelerazione nel fluido comporta inoltre la creazione di vorticità. Recenti studi hanno mostrato che viene generato un complesso modello fluido composto da tre anelli vorticosi ortogonali, ognuno dei quali genera un impulso. La produzione di questi tre vortici non è però univoca, ma, come mostrato in **Figura 2.1**, può avere diverse strutture a seconda della fisionomia del pesce. La **Figura 2.1A** mostra la C-start di un *Lepomis macrochirus*. Quando il pesce si curva nella forma a C (Fase 1) genera il Jet1 dalla pinna posteriore che orienta l'impulso nella direzione quasi opposta a quella del moto finale. Il Jet2 generato dalla rapida deflessione del pesce che parte dalla testa e finisce alla coda (Fase 2), è il responsabile della maggior parte dell'impulso che viene impiegato durante la manovra. Il Jet3, ortogonale sia al Jet1 che al Jet2, viene anch'esso prodotto nella Fase 2 e ha un effetto "timone" con la funzione di indirizzare la traiettoria finale. La **Figura 2.1B** mostra un modello a due vortici di un *Gasterosteidae* con un Jet3 molto debole o a volte assente a causa della rigidità del suo corpo che lo rende relativamente agli altri pesci più tozzo. La **Figura 2.1C** mostra invece la manovra impostata da un *Gambusia affinis* anch'essa caratterizzata dalla presenza dei tre vortici.

Sono stati effettuati dei calcoli di fluidodinamica computazionale, basati sui cinematismi tridimensionali da [Borazjani et al. \(2012\)](#) che riproducono esattamente questi tre getti, attraverso simulazioni basate su dati sperimentali.

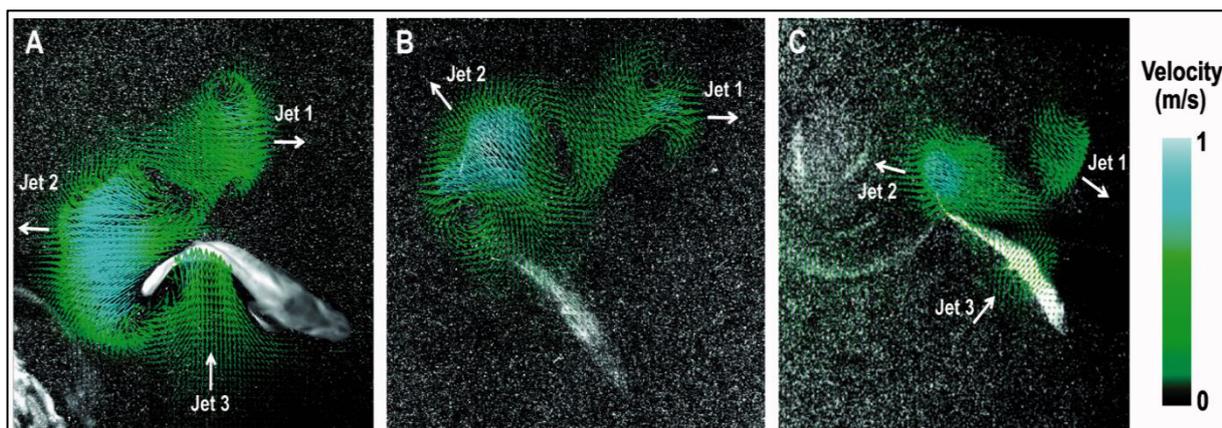


Figura 2.1: tre differenti modelli di flusso generati da tre diversi pesce effettuanti la manovra del C-Start. In (A) abbiamo un *Lepomis macrochirus*, in (B) un *Gasterosteus aculeatus*, in (C) un *Gambusia hubbsi*. Tutti i pesci generano un Jet 1 opposto e un Jet 2 più largo, ma il Jet 3 generato dal *Gasterosteus aculeatus* è talmente debole da non essere visibile.

S-start

La cinematica delle **S-start** è stata descritta da [Hoogland et al. \(1956\)](#), che nello specifico analizzarono la fase di attacco di un luccio (*Esox lucius*). Il corpo del pesce si curva a forma di S prima dello scatto, con la parte frontale meno inarcata rispetto a quella caudale. Successivamente, la coda è portata in una posizione quasi perpendicolare alla spina dorsale del pesce, ed infine il luccio si raddrizza dando così via allo scatto. Questa manovra è molto rapida e dura all'incirca 100/200 ms.

Successivamente [Webb e Skandsen \(1980\)](#), studiando sempre le movenze del luccio nella fase di attacco, distinsero due tipi di S-start (**Figura 2.2**). La prima partenza (**Figura 2.2A**) comincia con il pesce che, da avere il corpo dritto, avvia una fase iniziale caratterizzata da una prima deformazione della spina dorsale fino ad assumere una postura a S; poi si ha una fase intermedia in cui il corpo assume la forma di una S opposta e infine il pesce continua con il suo nuoto. Nella seconda partenza (**Figura 2.2B**) la fase iniziale è assente e l'accelerazione comincia con una forma ad S, senza avere una contro deformazione ad S, dopodiché l'azione si svolge nelle modalità descritte precedentemente da Hoogland.

Più in là [Harper e Blake \(1991\)](#) approfondirono gli studi sul luccio e aggiornarono la letteratura dividendo ulteriormente le S-start in quattro differenti tipi, associate al numero di mezzi-cicli periodici che la coda attua. La scelta da parte dell'animale di quale degli scatti effettuare dipende dalla sua posizione relativa e dalla distanza che c'è tra lui e la preda.

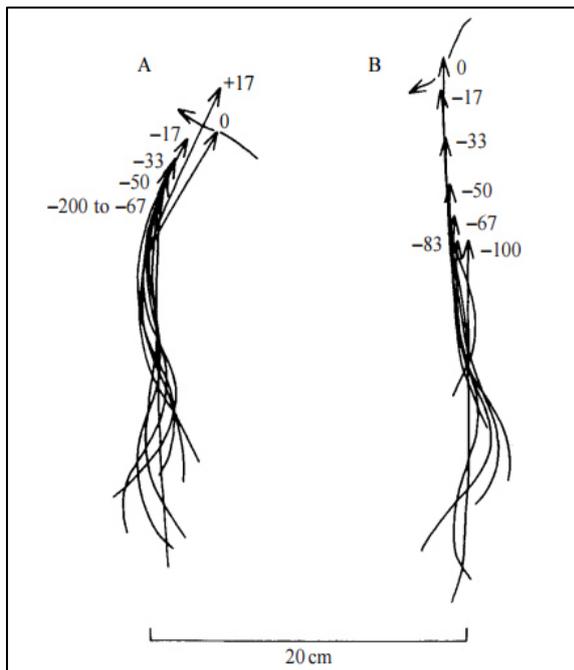


Figura 2.2: due tipi di partenza del tipo S-start di un luccio (*Esox lucius*) mostrate attraverso la variazione dell'asse del pesce (coincidente quasi con la sua spina dorsale) in funzione del tempo espresso in millisecondi, misurati al rovescio dal contatto tra la preda ed il predatore. Il capo del pesce è rappresentato dalla freccia, l'altra parte ovviamente è la coda. La prima figura (A) mostra chiaramente come il pesce assume due forme ad S opposte, la seconda (B) invece non presenta la forma opposta ma solo una prima che dà origine al moto.

2.1.2 Simulazioni Robotiche con Pannelli

Con riferimento alla pubblicazione “*Hydrodynamics of C-Start Escape Responses of Fish as Studied with Simple Physical Models*” di W. Witt, L. Wen e G. Lauder (2015) verranno analizzate delle esperienze sperimentali che utilizzando dei pannelli flessibili, comandati tramite controlli robotici, hanno portato grandi passi avanti per quanto riguarda lo studio fluidodinamico del moto dei pesci in acqua.

I pannelli utilizzati sono in plastica lunghi 12 cm e alti 5 cm. Questi sono attaccati all’asta di controllo ad 1/3 della sua lunghezza (**Figura 2.3A**). Sono state effettuate prove con tre rigidità flessionali differenti: minima ($EI = 0.02 \text{ mN}\cdot\text{m}^2$), media ($EI = 0.31 \text{ mN}\cdot\text{m}^2$) e massima ($EI = 2.76 \text{ mN}\cdot\text{m}^2$).

L’apparato è situato in un serbatoio pieno d’acqua ed è composto da un albero di 8 mm di diametro collegato ad un motore che gli consente di effettuare movimenti traslatori e rotatori. Degli encoder (codificatori) mandano risposte al programma principale di Labview per quantificare i movimenti effettuati dall’albero, che a sua volta è collegato ad un sensore ATI 6-axis per raccogliere dati sulla forza e sul momento torcente, inviati poi ad un secondo programma di Labview. Tutti i dati sono campionati a 1000 Hz. Una camera Photron PCI-1024 raccoglie immagini a 1000 frame al secondo. I pannelli flessibili ed i fogli rigidi sono ricoperto da diverse membrane di pesci e sono collegate al controllo meccanico per studiarne le proprietà nei movimenti. Gli esperimenti sono stati condotti in acqua calma.

Le rotazioni lungo l’asse di beccheggio (Pitch) sono di 60 gradi ogni 100 ms, mentre i movimenti di sollevamenti (Heave) sono essenzialmente due, il primo di 1,5 cm in una direzione (simula la Fase 1 delle C-start) e poi di 8 cm nella direzione opposta (Fase 2 e 3). Questi valori sono stati scelti dopo differenti simulazioni e sono quelli che più rispecchiano più fedelmente i movimenti degli animali marini (**Figura 2.3B**).

Per studiare i diversi effetti dei vari movimenti sono state effettuate prove dapprima soltanto con la rotazione lungo l’asse di beccheggio (**Figura 2.3D**), poi solo con i movimenti traslatori (**Figura 2.3E**) ed infine con entrambi i movimenti traslatori (**Figura 2.3E**) ed infine con entrambi i movimenti simultanei (**Figura 2.3F**).

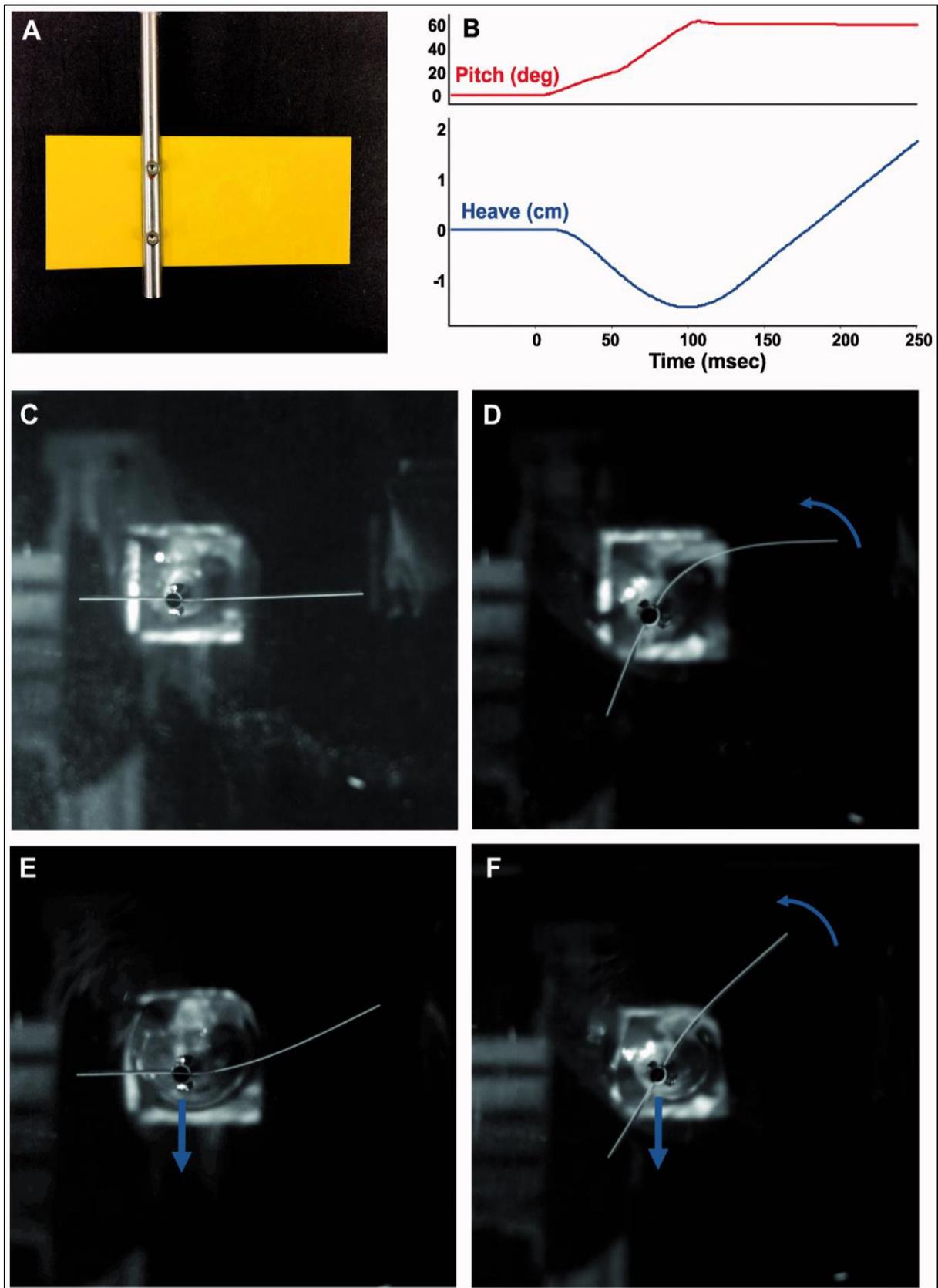


Figura 2.3: fotografie del modello fisico del movimento impulsivo del pesce simulato con un pannello flessibile. La figura (A) mostra il pannello collegato all'asta spostata da un robot in rotazione (Pitch) e traslazione (Heave). La figura (B) mostra il programma di moto utilizzato. La figura (C) mostra la posizione iniziale del pannello. La figura (D) mostra il movimento per il programma di sola rotazione (Pitch). La figura (E) mostra il programma di sola traslazione. Infine la figura (F) mostra il movimento di rotazione + traslazione. Tutte le immagini mostrate sono dalla lamina più rigida.

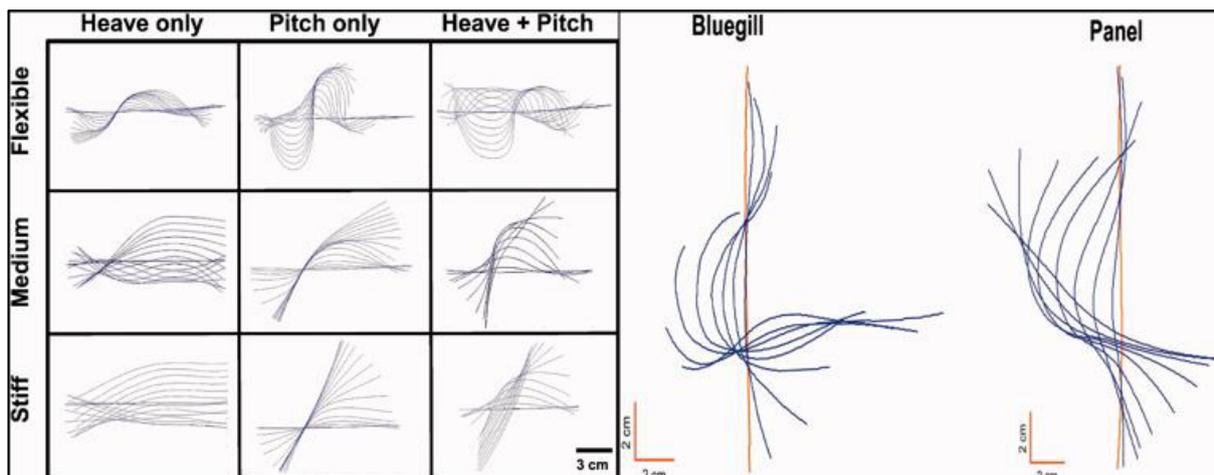


Figura 2.4: le curve mostrano il movimento della linea media dei tre pannelli flessibili sotto ciascuno dei tre programmi di movimento.

Figura 2.5: confronto tra le tracce della linea media del pannello a media flessibilità (a destra) e la flessione di un *Lepomis* durante una C-start (a sinistra).

I movimenti della linea media riscontrati durante gli esperimenti sono collocati in una Matrice 3x3 (**Figura 2.4**) che mostra tutti i 9 casi studiati.

I risultati che si avvicinano di più ai movimenti di una C-start sono quelli del pannello di media rigidezza durante il movimento di pitch + heave, essendo infatti il pannello con rigidezza massima troppo statico e considerando che quello con rigidezza minima subisce curvature troppo alte. Nella **Figura 2.5** il confronto tra i movimenti della linea media del pannello e quella di un *Lepomis macrochirus* durante una C-start mette in chiaro questa somiglianza.

A questo punto sfruttando la Particle Image Velocimetry (PIV) si è riuscito a fornire il campo di moto del fluido. Non è sorprendente notare che il pannello con movimenti simili a quelli del pesce abbia anche un campo idrodinamico con notevoli somiglianze, simulando anche la formazione degli stessi vortici e impulsi (Jet1, Jet2 e Jet3) riscontrati nello studio delle C-start (**Figura 2.6**).

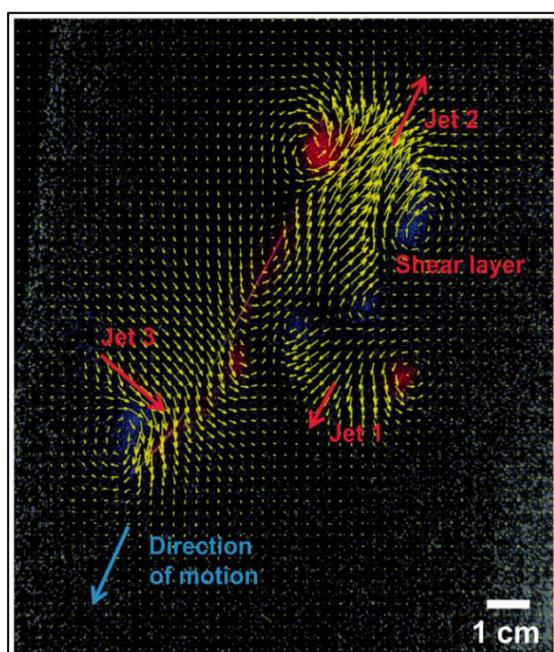


Figura 2.6: analisi della Particle Image Velocimetry (PIV, Immagini della Velocimetria delle Particelle) del movimento di traslazione + rotazione del pannello di media flessibilità. Le immagini mostrano il campo di flusso alla fine del programma di movimento. Le frecce gialle sono vettori di velocità; il colore di sfondo indica la vorticità in senso orario (blu) e la rotazione in senso antiorario (rosso). Questo campo assomiglia molto alla risposta di fuga dei pesci. I tre getti di moto a forma di pesce sono evidenti.

2.1.3 Possibili Sviluppi della Ricerca

I pannelli sono solo un'esemplificazione del nuoto del pesce utilizzata per uno studio fluidodinamico della situazione.

Ci sono stati anche altri esperimenti aventi tale obiettivo, come quello di [Conte et al. \(2010\)](#) che progettaronò un modello simile ad un pesce con un corpo metallico ricoperto da gomma uretanica. Questo veniva piegato fino a formare una C, per poi essere lasciato partire raddrizzandolo. Il team osservò alte accelerazioni e grandi spinte. Lo svantaggio era che non si poteva sfruttare il modello per riprodurre movimenti più complessi.

Nel 2014 [Marchese et al.](#) costruirono un pesce robotico autonomo (**Figura 2.7**) che riproduceva movimenti simili ai pesci movimentato da un cilindro pneumatico posto al suo interno. Questo modello riusciva a simulare una c-start ma impiegava più tempo di un esemplare reale.

Nel futuro potrebbero essere progettati modelli più complessi prendendo spunto da questi, capaci di manipolare sia la tempistica che i movimenti della propria carenatura con lo scopo di chiarire e approfondire l'aspetto fluidodinamico dei movimenti ittici cosicché un giorno sia possibile il controllo della produzione di forze idrodinamiche anche su mezzi ingegneristici marini come barche o sottomarini, ma anche aeronautici come dirigibili.

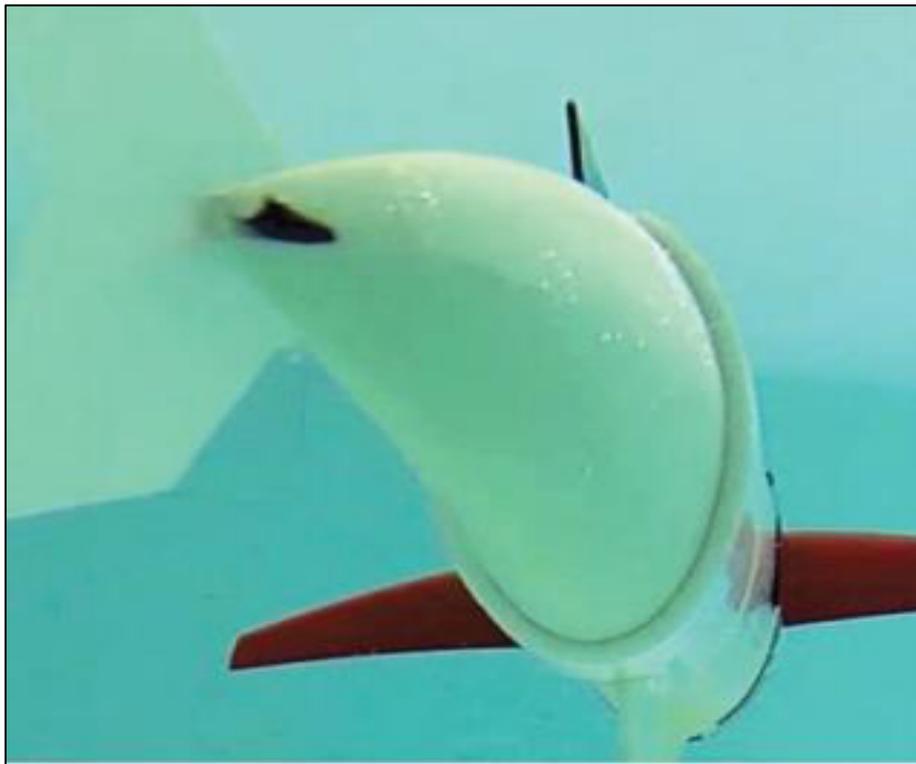


Figura 2.7: struttura esterna del robot metallico progettato da Marchese et al. autonomo. Questa costruzione meccatronica riesce a simulare il nuoto dei pesci e le loro fast-start grazie ad un motorino elettrico collocato al suo interno. L'unica pecca del modello è il ritardo nel compiere le manovre rispetto ad un pesce reale.

2.2 Cambiamenti di Volume

Anche i cefaloidi, come i polipi, le seppie o i calamari, subiscono grandi variazioni di volume durante le manovre di fuga, sfruttando però un meccanismo completamente diverso da quello utilizzato dai pesci. Questa specie di animali iper-flettono la cavità del proprio mantello riempiendola d'acqua, che poi espellono rapidamente sotto forma di getto propulsivo (Packard 1969, Wells 1990, Huffard 2006), ottenendo così grandi accelerazioni.

Anche in questo caso all'animale conviene muovere una grande quantità d'acqua. Infatti bensì la quantità di moto prodotta dalla manovra salga linearmente sia con la massa che con la velocità, l'energia spesa sale linearmente con la massa ma quadraticamente con la velocità. Questo vuol dire che conviene accelerare grandi masse d'acqua a velocità basse. Quindi il cefaloide prima di effettuare la manovra dovrà gonfiarsi il più possibile, aumentando la sua dimensione laterale, e diventando di conseguenza un corpo tozzo. Questo potrebbe portare svantaggi nel moto, come una resistenza maggiore a causa della separazione prematura del flusso. Tuttavia lo sgonfiamento rapido del mantello altera completamente la dinamica del liquido circostante riuscendo a controllare il flusso instabile con l'eliminazione della separazione (dello strato limite) e con un meccanismo di recupero di energia.

L'importanza del cambiamento di forma è racchiusa nell'energia cinematica associata alla massa aggiunta del corpo. Se questa fosse fissa si opporrebbe all'accelerazione, mentre un corpo che si restringe ha una massa aggiunta che diminuisce conferendo energia al corpo. Citando Spagnolie & Schelley (2009): "*While a reduced virtual mass gives a reduced acceleration reaction, a reducing virtual mass can generate a boost in velocity*" ("Mentre una massa virtuale ridotta da un'accelerazione ridotta, una massa virtuale che si riduce può generare una spinta nella velocità."), questo è possibile notarlo anche nell'osservazione di una medusa che persino nella fase di "riposo" dalla propulsione ha una spinta nella velocità dovuta al recupero di energia (Gemmell, Costello, Colin, Stewart, Dabiri, Tafti & Priya 2013). In pratica, mentre per un corpo rigido la massa aggiunta è un costo da pagare per avere la propulsione, per un corpo che si sgonfia essa viene trasformata in propellente addizionale. È su questo principio fondamentale che si basa il moto dei cefaloidi.

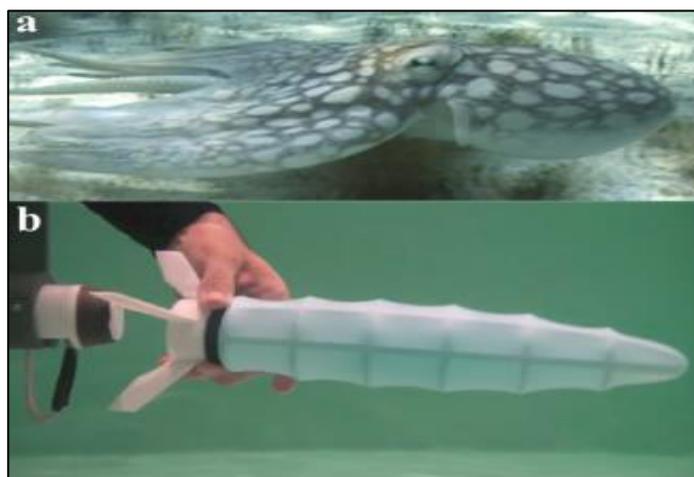


Figura 2.8: confronto tra un polipo (A) e il modello in policarbonato stampato 3D coperto da una membrana elastica in gomma bio-inspirato.

In questo paragrafo verrà descritto questo tipo di movimento prima da un punto di vista fisico/analitico, citando quelli che sono i fenomeni meccanici e fluidodinamici che caratterizzano la manovra, e poi dal punto di vista sperimentale facendo riferimento ad un esperimento di G.D. Weymouth, V. Subramaniam & M.S. Triantafyllou (2014) che hanno usato un robot bio-inspirato al polipo (**Figura 2.8**) per calcolarne le grandezze che si generano durante la manovra.

2.2.1 Descrizione Fluidodinamica della Manovra

Per avere maggiori informazioni sui meccanismi fisici che permettono la riduzione della separazione e il recupero di energia sono stati effettuati degli studi su un modello semplificato di una sfera che trasla in un fluido e diminuisce gradualmente il proprio volume. I fattori chiave sono: la forte componente normale della velocità rispetto al corpo e il gradiente di pressione generato dallo sgonfiamento rapido.

Il potenziale della sfera in coordinate sferiche (r, θ, Ψ) è:

$$\phi = -U \left(r + \frac{R^3}{2r^2} \right) \cos \theta - \frac{WR^2}{2r}$$

dove R è il raggio istantaneo della sfera, $W/2 = \dot{R}$ è il tasso di variazione del raggio. Facendo il gradiente del potenziale con $r = R$ abbiamo le velocità sulla superficie della sfera:

$$u_r = \frac{\partial \phi}{\partial r} = U \cos \theta + \frac{W}{2}$$

$$u_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} = \frac{1}{2} U \sin \theta$$

la componente radiale soddisfa la condizione sulla velocità normale.

Dall'equazione di Bernoulli ricaviamo la pressione sulla superficie della sfera

$$p = \frac{9}{16} \rho U^2 \cos(2\theta) + \frac{3}{2} \rho \left(\frac{UW}{2} + Ra \right) \cos \theta$$

dove $a = \dot{U}$ e sono stati eliminati i termini uniformi sulla superficie e che non contribuiscono al gradiente di pressione tangenziale o alla forza netta ($W^2, \dot{W}R$). Il primo termine rappresenta la pressione dovuta alla velocità del corpo. Il secondo invece è il termine dovuto alla variazione del volume del corpo.

Valori molto negativi di W causano una bassa pressione sulla faccia frontale del corpo e un'alta pressione dietro.

L'effetto di tale differenza di pressione è una spinta in avanti completamente separata da qualsiasi riduzione della resistenza causata dalla riduzione di superficie. Questa forza di spinta trasferisce l'energia cinetica del fluido ($T = \frac{1}{2} m_a U^2$) sul corpo mentre la massa aggiunta m_a diminuisce con la grandezza R . Questa forza vale:

$$F = - \frac{d}{dt} (m_a U) = -\dot{m}_a U - m_a a$$

dove \dot{m}_a dipende linearmente dal tasso W . Quindi l'equazione mostra che quando il corpo è tozzo e si muove lentamente, la forza è negativa come l'energia trasferita al fluido. Dopodiché questa **energia viene recuperata** dal corpo che si sta sgonfiando quando esso comincerà a muoversi velocemente.

Il recupero di energia è ideale in fluidi irrotazionali, ma in fluidi viscosi la massa aggiunta induce una dipendenza della spinta dalla **riduzione di separazione**, un meccanismo che evita la perdita di energia con la generazione di strutture vorticose che diffondono nella scia. Dalle simulazioni numeriche su un cilindro circolare che si sgonfia [Weymouth & Triantafyllou \(2012\)](#) dimostrarono che si forma un velo di vortici di segno opposto sulla superficie del corpo iniziando dal di dietro e muovendosi fino a 90° di quest'ultimo. Allo stesso tempo la velocità normale avvezza la vorticità che si è formata nello strato limite attraverso la superficie del corpo, mettendola in contatto con il nuovo strato di vorticità di segno opposto, portando così ad un annullamento parziale della struttura instabile.

Questo meccanismo di controllo della vorticità dipende da W e supera il tasso di diffusione e separazione dello strato limite. Per capire che ruolo gioca il cambiamento di volume in questo fenomeno [Wermouth et al. \(2015\)](#) fecero un confronto tra un corpo deformabile che si riduce e l'applicazione di un'aspirazione su uno strato limite di un corpo rigido. Entrambi i processi portano la generazione di velocità normale alla superficie, sebbene il corpo che si sgonfia induce un flusso attraverso la sua superficie. L'autore introduce un parametro di sgonfiaggio

$$\sigma^* = \frac{\dot{V}}{AU} \sqrt{Re}$$

dove \dot{V} è il tasso di cambiamento del volume del corpo, il Reynolds è definito $Re = UL/\nu$, e $A = \pi D^2/4$ è l'area frontale. Per una sfera un valore stimato di σ^* seguendo il metodo di [Preston \(1948\)](#) è maggiore di $2,41\pi$. Quindi si osserva che il tasso di sgonfiamento richiesto decresce con il numero di Reynolds, come è stato dimostrato da simulazioni ed esperimenti.

2.2.2 Robot Ispirato al Polipo

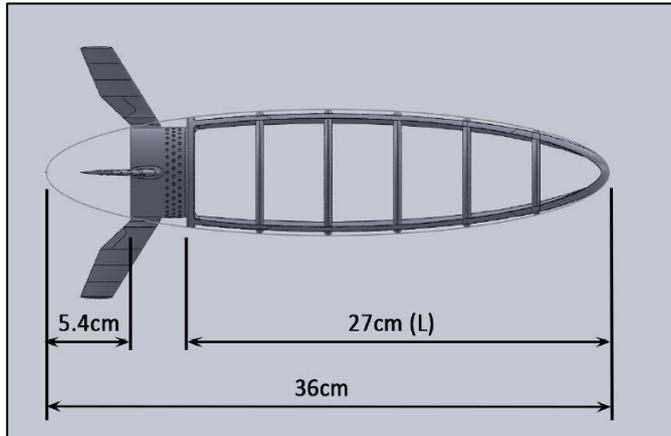


Figura 2.9: dimensioni e forma dello scheletro interno del Robot, stampato in 3D con polycarbonato. La lunghezza della sezione coperta dalla membrana è $L = 27$ cm e sullo sfondo è disegnata un'ellisse 5: 1 come riferimento.

attrito quando la membrana è sgonfia. La lunghezza della sezione coperta dalla membrana è di $L = 27$ cm per assecondare la lunghezza dei palloni in gomma sintetica in commercio. Il volume del robot quando è completamente pieno è di 1030 cm³, quindi la massa aggiunta accelerata durante la manovra è pari a $m_a = 1.03$ kg. La coda (**Figura 2.10**) è attrezzata con un ugello convesso e dotata di 4 pinne timoni con sezione NACA 0012 (**Figura 2.10b**) per mantenere la stabilità direzionale (attuata dai bracci del polipo). L'apertura è di circa $A_j = 15$ cm² scelta come compromesso tra un'area abbastanza grande da permettere l'aumentare del flusso e il bisogno di avere un'area abbastanza piccola da esser ricoperta e direzionata completamente da 4 pinne.

Il modello non necessita di parti mobili o accumulatori di energia per effettuare i test delle partenze veloci. In questi test il robot è riempito di acqua pressurizzata attraverso un bocchettone dedicato dotato di valvola di non ritorno. Viene a questo punto misurata la pressione dell'acqua all'interno del modello con sensori appositi. Il diametro che viene raggiunto è di $0.6 L$, mentre la differenza di pressione misurata tra l'interno e l'esterno della membrana posizionata in acqua è pari a 4.45 kPa; in queste condizioni la superficie esteriore della membrana è pari a 0.1 m². La deformazione che si raggiunge è quindi di $\epsilon = 0.94$, le dimensioni si raddoppiano.

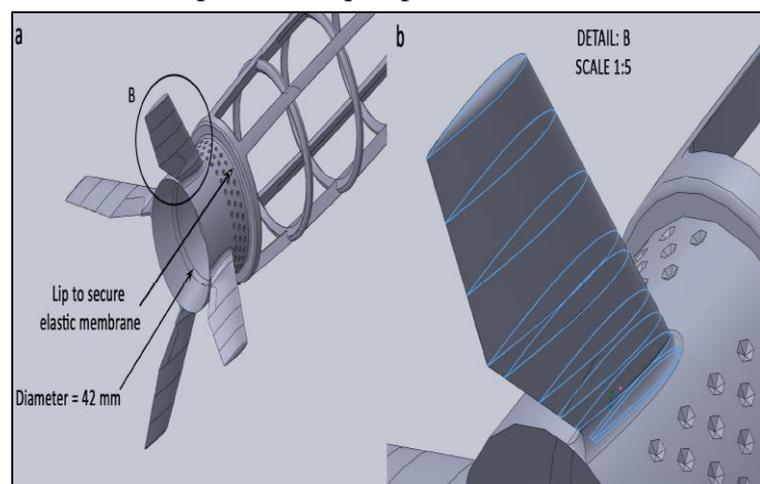


Figura 2.10: (a) vista ingrandita della coda del robot mostrando l'apertura e le dimensioni e la forma dell'ugello. La membrana è tensionata e bloccata sui fori del cerchio indicato. (b) Le sezioni trasversali NACA 0012 vengono utilizzate per rendere il movimento del robot nell'acqua stabile.

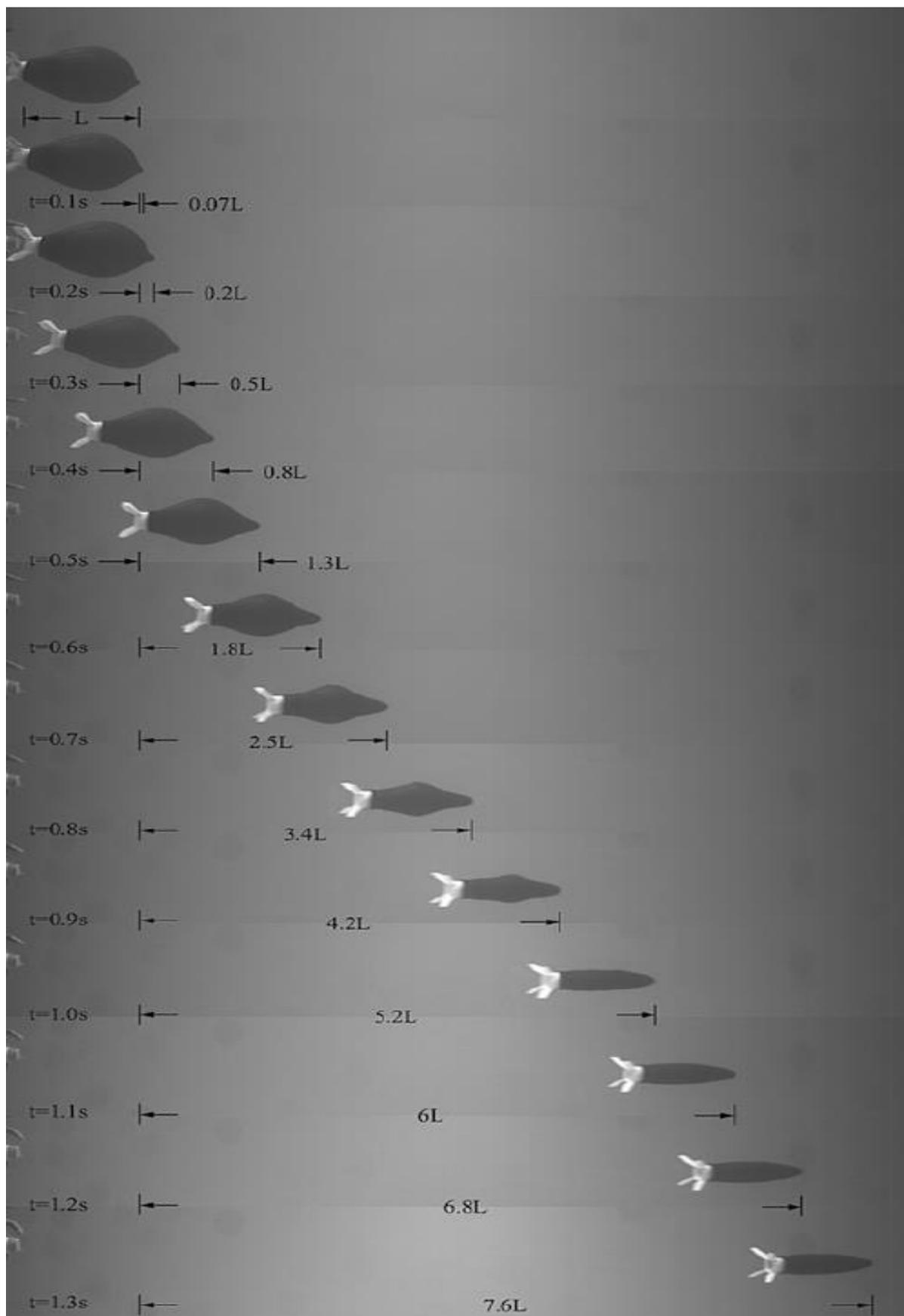


Figura 2.11: La successione di frame del movimento del robot ispirato alla polipo. L'intervallo di tempo tra le diverse immagini è di 0,1 secondi.

Il robot viene quindi rilasciato dal bocchettone che lo ha precedentemente riempito ed è libero di accelerare in acqua. L'intera scena è ripresa da videocamera a 150 frame al secondo. Queste immagini raccolte vengono analizzate dopo aver isolato il robot dallo sfondo (**Figura 2.11**). Le misure mostrate in figura sono presentate in scala alla lunghezza del modello.

Dalla figura che mostra i risultati vengono confermati i dati derivanti dalla fluidodinamica e dalle simulazioni. Il robot si muove inizialmente lentamente fino a circa 0.5 s , dopodiché si ha un chiaro aumento della velocità. La forma affusolata finale permette al robot di mantenere la velocità anche senza avere del propellente residuo.

Come mostrato nel grafico presente in **Figura 12a** la velocità raggiunge un massimo di 10 L/s (circa 2.7 m/s) a 0.95 s dopodiché comincia a diminuire lentamente. L'accelerazione rimane quasi costante durante la fase propulsiva, con un massimo di 14 L/s^2 (3.8 m/s^2). Al picco della velocità abbiamo un Reynolds pari a $Re = 729'000$, molto più alto delle aspettative, che dovrebbe essere simile a quello cui è soggetto l'animale durante la manovra ([Daniel 1984](#)). Il grafico in **Figura 12b** mostra come varia il peso durante la manovra. Dai 3.65 kg iniziali scende fino a raggiungere quello del solo scheletro. Alla fine dello sgonfiamento la membrana non è ancora rigida e in contatto con lo scheletro fa avvenire quello che è chiamato l'effetto "starved horse", cioè la massa scende al di sotto di quella del robot completamente sgonfio per poi esser colmata nuovamente. Il tasso di perdita della massa si aggira attorno a 3 kg/s per l'intera durata della manovra.

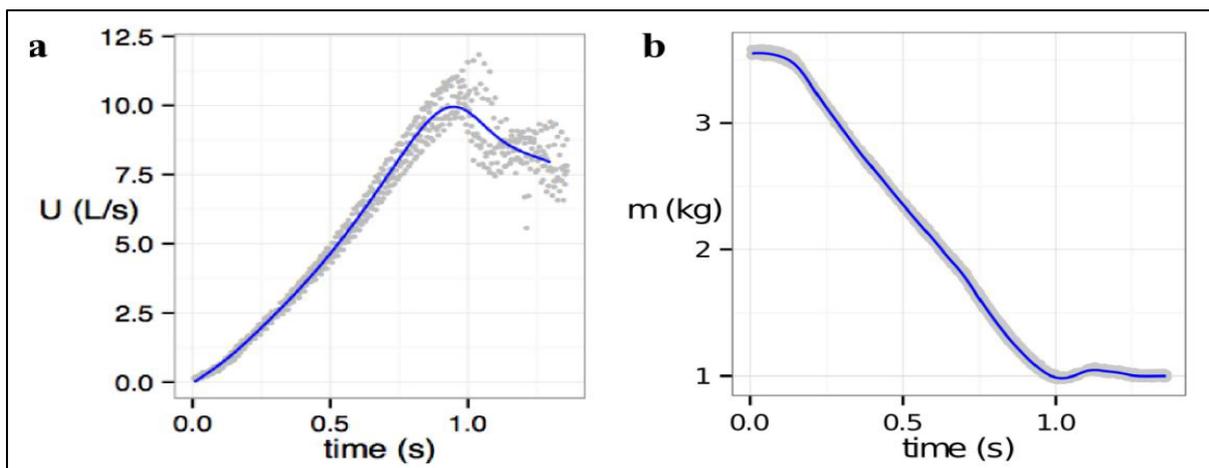


Figura 2.12: dai dati ricavati dalla videocamera ad alta velocità, attraverso calcoli e algoritmi, si sono riusciti a tracciare i grafici dell'andamento (a) della velocità di avanzamento (relativa [L/s]) e (b) della massa [kg] in funzione del tempo.

2.3 Principi Associanti

Pur sfruttando due movimenti completamente diversi, i pesci che scappano con le fast-start (C-start o le S-start) e i cefaloidi che si muovono velocemente attraverso il rapido sgonfiaggio del proprio mantello sfruttano in realtà gli stessi principi fisici di base.

Infatti come i pesci che impiegano ampie curvature del proprio scheletro per impartire al fluido la più alta energia cinetica possibile, dapprima trattenuta e poi rilasciata negli anelli vorticosi che hanno vita durante la manovra, così i cefaloidi con i loro corpi inizialmente tozzi che si sgonfiano conferiscono al fluido la più alta energia cinetica possibile, recuperata poi durante la manovra producendo la spinta necessaria.

Il fine di entrambe le performance è quello di muovere la massa d'acqua necessaria per muoversi, a velocità non troppo alte, trovando un giusto compromesso tra la creazione di un impulso abbastanza alto per scappare dal luogo in cui è stato rilevato il pericolo, e l'utilizzo della più bassa energia possibile, riuscendo così a continuare il nuoto senza aver bisogno di tempo di recupero (il lavoro necessario è minore).

Entrambe le manovre inoltre sono condizionate dal limite di evitare separazione di flussi incontrollabili. Nel caso delle partenze veloci dei pesci il movimento altamente coreografico permette loro di non creare larghi angoli di incidenza con il fluido. Nel caso dei cefaloidi abbiamo discusso come la vorticità e la separazione dello strato limite vengano smussati da processi fluidodinamici molto intricati, che permettono il controllo della turbolenza e della scia.

Capitolo 3

La Percezione del Flusso

Per la sopravvivenza dei pesci e degli animali marini in generale è fondamentale una tempestiva e accurata percezione dell'ambiente che li circonda, nel caso in cui questo serva sia per mettersi al riparo dai predatori, sia per cercare prede nelle vicinanze. Ad esempio una partenza di tipo C (C-start) può generare nel fluido un forte segnale di onde meccaniche che permane a lungo (Niesterek & Hanke 2012), ed il pesce che ne è la causa può essere rintracciato attraverso tali perturbazioni anche dopo un intervallo di tempo non trascurabile dalla loro generazione.

Oltre ai comuni sensi dell'olfatto, della vista e dell'udito, che non vengono messi da parte, molti animali acquatici possiedono la straordinaria capacità di percepire le prede o i predatori nelle vicinanze e di generare grazie a questo "senso" aggiunto una vera e propria mappa tridimensionale dei dintorni. Questo è reso possibile grazie alla percezione dei campi di velocità e di pressione circostanti attraverso una molteplicità di cellule sensoriali distribuite su tutto il corpo.

In questo capitolo, attraverso l'analisi della letteratura relativa a questo argomento, verranno analizzate e assemblate le informazioni più importanti che concernono tale capacità prettamente ittica, approfondendo sia la sezione relativa alla fisiologia delle cellule sensoriali (struttura, allocazione, dimensioni) sia quella relativa al loro utilizzo.

Inoltre verrà valutata la praticabilità e le limitazioni di tale funzione in un'ottica biomimetica. Verranno presentati dei sensori, disponibili anche nel mondo del commercio, che sono già in uso, ed il cui funzionamento riprende proprio queste capacità degli animali acquatici.

Verranno studiati due tipi di percezione. Una prima tipica dei pesci che viene attuata attraverso l'uso di particolari cellule ciliate sparse sul loro corpo; una seconda tipica di animali pinnipedi che viene attuata attraverso l'utilizzo di baffi situati sul loro muso, chiamati *vibrisse*. Queste riescono a percepire i movimenti e le perturbazioni del flusso. Ognuno di questi metodi ha ispirato diversi tipi di sensori che sono stati subito integrati nelle attività umane come la pesca o la rilevazione subacquea.

3.1 Capacità Sensitive dei Pesci

I pesci per localizzare prede o predatori sottacqua utilizzano il sistema della linea laterale, così chiamato perché la sua parte più visibile si estende lungo la zona laterale dell'animale. Questa capacità è molto utilizzata dall'*Astyanax mexicanus fasciatus*, un pesce che vive nelle profondità marine il quale non possiede il senso della vista. Questo pesce, lungo in media 10 cm, vive nelle caverne e ha gli occhi atrofizzati ma è capace di formare una mappa tridimensionale dei dintorni grazie alla percezione delle variazioni nella velocità e nella pressione del fluido che lo circonda (von Campenhausen et al. 1981, Montgomery et al. 2001).

3.1.1 La Linea Laterale

Le unità sensitive della linea laterale si chiamano neuromasti. Questi ricettori sono delle cellule ciliate contenute in una cupola gelatinosa. Le cellule ciliate sono di due tipi: kinocilia lunghe e mobili e stereociglia più corte in altezza e non mobili. Ci sono due tipi di neuromasti: i neuromasti superficiali (SN - Superficial Neuromast) presenti sulla superficie esposta al flusso e i canali di neuromasti (CN - Canal Neuromast) che sono contenuti e si estendono nella linea laterale (Abdel-Latif et al. 1990, Montgomery et al. 1997, Montgomery et al. 2001, Coombs et al. 2014, Webb 2014a).

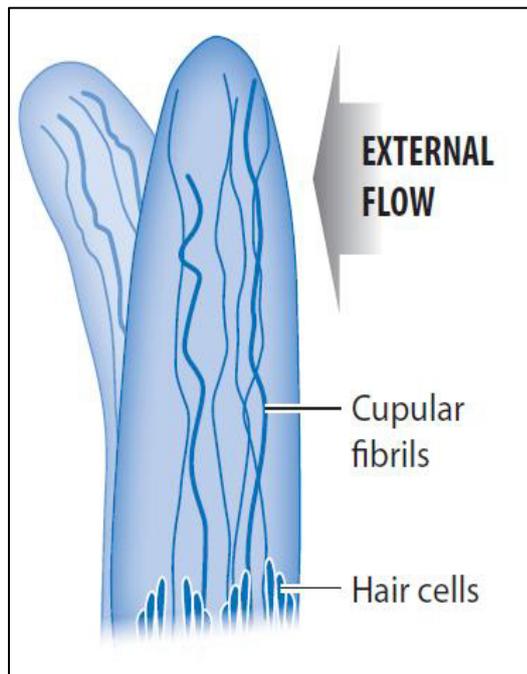


Figura 3.1: illustrazione schematica di un neuromasto superficiale e della sua cupola soggetti ad un flusso esterno.

I neuromasti SN e CN differiscono l'uno dall'altro prima di tutto per la forma della cupola, nel caso dei CN semisferica con un diametro di qualche centinaio di millimetri, mentre per le SN ovale con altezza di $50\div 400\ \mu\text{m}$ e larghezza di $10\div 60\ \mu\text{m}$. Inoltre tipicamente le SN contengono circa 10 cellule ciliari mentre le CN ne possono contenere da un centinaio anche a qualche migliaia. La cupola delle CN scorre sul suo epitelio come farebbe un corpo rigido, al contrario della cupola delle SN che si piega letteralmente al flusso. Entrambi questi tipi di cellule contengono due gruppi di cellule ciliari orientate in maniera opposta e mescolate tra loro.

Per quanto riguarda le capacità, le SN (**Figura 3.1**) sono molto sensibili e riescono a percepire anche il flusso generato dai plancton. Infatti per generare una risposta sensoriale è sufficiente uno spostamento di $1\ \text{nm}$ ad una frequenza approssimativamente di $100\ \text{Hz}$ (van Netten 2006).

Come già detto, le CN (**Figura 3.2**) giacciono in canali subdermali esposti al flusso attraverso pori di una superficie formata da una struttura rigida (come le ossa). Un neuromasto si attiva quando tra due pori successivi si instaura una differenza di pressione, infatti i CN agiscono effettivamente come filtri passa banda dei gradienti di pressione, adattando la percezione alla frequenza giusta. Questi tipi di neuromasti sono infatti addensati dove i gradienti di pressione durante il moto sono più consistenti ([Webb 2014](#)).

Solitamente il sistema della linea laterale è formato da un canale tronco e uno cefalico. Il canale tronco si ramifica in una o più linee che percorrono lateralmente il corpo del pesce dall'alto verso il basso; il canale cefalico invece è più complesso e forma un disegno tridimensionale attorno alla testa del pesce.

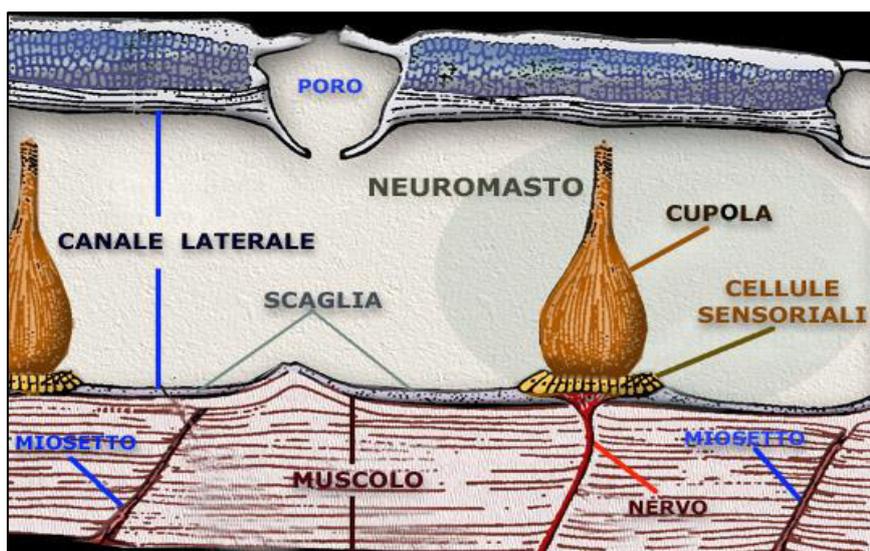


Figura 3.2: schematizzazione della struttura interna della linea laterale. Come si può vedere i CN sono posizionati al di sotto della pelle e sono esposti al flusso solo attraverso dei pori presenti tra un neuromasto e l'altro.

3.1.2 Mappe Tridimensionali

La linea laterale, assieme ai sensori superficiali, permette ai pesci di effettuare complesse percezioni del flusso. Questi animali riescono a generare una mappa tridimensionale del fluido che li circonda attraverso la misura dei campi di pressione e velocità di quest'ultimo. [Montgomery et al. \(2001\)](#) determinarono che, mentre le SN percepiscono il modello del flusso sulla superficie del corpo, i CN hanno il compito di attivare un'immagine idrodinamica, creando così una mappa cognitiva tridimensionale delle vicinanze dell'animale. In questo processo è sfruttato un moto continuo attorno agli ostacoli da percepire, in modo da generare forti gradienti di pressione in grado di attivare le cellule sensoriali.

È stato dimostrato, nel caso di *fluido bidimensionale inviscido*, che un corpo, muovendosi lungo traiettorie chiuse attorno ad ostacoli, riesce a creare un'immagine dell'ostacolo attraverso la misurazione, in diverse frazioni di tempo, delle onde di pressione generate dal moto stesso. Questo è possibile a patto che il corpo e l'ostacolo siano abbastanza vicini.

A tal proposito [Bouffanais et al. \(2010\)](#) condussero degli esperimenti. Essi usarono un filtro di Kalman per misurare i segnali di pressione rumorosi generati dal moto attorno ad un oggetto immerso in acqua. L'esperimento fu ripetuto con lo scopo di determinare dapprima la distanza, poi le dimensioni ed infine la forma dell'ostacolo. I risultati furono che, per un oggetto con lunghezza caratteristica D , la distanza alla quale si trova un ostacolo è percepita fino a $6D$, la posizione fino a $3D$ mentre, nel caso in cui il pesce volesse percepire anche la forma, esso dovrà nuotare nelle immediate vicinanze. Tali informazioni decadono, considerando una distanza tra il sensore e l'oggetto pari a d , come $1/d^2$ nel caso della grandezza e dell'orientamento, e come $1/d^3$ per quanto riguarda la posizione.

Nel caso di *fluidi viscosi* può avvenire la separazione dello strato limite e pertanto i metodi utilizzati per il flusso potenziale risulterebbero futili. Anche per il caso in questione sono state condotte diverse esperienze per comprendere le reazioni dei pesci di fronte alle situazioni di questo tipo. Una prima prova fu effettuata trascinando a diverse velocità un oggetto rettangolare su un'orbita circolare nelle vicinanze di un pesce gatto ([H.M. Muller et al, 1996](#)) e di un pesce rosso ([Mogdans & Bieckmann 1998](#)). La conclusione più importante fu che, come prevedibile, le risposte suscitate aumentano proporzionalmente alla velocità di trascinamento dell'oggetto.

Un altro esperimento che trovo interessante citare è quello svolto da [Plachta et al. \(2003\)](#). Questo consiste nel muovere una sfera di 8 mm di diametro nelle vicinanze di un pesce rosso misurando l'attivazione delle neurocellule dell'animale. I risultati hanno mostrato tre diverse modalità di risposta: innanzitutto alcune unità delle linee laterali (probabilmente le SN) rispondono maggiormente quando la velocità dell'acqua sul corpo del pesce aumenta a causa del movimento della sfera; in secondo luogo, altre unità hanno risposto solamente quando la sfera ha superato una certa posizione sulla testa o sul corpo del pesce (probabilmente le CN); infine sono state individuate delle unità che hanno risposto solo dopo che la sfera avesse sorpassato completamente il pesce.

Da svariati esperimenti e prove sono state raccolte altre osservazioni essenziali sulla ricezione dei dati e sulla capacità di mappazione dei pesci. Questi animali ricevono oltre ai molti stimoli dall'esterno, anche tanti disturbi causati dai loro stessi movimenti. Per questo la percezione richiede due correzioni: innanzitutto il pesce deve disattivare i neuroni in assenza di stimoli esterni, ed inoltre esso deve essere in grado di memorizzare i modelli di rumore autoprodotti così da sottrarli all'input sensoriale totale.

Un'altra caratteristica fondamentale nella percezione del flusso da parte pesci è quella di individuare le strutture vorticose. I pesci nuotando generano forti vortici e formano strutture vorticose dovute alle propulsioni e alle manovre. Pertanto seguire altri pesci significa seguire un'impronta vorticosa, caratterizzata da una traccia di pressione del vortice facilmente rilevabile dai sensori. Questo compito è da imputare principalmente alle CN, aiutate comunque dalle SN. Il pesce deve riuscire a muoversi nella scia e quindi deve essere in grado di avvertire i vortici in arrivo.

A questo proposito è stato effettuato un esperimento da [Liao et al. \(2003\)](#). L'animale utilizzato come cavia è stato una trota iridea, alla quale è stato fatto seguire un cilindro tozzo. Si è notato che il pesce riesce ad estrarre energia dalla scia in arrivo facendo un movimento a slalom attraverso i vortici della scia di von Kármán (**Figura 3.3**). È stato quindi studiato l'effetto di tale scia sulla linea laterale della trota e, come si poteva immaginare, è stata dimostrata la stretta connessione tra questa e il mantenimento della posizione tra i vortici. Queste osservazioni sono state fondamentali per gli studi successivi che hanno portato ad utilizzare di sensori per calcolare molte caratteristiche di vortici o strutture vorticose più complesse. Alcuni esempi sono le prove di [Yang et al. \(2006\)](#) per le impronte vorticose o quelle di [Ren & Mohseni \(2012\)](#) per le scie vorticose di Karman regolari ed inverse. Questi ricercatori, utilizzando sensori simili ai CN distribuiti sulla superficie di un corpo robotico fatto muovere in acqua, riuscirono a ricavare informazioni sufficienti per calcolare non solo la circuitazione dei singoli vortici, ma anche la lunghezza d'onda delle scie di Karman e la sua velocità di propagazione. Allo stesso modo, [Akanyeti et al. \(2011\)](#), [Venturelli et al. \(2012\)](#), [Salumae & Kruusmaa \(2013\)](#), e [Chambers et al. \(2014\)](#) utilizzando una schiera di sensori di pressione hanno dimostrato la fattibilità di estrarre caratteristiche del flusso, come ad esempio la frequenza di spargimento del vortice, lunghezza d'onda dell'impronta e intensità della turbolenza.

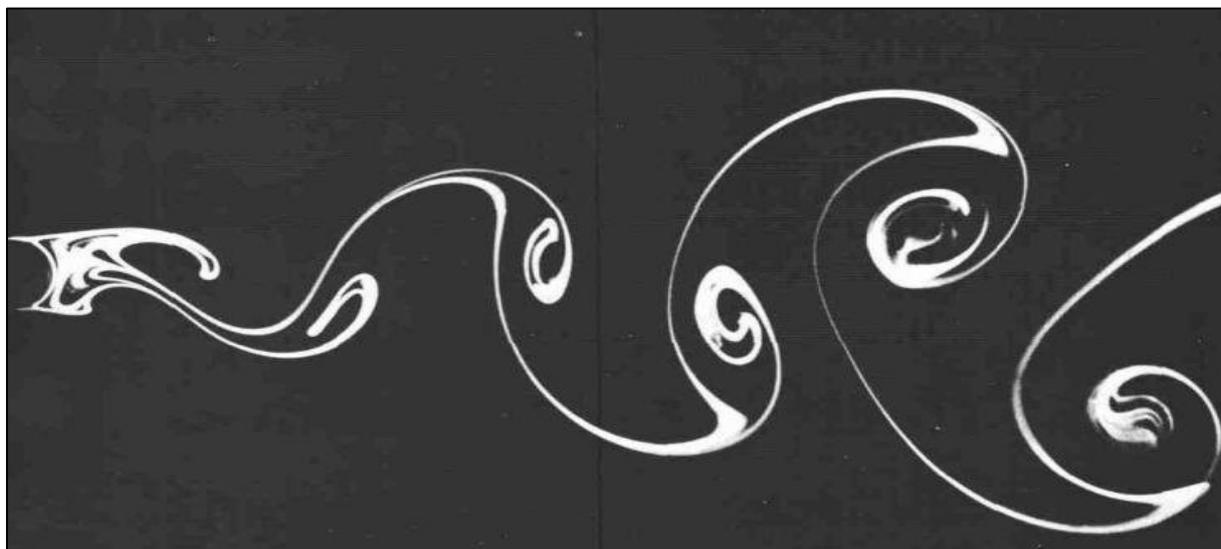


Figura 3.3: una scia vorticosa di von Kármán è una configurazione di scia caratterizzata dal distacco alternato di vortici che si verifica nel caso di corpi tozzi (corpi che presentano un distacco marcato dello strato limite) o nel caso di alti numeri di Reynolds.

3.1.3 Sensori MEMS e NEMS

La tecnologia MEMS (sistemi microelettromeccanici) e NEMS (sistemi nanoelettromeccanici) offrono innovazioni molto vantaggiose nella percezione di flussi e campi di pressione emulando la funzione della linea laterale. Sono il perfetto esempio di biomimetica essendo ispirati ai neuromasti di varie specie marine. Molti studiosi hanno sviluppato sensori ispirati alla tecnologia MEMS usando materiali piezoresistivi e piezoelettrici, polimeri resistivi, o metodi capacitivi e ottici in modo di convertire la deflessione di aste, barre o membrane in segnali elettrici.

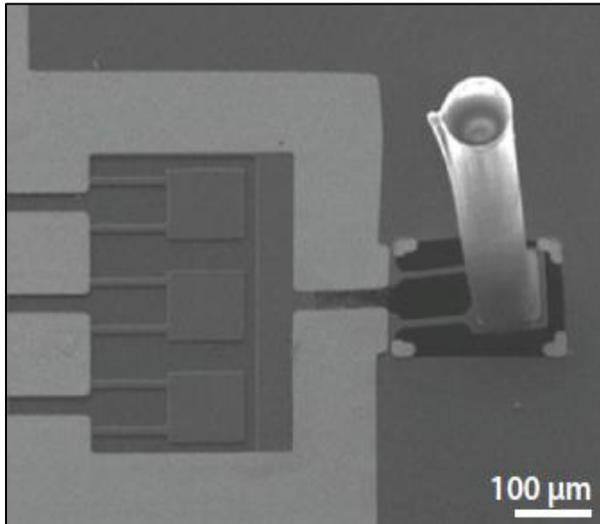


Figura 3.4: sensori MEMS ispirato a cellule ciliate SN, alta 700 µm, situate alla estremità distale di una micromensola con piezoresistori.

Un esempio è il sensore artificiale di velocità ispirato agli SN progettato da Liu (2007) (Figura 3.4). La cellula ciliata (più corta di 1 mm) non si estende oltre lo strato limite generato dal flusso (proprio come le copule delle SN) ed è fatta completamente in silicio. Questi sensori sono alti circa 700 µm, situati all'estremità distale di una micromensola con piezoresistori incorporati. Questo sensore dimostra una ultrasensibilità nel rilevare la velocità e la direzione del flusso. Purtroppo questa tecnologia non è utilizzabile in ambito subacqueo a causa della scarsa resistenza meccanica del silicio, così sono stati progettati sistemi senza la presenza dell'elemento fragile della cellula ciliata, ma costituiti da una schiera di sensori MEMS

sviluppati utilizzando un polimero a cristalli liquidi (LCP) come materiale di membrana, molto più resistente del silicio (Kottapalli et al., 2012).

La maggior parte delle ricerche si sono concentrate sullo sviluppo di singoli sensori di flusso basati sulla struttura SN, mentre la struttura del CN ha ricevuto meno attenzione. Klein & Bleckmann (2011) svilupparono dei canali di sensori artificiali ispirati alla linea laterale con l'utilizzo di sensori ottici che determinano l'efficienza di trasferimento della luce mediata dal flusso tramite piccole barre di silicio (che agiscono come cellule ciliate) incorporati nei canali. Sensori ispirati ai CN posizionati in un canale simile alla linea laterale sono stati sviluppati da Kottapalli et al. (2014). La distanza tra due pori del canale artificiale è di circa 6 mm e il poro ha un diametro di 1 mm.

Per i sensori montati su un corpo mobile le rilevazioni di pressione saranno sempre più vantaggiose rispetto a quelle di velocità a causa dei problemi legati allo spessore dello strato limite. Usando un diaframma sottile i sensori di pressione hanno mostrato nei test risposte positive ma hanno la necessità di essere equilibrati con la pressione ambiente soprattutto in acque profonde, dove la pressione idrostatica è la componente dominante. Questo tipo di sensori sono ispirati ai CN.

I sensori simili alle SN che misurano le velocità presentano problemi nello strato limite, diversi a seconda del numero di Reynolds, che porta alla necessità di una continua taratura. Inoltre questo tipo di sensori genera una scia di von Karman propria che va ad aggiungersi all'interferenza nella registrazione.

3.2 La Percezione dei Pinnipedi

Osservando i pinnipedi come gli *otaridi* (comunemente chiamati leoni marini) o la *phoca vitulina* (comunemente chiamata foca portuale) è emersa la loro grandissima abilità nel rintracciare le prede. Questi infatti riescono oltre a rilevare movimenti delle acque anche minimi, fino a $0,3 \text{ mm/s}$ (Dehnhardt et al., 1998), anche a rintracciare percorsi idrodinamici generati da un altro animale fino a $15 \div 20 \text{ s}$ di ritardo (Schulte-Pelkum et al., 2007) riuscendone anche, in alcuni casi, a distinguere la forma in base alla scia che questo ha lasciato (Wieskotten et al., 2011).

I pinnipedi riescono a riconoscere molto bene le scie e i movimenti del fluido che li circondano grazie all'utilizzo dei loro "baffi", situati all'estremità del muso, chiamati in gergo specifico *vibrisse*.

3.2.1 Le Vibrisse delle Foche



Figura 3.5: confronto tra un sensore che riproduce la forma della vibrissa di una foca portuale e una vera e propria. La larghezza massima nel modello in figura è di 1,15 mm.

Miersch et al. (2011) durante i loro studi sugli animali pinnipedi e sulla percezione del fluido che li circonda notarono che i leoni marini avevano una sensibilità ridotta rispetto alle foche portuali. Questa notevole differenza è dovuta alla forma differente dei loro baffi.

Le vibrisse della foca hanno infatti una geometria molto particolare, dettagliata da Hanke et al. (2010) e da Ginger et al (2010), che consiste in una forma di scorrimento ondulatoria con una sezione trasversale ellittica di forma variabile. Queste ondulazioni dell'area della sezione interrompono la coerenza della scia vorticosa riducendo al minimo la portanza indotta sui baffi. Queste supposizioni fatte da Hanke & Ginger sono state poi confermate da prove di vibrazioni forzate condotte prima da Hans et al. (2013), attraverso simulazioni computazionali tridimensionali, e dopo da Beem & Triantafyllou (2015) con prove sperimentali su modellini in scala (Figura 3.5). È stato mostrato che l'ampiezza delle vibrazioni indotte da un vortice su queste forme è significativamente ridotta.

La riduzione avviene quando i baffi sono allineati al flusso sul loro asse. È proprio questa sensibilità direzionale che porta la foca ad avere una così precisa percezione. Infatti l'animale per capire la direzione della scia cerca di allineare il proprio asse affusolato a questa, rendendo le vibrazioni inferiori al 5% del diametro della vibrissa. Tuttavia quando l'animale nuota in una scia i baffi sono soggetti anche ad una componente trasversale della velocità che aumenta drasticamente la vibrazione. Il bloccaggio della frequenza della risposta alla frequenza della scia è associato ad un moto di slalom attorno ai vortici che svolge la funzione di meccanismo di estrazione dell'energia (**Figura 3.6a/b**) molto simile a quello fatto dalle trote quando percorrono una scia.



Figura 3.6a: sequenza di istantanee di una vibrissa che vibra all'interno della scia di un cilindro. Il flusso va da sinistra a destra. Le ellissi in rosso rappresentano la posizione istantanea della sezione trasversale del baffo nello stesso piano della visualizzazione del flusso

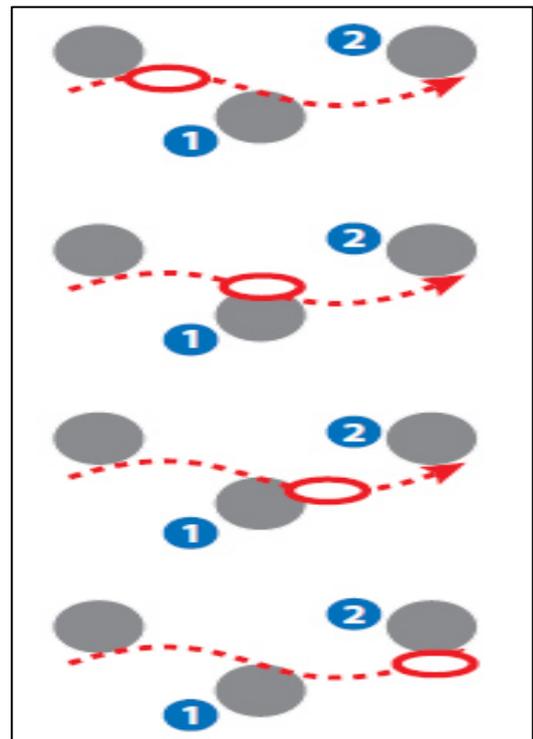


Figura 3.6b: la stessa situazione della figura a, schematizzata e mantenendo i vortici fissi per mostrare il cammino a slalom della vibrissa, caratterizzata da una alta sensibilità di risposta e di bloccaggio delle frequenze.

3.2.2 Sensori di Flusso Bioispirati

Emulando tale capacità propria di questa specie di mammiferi, sono emerse molte possibili applicazioni ingegneristiche.

Un primo esempio sono i baffi d'acciaio dotati di manometri sviluppati da [M.J. Hartmann & J.H. Solomon \(2006\)](#). Questi piegandosi inviano impulsi ad un software capace di ricostruire le immagini del flusso, riuscendone a misurare con precisione velocità e direzione.

Anche altri ricercatori hanno proposto sensori innovativi simile a quello appena descritto di Hartmann e Solomon, ad esempio quelli progettati da [Stocking et al. \(2010\)](#) e [Eberhardt et al. \(2011\)](#) sono in grado di misurare le variazioni di portata quando il sensore è spostato a causa del movimento del fluido, o quelli di [Valdivia et al. \(2012\)](#) che riproducono la forma ondulatoria tipica della vibrissa di una foca.

Un ulteriore esempio è stato proposto recentemente da [Asadnia et al. \(2015\)](#). Questo team ha sviluppato un neuromasto microfabbricato da stereolitografia (stampa 3D) con forma ondulatoria posizionato su un sensore piezoelettrico a membrana (**Figura 3.7**). Questo sensore ha dimostrato un elevato rapporto segnale/rumore e alte capacità di rilevazione direzionale del flusso. Inoltre esso può essere ridotto di dimensioni per misurare velocità più alte grazie alla sua proprietà caratteristica di non generare una scia di von Karman data la sua particolare forma ondulatoria. Questo modello è riuscito a sostituire l'utilizzo dei sensori MEMS ispirati ai neuromasti della linea laterale.

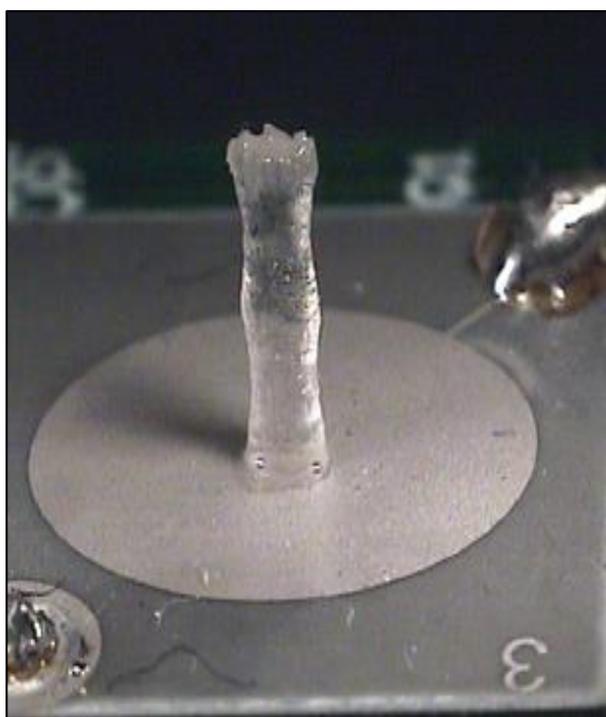


Figura 3.7: sensore a forma di vibrissa su un diaframma piezoelettrico realizzato utilizzando la stereolitografia. L'altezza della bacchetta è di 3 mm.

Capitolo 4

Tecnologia dei Tubercoli

Agli albori del nuovo millennio gli studi nel campo della biomimetica idrodinamica si sono soffermati su un particolare ordine di animali acquatici, quello dei cetacei (nel linguaggio specifico *cetacea*), capaci nonostante le loro notevoli dimensioni di effettuare manovre e movimenti tutt'altro che lenti. Un esemplare che ha attirato a sé molta attenzione è la *Megaptera novaeangliae* (in gergo comune Megattera) un mammifero marino appartenente alla famiglia delle *Balaenopteridae*.

La Megattera, come intuibile dalla radice del nome che deriva dal greco μέγα πτερόν (*méga pterón*, grande ala), possiede come attributo peculiare le possenti pinne pettorali, le più grandi di tutto l'ordine dei cetacei. Queste pinne sono caratterizzate da una flessibilità particolarmente accentuata e soprattutto dalla presenza di protuberanze di forma ellittica che si sviluppano sul bordo d'attacco, facendo una similitudine con il mondo aerodinamico, con frequenza e lunghezza variabile. Queste protuberanze sono chiamate tubercoli e sono stato l'oggetto della quasi totalità degli studi biomimetici effettuati su questo animale. I tubercoli si dispongono lungo il "bordo d'attacco" in maniera quasi sinusoidale e su di una singola pinna se ne contano solitamente un numero compreso tra 9 e 11. La loro presenza migliora le caratteristiche fluidodinamiche delle pinne permettendo all'animale di effettuare rapide e difficili manovre, molto utili soprattutto durante la fase di caccia.

In questo capitolo della tesi verranno illustrati quali sono i principi idrodinamici che rendono questa particolare forma vantaggiosa nel moto in un mezzo fluido, e verranno descritti quali sono stati i principali studi riguardanti tale argomento presenti nella vastissima letteratura. Verrà innanzitutto descritta la morfologia dell'animale e delle sue pinne richiamando in parallelo le principali ricerche sulle relazioni dei tubercoli con la movimentazioni dell'animale. A questo punto si parlerà dei risultati teorico-numeriche di uno studio computazionale effettuato mediante l'uso della CFD (fluidodinamica computazionale) e di quelli sperimentali estratti da una prova condotta su modelli immersi in un flusso a bassi numeri di Reynolds. Questo capitolo si concluderà con un paragrafo interamente dedicato agli utilizzi di questa tecnologia in svariati campi ingegneristici tra cui quello aeronautico e quello marino.

4.1 La Megaptera Novaeangliae

La megattera (*Megaptera novaeangliae*) (**Figura 4.1**) è un cetaceo appartenente alla famiglia delle Balaenopteridae. Questo esemplare può essere descritto come una robusta balena, relativamente piccola in confronto alle altre, facilmente identificabile per l'evidente gobba presente sul dorso dalla quale si sviluppano le pinne dorsali. Questo tipo di animale può raggiungere lunghezze dai 12 ai 16 m e può arrivare a pesare fino a 30'000 kg. La megattera si ciba di un'ampia varietà di pesci, in particolare di krill, che caccia effettuando armoniche e coordinate manovre subacquee. Le megattere vivono in quasi tutti i mari del mondo e durante il corso dell'anno solare prendono parte a lunghe migrazioni.

4.1.1 I Tubercoli

Il nome *Megaptera novaeangliae* significa letteralmente “grandi ali del New Egnland”. Questo animale presenta delle protuberanze che adornano la testa ed il bordo delle pinne. Queste sporgenze sono disposte in modo sinusoidale donando alle pinne un aspetto “a pettine”. La posizione dei tubercoli dipendono dalla struttura ossea della pinna, omologa a quella degli arti anteriori dei mammiferi terrestri ma con consistenti modifiche proporzionali alle dimensioni dell'animale. Infatti nello scheletro della megattera si ha un enorme sviluppo delle dita accompagnata da iperfalangia, cioè uno sviluppo elevato del numero di falangi; quelle che escono dalla pinna danno vita ai tubercoli. Il numero di tubercoli è solitamente compreso tra 9 e 11 e il loro sviluppo comincia sin dalla prima fase fetale.



Figura 4.1: esemplare di *Megaptera novaeangliae* che effettua un *breaching*, un'acrobazia che mette in luce la grande agilità dell'animale e permette di osservare le pinne frastagliate, caratteristiche di questa specie.

Le pinne di questo animale sono più lunghe di quelle di qualsiasi altro cetaceo, la loro lunghezza varia dal 25% al 33% della lunghezza totale del loro corpo. Queste pinne sono molto mobili e presentano un'accentuata flessibilità lungo la loro estensione, ancora più marcata se messa a confronto con quella delle pinne di altre esemplari di balene. La sezione di queste pinne assomiglia al profilo aerodinamico NACA 634-021 (**Figura 4.2**) con massimo spessore pari al 21% della corda.

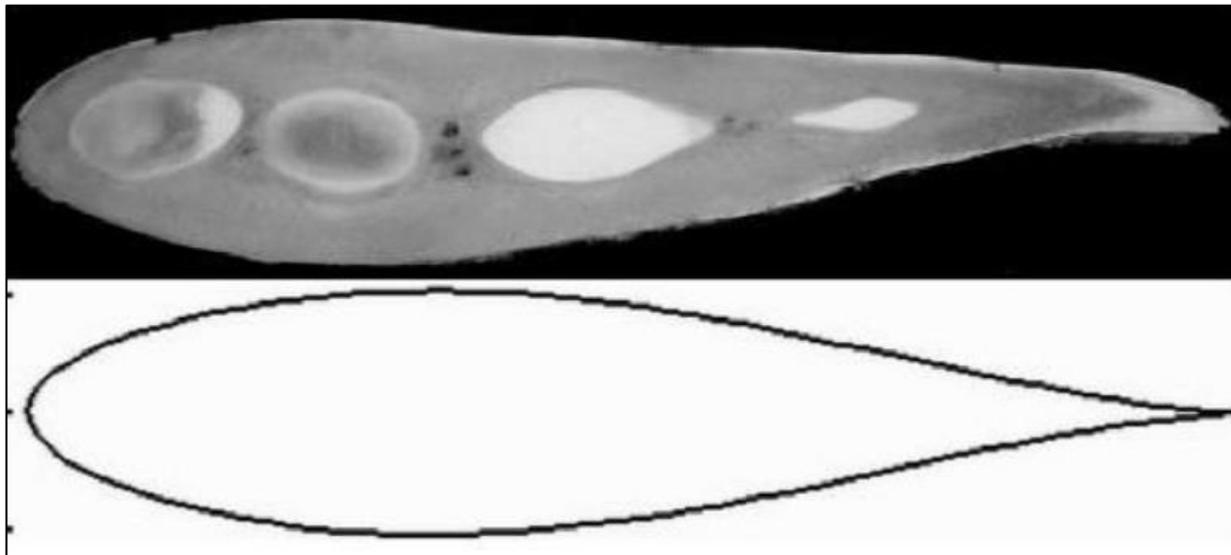


Figura 4.2: confronto tra la sezione trasversale di una pinna di *Megaptera novaeangliae* e il profilo NACA 63-021.

Il gruppo di ricerca composto da [F.E. Fish](#), [P.W. Weber](#), [M.M. Murray](#) e [L.E. Howle](#) studiarono nel 2011 e analizzarono 77 fotografie di individui differenti di megattera per trarne dei risultati statistici sulle pinne di questo animale. Il primo di questi riguarda l'aspect ratio (attuando un'analogia aerodinamica corrisponde all'allungamento alare, cioè al rapporto tra l'apertura delle pinne e la corda media) pari a 4.9 ± 0.8 (\pm SD, Standard Deviation, errore quadratico medio) con valore massimo di 7.7 e minimo di 3.6. Inoltre fu osservato che i tubercoli più grandi corrispondono spesso al primo e al quarto, contando dall'attaccatura delle pinne, corrispondenti rispettivamente al 14.9% e al 19.4% della corda locale e al circa 4% dell'apertura della pinna. Gli altri tubercoli sono più piccoli e con dimensioni via via decrescenti andando verso l'estremità della pinna. La distanza intertubercolare in linea di massima diminuisce andando verso la punta della pinna e da circa 0.53 ± 0.5 a 0.87 ± 0.5 rimane circa costante (7 ÷ 9% dell'apertura) dell'apertura (**Figura 4.3**).

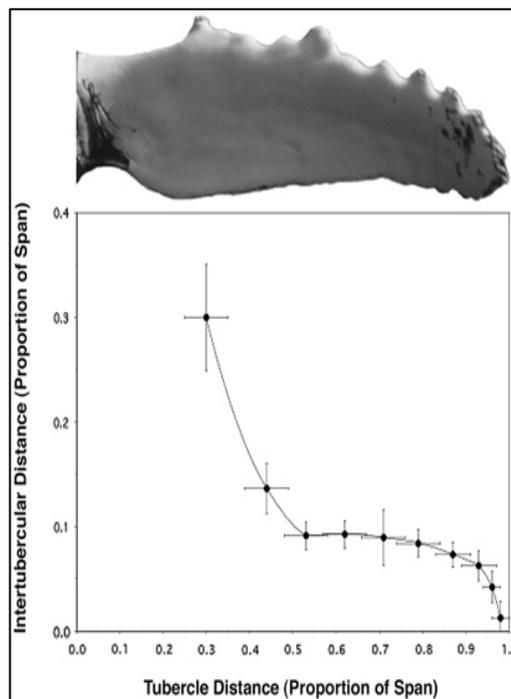


Figura 4.3: rappresentazione della distanza intertubercolare in funzione della distanza di ciascun tubercolo. Le misure sono indicate in proporzione all'apertura della pinna.

4.1.2 Le Manovre

Come è stato già accennato, le pinne allungate e i tubercoli della megattera sono strettamente collegati ai metodi di alimentazione dell'animale. Tra tutti i cetacei, la megattera è l'unico in grado di far affidamento sulla manovrabilità del proprio corpo per catturare le prede. Solitamente le altre balenottere nuotano rapidamente in avanti e inghiottono acque cariche di prede, mentre le balene più grandi nuotano lentamente attraverso questi branchi di prede, ma in entrambi i casi il nuoto avviene allo stesso modo in maniera rettilinea.

Osservando il nuoto della megattera si nota a prima vista l'alta manovrabilità e armonia delle sue prestazioni, possibili grazie all'uso delle pinne mobili. Queste pinne sono usate come "timoni" biologici che rendono possibili manovre particolarmente ardue come curve strette. Un particolare esempio di quest'ultime è l'*inside loop* (anello interno) durante il quale la balena riesce a compiere una rotazione di 180° (come si direbbe in gergo "ad U") per poi scattare verso la sua preda, cosa impensabile per la quasi totalità dei suoi simili.

Questo tipo di virate della megattera sono favorite dalle alte caratteristiche di portanza e resistenza generate dalla combinazione e collaborazione dei tubercoli posizionati sul bordo d'attacco e dell'alto aspect ratio delle pinne. Durante queste manovre la portanza generata sulle pinne ha una componente orizzontale che supporta la forza centripeta, necessarie a mantenere la rotta. Inoltre l'aumento dell'angolo di attacco critico (che genera lo stallo) aumenta la portanza nel caso di virate più strette. I tubercoli quindi forniscono un grande vantaggio per quanto riguarda la manovrabilità durante le battute di caccia della megattera. Se questi non ci fossero, infatti, si osserverebbe lo stallo durante la manovra e quindi la componente centripeta non sarebbe supportata da alcuna forza, facendo avvenire così un fenomeno di slittamento simile a quello che avviene ad un'automobile che effettua una curva sul ghiaccio.

Per far luce su quali sono le cause fisiche di questi fenomeni e avere più chiarezza su quali sono le conseguenze della presenza dei tubercoli verranno qui di seguito riportata un'analisi attenta della letteratura scientifica riguardante tale campo di ricerca seguita dalla discussione di due tipi di esperienze differenti in modo da avere una visione molto ampia dell'argomento. La prima che vede l'utilizzo di un calcolatore per studiare e analizzare casi ad alti numeri di Reynolds attraverso simulazioni con CFD, ed una seconda prova sperimentale in un tunnel a ricircolo di acqua caratterizzato da bassi Reynold.

4.2 Risultati Teorico-Numerici e Prove Sperimentali

La letteratura riguardante la megattera è molto vasta, e si concentra soprattutto sullo studio delle conseguenze dovute alla presenza dei tubercoli e sui loro effetti fluidodinamici.



Figura 4.4: generatore di vortici *Micro Dynamics* montato sull'ala di un Cessna 182K.

Uno delle prime esperienze a tal proposito è datata 1995. Essa fu effettuata da [Fish & Battle](#), che pubblicarono i risultati nell'articolo "*Hydrodynamic design of the humpback whale flippers*". I due scienziati effettuarono le dovute misurazioni su un vero esemplare di megattera giunsero a dimostrare che la pinna dell'animale può essere modellizzata come un profilo quasi-simmetrico, la cui sezione trasversale presenta notevoli somiglianze con il profilo NACA 63-021. Secondo il parere degli autori dell'articolo la funzione dei tubercoli è, se non analoga, molto simile a quella dei generatori di vortici (Vortex Generator, abbreviato VG), già

utilizzati in quegli anni su alcuni aerei (**Figura 4.4**). Questi generatori permettono, tramite la creazione di vortici, di cedere energia allo strato limite del fluido energizzandolo, e quindi ritardando sensibilmente l'insorgere dello stallo.

Per avere i primi veri e propri risultati specifici dobbiamo attendere fino al 2004. In questo anno [Miklosovic et al.](#) effettuarono delle prove sperimentali in galleria del vento con un modello in scala 1:4 basato su un profilo NACA 0020, usando prima un modello liscio, e poi uno dotato di tubercoli posizionati seguendo le indicazioni tratte dalla pubblicazione di Fish et al. citate in precedenti. I risultati ottenuti misero in luce effetti tutt'altro che trascurabili dal punto di vista aerodinamico, evidenziando un aumento dell'angolo di stallo dal valore di 12° (riscontrato per il modello liscio) ad uno di 16.3° per il modello dotato di tubercoli. Inoltre il modello con tubercoli risentiva di un aumento di portanza, e quindi di efficienza, accompagnato da una leggera diminuzione della resistenza nel range di incidenze tra i 12° e 17° . Tuttavia esperimenti successivi riportarono risultati meno positivi caratterizzati da una diminuzione di portanza e da un aumento di resistenza in fase di pre-stallo, accompagnati tuttavia da un notevole aumento del rendimento complessivo dell'ala superato l'angolo di attacco critico.

Nel 2007 venne pubblicato "*Effects of Leading-Edge Protuberances on Airfoil Performance*" ad opera di [Johari et al.](#). Questo team effettuò studi sugli effetti della presenza dei tubercoli analizzando le risposte di modelli realizzati in alluminio basati su profili NACA 634-021. I tubercoli era posizionati in maniera sinusoidale e le prove vennero effettuate con 6 diversi tipi di modelli a seconda della lunghezza d'onda e dell'ampiezza delle protuberanze.

Questi 6 modelli (**Figura 4.5**), confrontati con il baseline (modello liscio), hanno presentato tutti un comportamento simile: in fase pre-stallo presentano un valore contenuto del coefficiente di portanza; in fase post-stallo invece il C_L si mantiene su valori decisamente più alti. Confrontando tra loro i vari modelli, a pari ampiezza, le prestazioni hanno un generale peggioramento diminuendo la frequenza, e quindi la lunghezza d'onda, dell'onda sinusoidale. I risultati ottenuti da Miklosovic non furono riscontrati in queste prove.

Una delle pubblicazioni più recenti è quella di [N. Rostamzadeh et al.](#) data 2013 e intitolata *“The Effect of Undulating Leading-Edge Modifications on NACA 0021 Airfoil Characteristics”*. In questa gli autori cercarono di indagare le variazioni delle caratteristiche aerodinamiche dovute alla presenza dei tubercoli utilizzando tre diversi approcci: il primo analitico, utilizzando la teoria della linea portante non lineare di Prandtl; il secondo sperimentale, con prove in galleria del vento utilizzando diversi modelli; il terzo computazionale, utilizzando il programma di simulazione ANSYS-CFX 12.1. Lo studio analitico effettuato dal team partendo dalla teoria della linea portante non lineare di Prandtl riuscì a dimostrare la variazione di portanza dovuta alla presenza dei tubercoli. Graficando la distribuzione di circuitazione Rostamzadeh et al. notarono che essa assume un aspetto ondulatorio, riproducendo la forma dei tubercoli. La variazione periodica della circuitazione, che aumento con l'aumento dell'angolo di attacco, è strettamente legata al fenomeno di generazione di vortici lungo l'apertura alare.

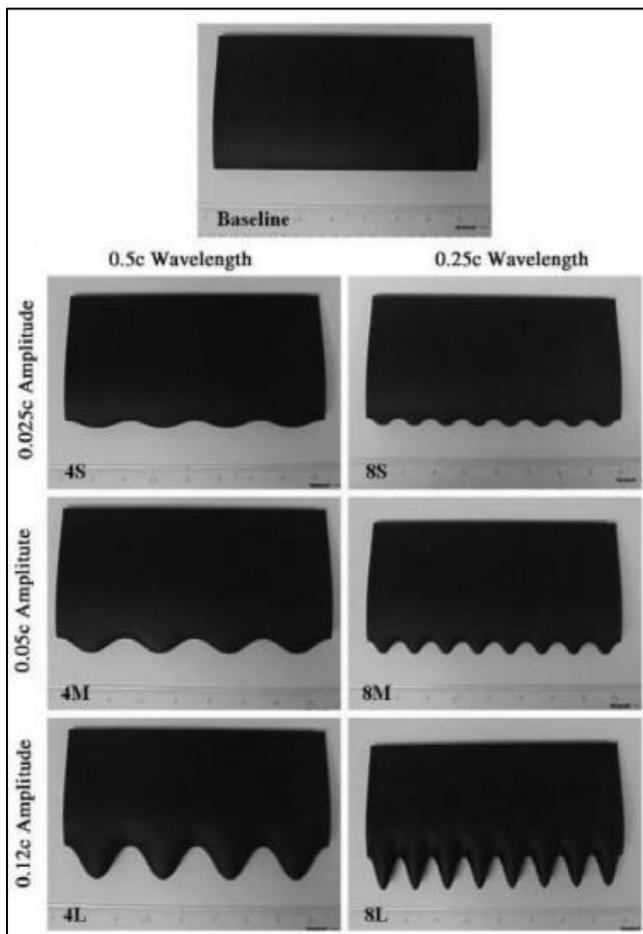


Figura 4.5: modelli utilizzati nell'esperimento di Johari et al. con le rispettive sigle, corrispondenti ad un numero (lunghezza d'onda) e ad una lettera (ampiezza).

4.2.1 Studio Idrodinamico degli Effetti dei Tubercoli con CFD

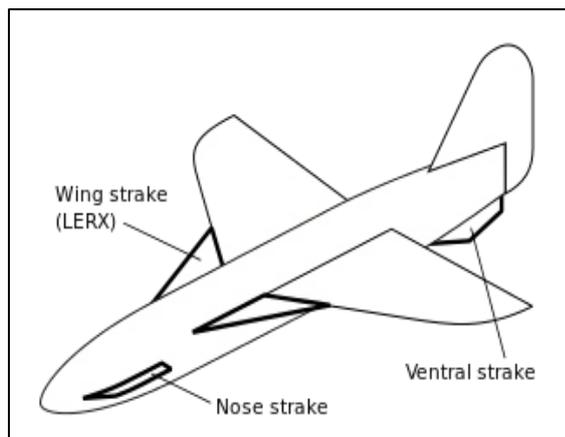


Figura 4.6: i vari tipi di strake montati su un aereo.

Come ipotizzato i tubercoli nelle pinne della megattera si comportano come le strake (**Figura 4.6**), cioè delle superfici montate sulla fusoliera usate negli aerei e destinate a incrementare le caratteristiche di volo con la generazione di vortici (agendo come vortex generator con dimensioni maggiori). Queste strake generano grandi vortici che pospongono lo stallo, scambiando quantità di moto con lo strato limite così da tenerlo attaccato sulla superficie dell'ala. In questo modo la portanza è conservata anche a grandi angoli aerodinamici, rispetto ad ali senza strake, seppur non aumentando la portanza massima raggiungibile.

Uno studio approfondito della fluidodinamica attorno ai tubercoli è stato descritto nella pubblicazione “*Hydrodynamic characteristics for flow around wavy wings with different wave lengths*” ad opera di **J. Kim, H.S. Yoon, J.H. Jung, H. Chun e D.W. Park (2012)**. Questi studiosi, attraverso la CFD (fluidodinamica computazionale), e con l'utilizzo di algoritmi e analisi numerica, hanno effettuato uno studio tridimensionale della fisica del problema su diversi tipi di profili distinti da differenti lunghezze d'onda.

Gli studi sono stati effettuati su modelli basati sul profilo NACA 0020 con apertura (S) pari a $1.5C$, investiti da fluido con numero di Reynold pari a 10^6 e facendo variare l'angolo di attacco nel range di $0^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$. La **Figura 4.7** mostra in modo schematico i vari tipi di modelli usati con le diverse misure di lunghezza d'onda della sinusoide del bordo d'attacco, descritta dall'equazione per la corda:

$$C(z) = C + a \cos(2\pi z/\lambda)$$

dove a è l'ampiezza dell'onda, fissata a $0.05C$. Le varie lunghezze d'onda sono pari a $S/2$, $S/4$, $S/6$, $S/8$ e $S/10$.

Questo metodo numerico ha seguito gli studi precedenti di Yoon et al. per quanto riguarda la forma e la disposizione del bordo d'attacco sinusoidale dell'ala.

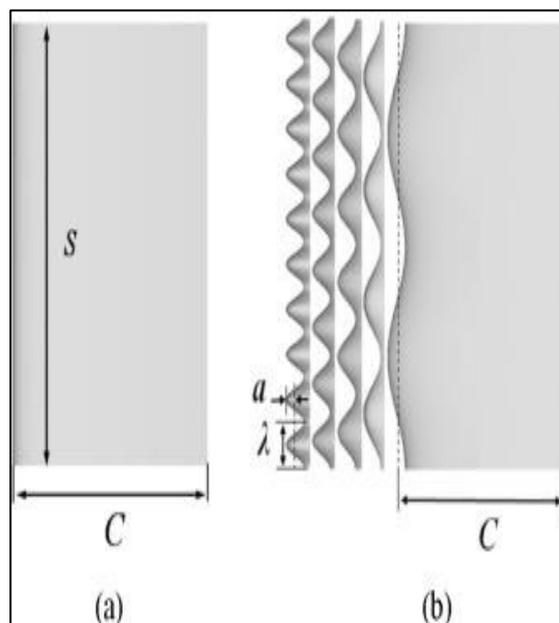


Figura 4.7: vista superiore delle geometrie dell'ala rettangolare (a) e delle ali ondulate (b) con le varie lunghezze d'onda.

Coefficienti di portanza e di resistenza

I risultati per quanto riguarda la portanza generata (**Figura 4.8a**) mostrano che la differenza del coefficiente di portanza C_L tra il profilo liscio e quelli ad onda è pressoché trascurabile nel range dell'angolo di attacco di $0^\circ \leq \alpha \leq 8^\circ$. Per angoli $\alpha > 8^\circ$ il divario del C_L diventa consistente, presentando valori maggiori nel caso del modello liscio. La differenza fra i due tipi di andamenti è che, mentre per il modello liscio il C_L cresce linearmente fino a che α non raggiunge 20° dopodiché decade drasticamente, per il modello ad onda il C_L cresce fino a saturarsi per un certo valore.

L'ala ad onda presenta anch'essa una riduzione della portanza nell'intervallo di $12^\circ \leq \alpha \leq 16^\circ$, dopodiché continua ad aumentare fino a 24° per poi saturarsi rimanendo all'incirca costante. La riduzione che avviene non è drastica come nel caso del profilo liscio, non si può pertanto parlare di stallo. Nella fase post-stallo ($24^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$) le ali ad onda con $\lambda=S/2$, $\lambda=S/4$ e $\lambda=S/6$ presentano un C_L leggermente più alto dell'ala liscia, in accordo con i risultati delle ricerche precedenti.

Nella **Figura 4.8b** è mostrato l'andamento del coefficiente di resistenza C_D in funzione dell'angolo di attacco. In generale per angoli bassi il C_D ha lo stesso valore nel caso di ala liscia o ala ad onda. Invece per angoli $12^\circ \leq \alpha \leq 24^\circ$ le ali ad onda forniscono un C_D molto maggiore dell'ala liscia, in particolare nel caso di $\lambda=S/4$.

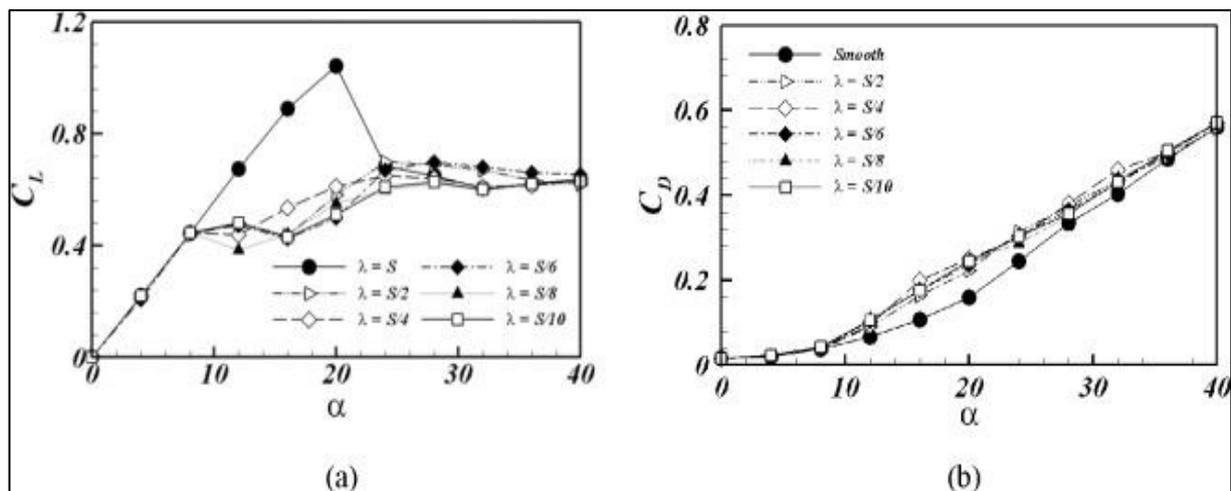


Figura 4.8: coefficiente di portanza (a) e di resistenza (b) dell'ala ondulata e dell'ala liscia in funzione dell'angolo d'attacco aerodinamico.

Coefficiente di pressione

Sono stati effettuate misurazioni anche per visualizzare la distribuzione del coefficiente di pressione sulla superficie dei diversi modelli. Questo studio è stato effettuato per tre angoli d'attacco diversi, pari a 12° , 20° e 24° . La distribuzione delle pressioni sulla superficie è la causa principale della generazione di portanza e di resistenza, pertanto è fondamentale la sua analisi. Qui di seguito sono presentati soltanto gli studi per gli angoli pari a 20° e 24° , con il fine di mostrare la fase pre e post stallo, evidenziando gli effetti del distacco della vena fluida sui diversi modelli di ali.

Quando $\alpha = 20^\circ$ (**Figura 4.9**), analogamente al caso di $\alpha = 14^\circ$, per il modello liscio il valore del coefficiente di pressione C_P più basso in modulo si trova in corrispondenza della radice dell'ala, ed il suo andamento è crescente spostandoci verso il bordo d'attacco. Si può notare che sull'ala il valore di C_P più basso è presente in una macchia che assomiglia ad un disturbo. Aumentando l'angolo questa area crescerà contribuendo all'aumento del C_L . Per le ali ad onda l'andamento del C_P ricalca la forma del bordo d'attacco diventando più basso in corrispondenza delle gole e più alto dove stanno le creste. Al centro di queste ali si concentra il valore più alto di C_P .

Per l'angolo di 24° (**Figura 4.10**) l'ala liscia entra nella regione post-stallo e, a causa della separazione, il C_P ha un gradiente inverso e diminuisce, oltre ad assumere distribuzioni più disordinate. Per le ali ad onda invece, al diminuire della lunghezza d'onda, il valore più alto del C_P diverge verso l'interno.

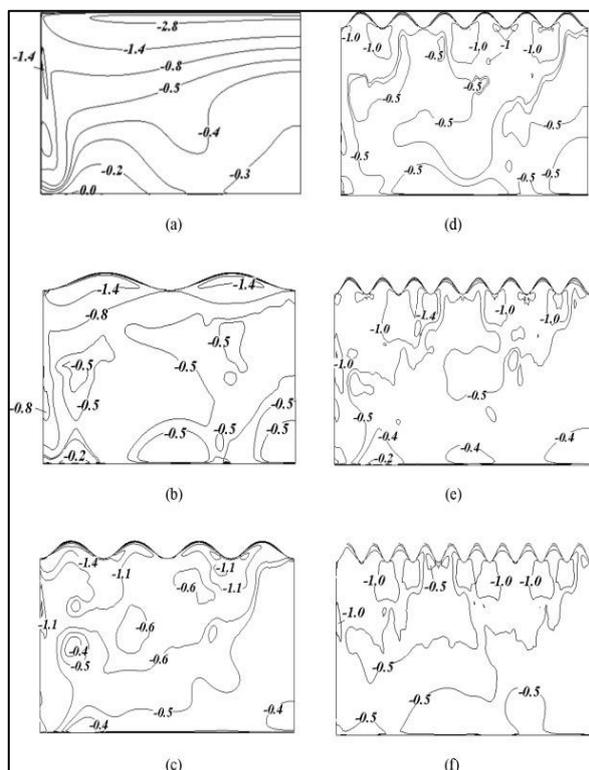


Figura 4.9: distribuzione del coefficiente di pressione per l'angolo aerodinamico di $\alpha = 20^\circ$ per i vari tipi di ali.

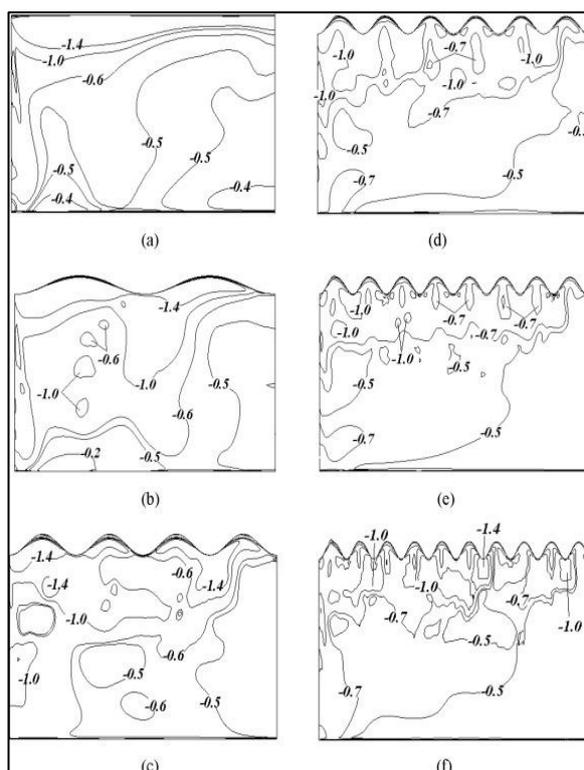


Figura 4.10: distribuzione del coefficiente di pressione per l'angolo aerodinamico di $\alpha = 24^\circ$ per i vari tipi di ali.

4.2.2 Prove Sperimentali a Bassi Numeri di Reynolds

Per comprendere come i tubercoli interagiscono con un flusso fluido che li investe sono stati effettuati molti studi sperimentali. Uno di questi, che ho ritenuto interessante inserire in questa tesi per i risultati ottenuti, è descritto nella pubblicazione “*An experimental study on flow separation control of hydrofoils with leading-edge tubercles at low Reynolds number*” ad opera di [Z. Wei, T.H. New e Y.D. Cui \(2015\)](#). Ho scelto di descrivere tale esperimento anche per avere una visione più vasta dello studio di queste particolari strutture in modo da conoscere non solo il loro comportamento con alti numero di Reynolds (descritto nel paragrafo precedente) ma anche con bassi.

Per lo studio preso in considerazione le prove sono state condotte con modelli basati sul profilo NACA 634-021 generati con lamine di alluminio. La corda media è stata scelta pari a $c=75\text{ mm}$ e l’apertura alare pari a $x=300\text{ mm}$. Le prove sono state effettuate con profili sinusoidali con lunghezze d’onda $\lambda=0.25c$ e $0.5c$, usando in entrambi i casi due valori per le ampiezze pari a $A=0.025c$ e $0.12c$, avendo così un totale di quattro prove differenti. Il bordo d’attacco può essere descritto con la seguente espressione:

$$x = A \sin\left(\frac{2n\pi z}{s}\right), 0 \leq z \leq s$$

considerando l’asse x parallelo alle corde e l’asse z perpendicolare a queste.

Gli esperimenti sono stati condotti in un tunnel a ricircolo d’acqua, avente le seguenti dimensioni di sezione $450\text{mm} \times 600\text{mm} \times 1100\text{mm}$, corrispondenti rispettivamente a larghezza, altezza e diametro. Le due pareti laterali e quella del fondo sono state fatte in vetro temprato in modo tale da avere accesso ottico all’ambiente interno. La portata del flusso è stata regolata usando una pompa assiale dotata di sensori per il controllo di velocità. Gli esperimenti sono stati condotti a velocità pari a $U_0 = 0.19\text{ m/s}$ (basse velocità) e ad un Reynolds corrispondente di $Re = U_0 c / \nu = 1.4 \times 10^4$.

Per evidenziare le caratteristiche del flusso sono state usate le tecniche di particle-streak photography e di particle image velocimetry (PIV). Queste tecniche riescono a mostrare lo sviluppo dei vortici e le regioni di separazione del flusso sia nel piano x - y che in quello y - z .

La procedura del particle-streak photography consiste nel mandare particelle di poliammide (PA), di dimensione $20\ \mu\text{m}$, uniformemente nell’acqua. Queste particelle vengono poi esposte per un tempo relativamente lungo ad un fascio laser spesso 20 mm generato da un laser pompato a diodo allo stato solido continuo con un puntatore di precisione. In questo modo esse diventano facilmente catturabili con una fotocamera Canon 550D Digital Single-Lens-Reflex (DSLR). Più fotocamere sono posizionate in diversi punti per avere l’immagine di tutti i piani richiesti, e sono connesse ad un computer in modo da poter essere controllate da un software che ne regola i tempi di utilizzo e le sincronizza.

Per quanto riguarda la PIV essa è stata usata per calcolare la velocità e i campi di vorticità del flusso. L’impostazione è la stessa della particle-streak photography, ma il laser continuo è sostituito da un laser Litron a neodimio (Nd) a doppia pulsazione. Le immagini sono catturate da una fotocamera Dantec Dynamics FlowSense 2M/E double-frame CCD sincronizzata con il laser.

*Risultati -
CVP*

Il risultato più rilevante delle diverse prove è stato notare che, quando il flusso investe un modello con tubercoli si formano delle coppie di vortici controrotanti (counter-rotating vortex pairs, CVP) in corrispondenza delle protuberanze. Si pensa che sia proprio la creazione di questi CVP (**Figura 4.11**) la causa del ritardo nella separazione, anche se tale meccanismo di controllo dello strato limite non è ancora del tutto chiaro.

Ogni tubercolo funge come una piccola ala a delta o come un generatore di vortici, e ognuno di essi genera un CVP quando immerso nel flusso. Questi andando verso le gole del profilo sinusoidale crescono in dimensione ma diminuiscono in intensità. La loro generazione avviene sulle creste di ogni tubercolo e il vortice a sinistra ruota in senso orario mentre quello a destra in senso antiorario (**Figura 4.12**).

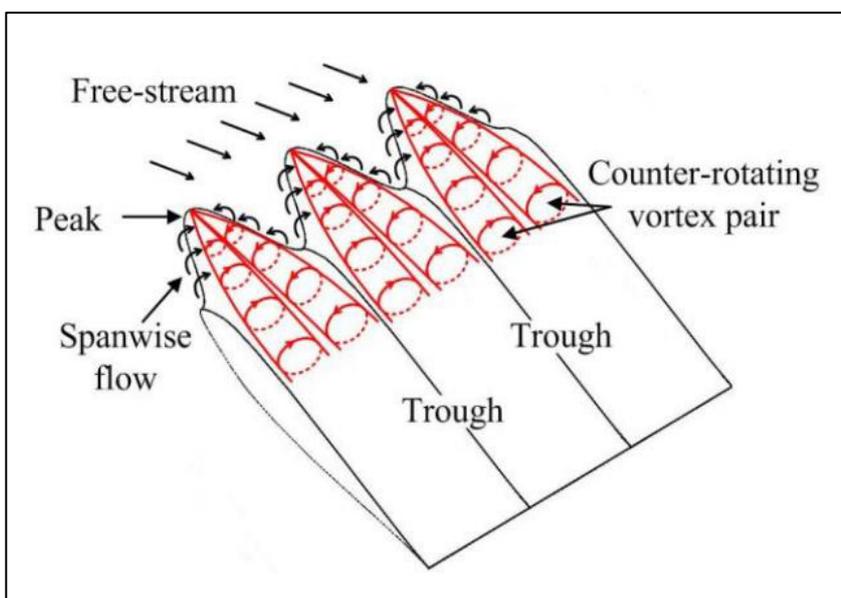


Figura 4.11: disegno con vista tridimensionale del profilo che schematizza i CVP che si vengono a creare all'incontro tra il flusso e i tubercoli.

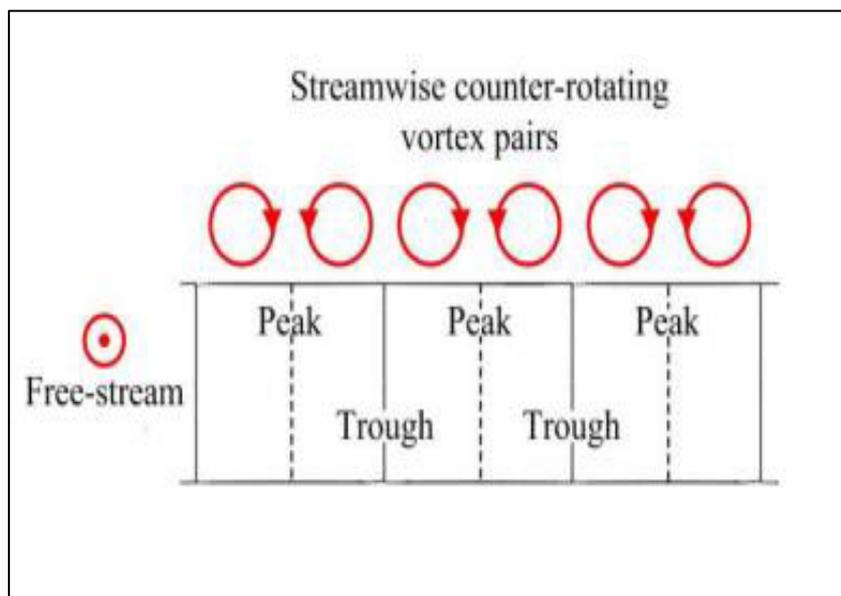


Figura 4.12: vista frontale del fenomeno di generazione dei CVP mettendo in evidenza la posizione di creazione e il verso.

Chiaramente i CVP si relazionano tra loro avvicinandosi, e quando interagiscono si può osservare un fenomeno di separazione instabile, più marcata per alti angoli, e nel caso di bassi Re questa prende piede da $\alpha = 15^\circ$.

Questo fenomeno è stato catturato grazie alle due tecniche di fotografia utilizzate, ed è visibile come si può osservare dalla matrice di **Figura 4.13**. Questa rappresenta il campo di vorticità ($\bar{\omega}_x$) per un singolo modello di ala (A9 λ 18.75), con quattro differenti angoli di incidenza e per quattro diverse posizioni del fascio del laser.

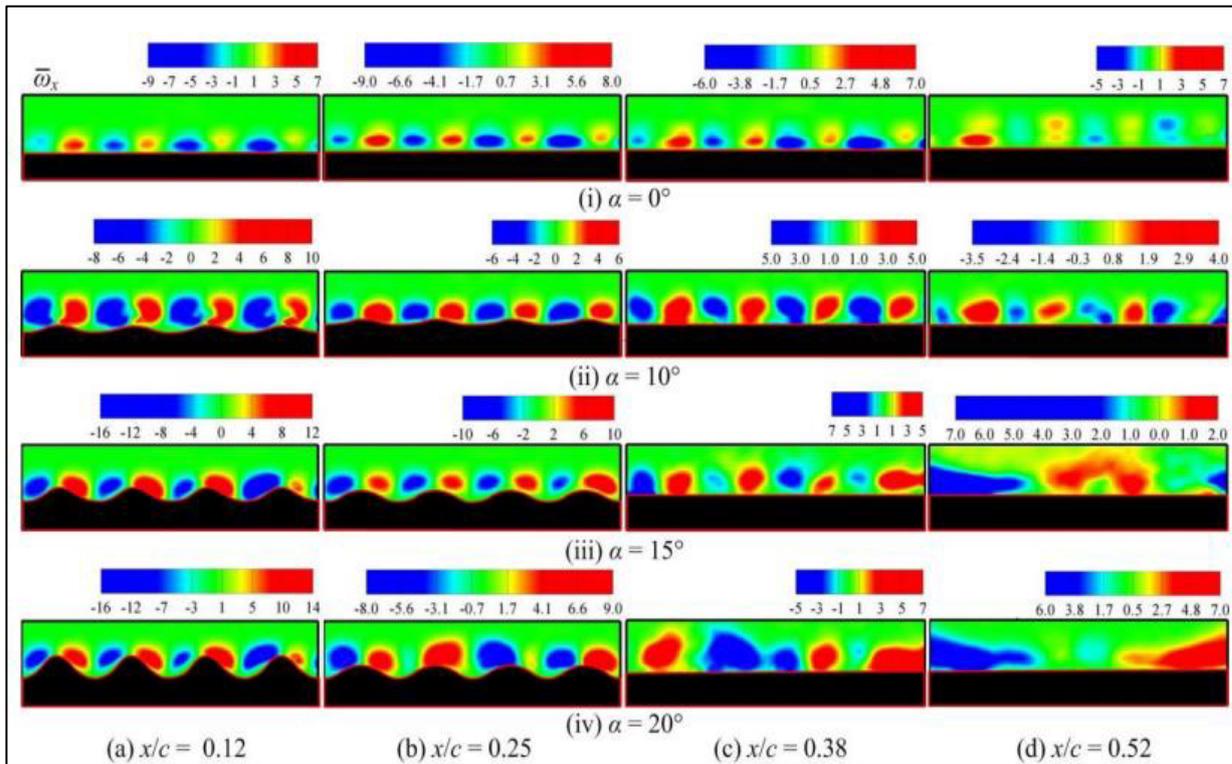


Figura 4.13: campo medio della vorticità ($\bar{\omega}_x$) del modello di ala A9 λ 18.75 lungo la posizione del fascio laser di: (a) $x/c = 0,12$, (b) $x/c = 0,25$, (c) $x/c = 0,38$ e (d) $x/c = 0,52$. Sono considerati quattro angoli d'attacco aerodinamici $\alpha = 0^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ e 20° .

Un'altra osservazione importante messa in luce da queste esperienze è la relazione tra il parametro A/λ del profilo e la sua capacità di controllare il flusso. All'aumentare di questo rapporto il controllo della separazione del flusso è migliore; al contrario, se il rapporto è basso, i tubercoli perdono le loro capacità stabilizzanti.

Ancora la volta la conclusione delle esperienze svolte è stata che i tubercoli hanno un ruolo, se non uguale, molto simile ai vortex generator (VG), ossia ai generatori di vortici, già presenti su molti aerei, con la differenza che un loro impiego varierebbe la forma delle ali e aumenterebbe notevolmente la difficoltà di progettazione e costruzione del velivolo.

4.3 Applicazione della Tecnologia dei Tubercoli

Seppur i risultati numerici e le varie esperienze condotte in questo campo sino ad oggi siano molto numerose, il ruolo fluidodinamico che gioca la presenza dei tubercoli non è ancora del tutto chiaro. Tuttavia si possono trarre delle conclusioni allo stesso modo importanti e utili basandosi sui risultati ottenuti.

Si può innanzitutto dire che la presenza dei tubercoli non ha un ruolo positivo nella generazione di portanza che, al contrario, è sfavorita dalla loro presenza. Infatti, con le protuberanze sul bordo d'attacco, si nota come per angoli di incidenza minori dell'angolo di stallo la distribuzione del coefficiente di pressione sull'ala con protuberanze presenta misure in modulo più basse rispetto ad un modello liscio, pertanto il suo integrale (proporzionale alla portanza esercitata sul modello) sarà inferiore.

Il vantaggio di questo tipo di strutture è chiaro, giungere per angoli maggiori di quello di stallo, e quindi nella fase di post-stallo. In questa fase infatti la presenza dei tubercoli gioca un ruolo fondamentale, riuscendo a mantenere attaccato più a lungo lo strato limite sulla superficie dell'ala. Queste protuberanze generano delle coppie di vortici controrotanti (CVP) che scambiano energia e quantità di moto con lo strato limite anticipando la transizione a turbolento, e di conseguenza aumentando la permanenza sull'ala.

Tali risultati però non sono da prendere come veritieri in modo assoluto in quanto, come mostra l'ampia letteratura a riguardo, essi variano dal tipo di profilo base scelto, dal tipo di flusso e dalla funzione usata per rappresentare i tubercoli.

Similmente all'uso che ne fanno le megattere, i tubercoli sono stati adoperati come sistema di controllo delle superfici, incrementandone la manovrabilità e l'efficienza. Sono utilizzabili in alcuni veicoli e non solo, nel caso di qualsiasi corpo affusolato. Questo effetto è molto utile soprattutto nelle traiettorie curvilinee. L'utilizzo di questa tecnologia ha trovato spazio in molti ambiti diversi come ad esempio quello marino o quello eolico.

Il primo caso di utilizzo della tecnologia dei tubercoli è il sottomarino Umpty Squash (**Figura 4.14**), ad azionamento umano, che utilizza timoni posteriori con protuberanze disposte sinusoidalmente. Questo veicolo marino ha partecipato alla competizione di sottomarini *International Submarine Races* tenuta nel 2005 a Bethesda, Maryland.



Figura 4.14: vista dal retro del Umpty Squash (2005) costruito dagli studenti della scuola superiore di Sussex County Technical.



Figura 4.15: modello di aereo jet commerciale con tubercoli sulle ali e sull'impennaggio orizzontale. L'aggiunta di tubercoli potrebbe potenzialmente migliorare la sicurezza e ridurre i costi del carburante.

Un possibile impiego nell'ambito aeronautico è per velivoli che nel loro volo incontrano angoli di assetto (e quindi angoli aerodinamici) della corrente alti, come ad esempio negli aerei che operano in condizioni lower-than-optimum o nelle palette rotoriche di un elicottero. La loro utilità sarebbe massima nelle condizioni di decollo e atterraggio dove gli angoli di attacco raggiunti sono molto alti, e con questa adozione si avrebbe un maggiore controllo della separazione dello strato limite. Questa tecnologia potrebbe portare all'eliminazione delle alette Handley-Page (tipo di ipersostentatore installato con lo scopo di aumentare la velocità di stallo e migliorare la manovrabilità dell'aereo in condizioni di basse velocità) e dei flap (ipersostentatori usati al decollo e all'atterraggio per aumentare la portanza a basse velocità) così da risparmiare molto peso e avere anche benefici economici connessi al consumo di carburante

(un possibile esempio di aereo con tubercoli è stato modellizzato da Fish et al. ed è mostrato in **Figura 4.15**).

Un altro possibile impiego della tecnologia dei tubercoli è nelle palette. Questo vale per palette di qualsiasi tipo, da quelle dei ventilatori per grandi strutture (si è visto che su un modello HVLS con diametro di 24 piedi (7,3 m) l'efficienza è aumentata del 25% e i consumi di energia ridotti di circa il 20%; tutto questo producendo anche il 20% in meno di rumore) alle palette delle turbine, che in questo modo aumenterebbero notevolmente la produzione di energia. Sono molto usate nell'industria eolica con guadagni di energia tutt'altro che trascurabili. Un modello di pala eolica con tubercoli è mostrato in **Figura 4.16**.

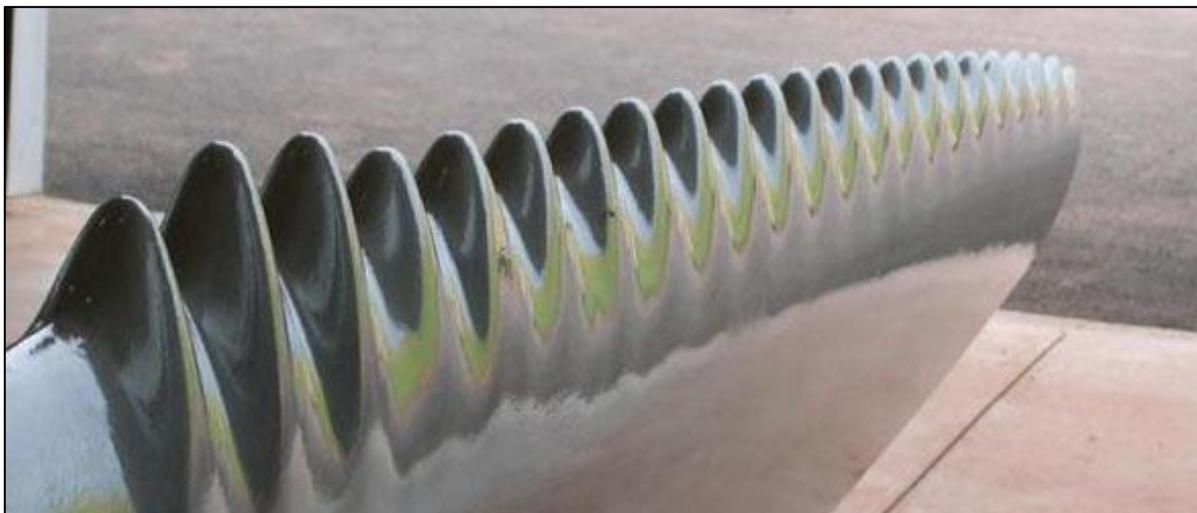


Figura 4.16: un esempio dell'utilizzo della tecnologia dei tubercoli nell'industria eolica. Questa tecnica riduce l'inquinamento acustico e aumenta i guadagni e quindi l'efficienza dell'impianto.

Capitolo 5

Considerazioni Conclusive

Biomimetica è un termine coniato nella prima metà del '900 ad opera di Otto Schmitt e letteralmente significa “imitazione della vita”. La natura ha sempre ispirato la mente dell'uomo infatti la biomimetica si propone di prendere spunto dalla perfezione della vita per migliorare le costruzioni ingegneristiche od inventarne nuove. Una branca molto ampia di questa scienza è la “biomimetica idrodinamica”, nella quale viene studiata la fauna marina con lo scopo di trarre nuovi espedienti per muoversi all'interno di fluidi come l'acqua, ma anche come la stessa aria.

Dunque ci si è proposti di studiare quali sono le manovre e le capacità che utilizzano i pesci nel corso della loro vita per provvedere alla loro sopravvivenza; in particolare sono state analizzate le manovre di fuga ittiche e dei cefaloidi, la percezione dei dintorni attraverso cellule sensoriali e le caratteristiche delle pinne della *Megaptera novaeangliae*.

- Manovre di fuga

L'idrodinamica della fuga è stato oggetto di studio sin dalle prime pubblicazioni di Weihs datate 1973 nel quale vengono citate per la prima volta le fast start. Queste partenze veloci sono tipiche di pesci vertebrati e si distinguono essenzialmente in due tipi: le C-Start e le S-Start, chiamate così per la rispettiva posizione assunta dal pesce dopo la prima fase di contrazione della muscolatura laterale, rispettivamente a forma di C e di S. Questi due tipi di partenze sono state studiate a lungo prima giungere a capire con chiarezza la loro dinamica.

Le *C-start* sono quelle più utilizzate e si possono schematizzare in 3 fasi: una di contrazione, una di deflessione e una di continuazione del moto; durante queste tre fasi si vengono a generare tre anelli vorticosi, ortogonali tra loro, che a loro volta originano tre impulsi: il primo che è opposto alla direzione del moto; il secondo, più consistente, che è la vera e propria causa della spinta; ed infine il terzo che ha un effetto timone e raddrizza il moto dell'animale.

Le *S-start* si distinguono per la loro celerità (durano 100/200 ms) e possono essere o isolate, ovvero caratterizzate da solo una contrazione ed una deflessione, oppure possono ripetersi ciclicamente mediante contrazioni e controdeformazioni, rendendo il moto più continuo.

Gli studi sulle fast start sono diventati sempre più precisi e specifici grazie alla nascita della robotica e all'ottimizzazione dei calcolatori, al punto da poter essere sfruttati in impieghi ingegneristici marini. Alcuni esempi di questi utilizzi sono robot comandati a distanza dediti al trasporto di informazioni, e la progettazione di sottomarini con carenatura mobile e flessibile (non ancora sperimentata).

Anche i movimenti subacquei attraverso cambiamenti di volume costituiscono un importante motivo di interesse ingegneristico. Questa tecnica di movimenti è tipica della classe dei cefaloidi (come polipi, seppie o calamari), molluschi esclusivamente marini, tra i più evoluti. I cefaloidi riescono, grazie alla quasi totale assenza di scheletro, ad iper-flettere la cavità del proprio mantello riempiendola d'acqua, che verrà poi espulsa rapidamente sotto forma di getto propulsivo, ottenendo così grandi accelerazioni. Gonfiando il proprio corpo, il cefaloide assume una forma tozza che gli impedisce di muoversi velocemente all'interno del fluido. Tuttavia gli studi hanno dimostrato delle capacità che rendono realmente interessante il moto di questi esemplari, cioè quella di riuscire a recuperare l'energia trasferita al fluido e quella di ridurre la separazione dello strato limite (che viene così confinato in un piccolo spazio a monte del corpo).

È importante sottolineare che sia in questo caso, sia nel caso delle manovre rapide all'animale conviene muovere la più grande massa di fluido possibile a basse velocità e non viceversa, in quanto a parità di spinta si deve compiere un lavoro minore.

-Percezione dei dintorni

In generale per la sopravvivenza dei pesci e degli animali marini è fondamentale che essi abbiano una tempestiva e accurata percezione dell'ambiente che li circonda. Questa tecnica può essere utile anche nelle attività umane. Le percezioni più precise sono quelle dei pesci e delle foche.

I pesci sfruttano le unità sensitive superficiali (SN) e della linea laterale (CN), chiamate *neuromasti*, per analizzare i campi di velocità e di pressione dei loro dintorni, riuscendo peraltro a formare una mappa tridimensionale delle zone a loro limitrofe. Bio-ispirandosi a questi sono stati progettati tanti sensori di tipo MEMS e NEMS (sistemi micro/nanoelettromeccanici) costruiti con materiali piezoelettrici e piezoresistivi in grado di percepire i valori di pressione, e più raramente di velocità (a causa delle complicità dovute allo strato limite), del fluido nel quale erano immersi.

Le foche invece attraverso i loro baffi, chiamati *vibrisse*, riescono a percepire anche minimi disturbi all'interno del flusso; questo è dovuto alla geometria particolare di tali organi che hanno una forma di scorrimento ondulatoria con una sezione trasversale ellittica di forma variabile.

Questa caratteristica conferisce ai baffi un'alta sensibilità direzionale che permette loro di percepire la direzione delle scie generate da altri animali, anche a grandi distanze; infatti le vibrisse riescono a smorzare le vibrazioni dovute ai vortici soltanto nel caso in cui esse siano allineate alla direzione della scia, è per questo che la foca muove il proprio corpo sino a rilevare la direzione giusta. Questa peculiarità delle foche è stata emulata da sensori bio-ispirati che hanno permesso di misurare tutte le particolarità di una scia, dalla velocità di avanzamento alla circuitazione. Tali sensori sono migliori dei MEMS e NEMS ispirati ai neuromasti, non solo per la loro maggiore precisione ma anche per la maggiore resistenza meccanica.

-Tecnologia dei Tubercoli

Agli albori del nuovo millennio gli studi della biomimetica idrodinamica si sono soffermati su un particolare ordine di animali acquatici: quello dei cetacei che nonostante le notevoli dimensioni, effettuano manovre e movimenti tutt'altro che lenti. Un esemplare che ha attirato a sé molta attenzione è la *Megaptera novaeangliae* a causa della presenza di protuberanze di forma ellittica che si sviluppano sul cosiddetto "bordo d'attacco", facendo una similitudine con il mondo aerodinamico, con frequenza e lunghezza variabile. Queste protuberanze, chiamate tubercoli, sono state oggetto di studi analitici, computazionali e sperimentali in quanto in grado di ritardare l'insorgere del fenomeno dello stallo aerodinamico.

Per metter luce l'effetto dei tubercoli e le ragioni dovute alla loro presenza ci sono voluti molti anni di studio, che hanno portato con sé numerose osservazioni e considerazioni. La presenza dei tubercoli genera, quando il modello frastagliato è immerso in un flusso, la creazione di coppie di vortici controrotanti (counter-rotating vortex pairs, CVP). Questi vortici scambiano energia con lo strato limite che si è formato sul corpo e per questo anticipano la transizione a turbolento, facendo avvenire lo stallo ad angoli critici maggiori.

Questa tecnologia è molto utile nelle aree ingegneristiche che prevedono l'utilizzo di corpi affusolati, progettabili in modo da disegnare i bordi d'attacco con forma sinusoidale. Questi modelli, per esempio, sono già usati per palette utilizzati nell'industria eolica o nel campo dei ventilatori con notevoli guadagni d'energia e diminuzione di inquinamento acustico. Alcuni sottomarini sfruttano questa tecnologia nella costruzione dei timoni posteriori. In ambito aeronautico tutto ciò non ha ancora preso piede materialmente, ma si pensa che questa innovazione possa rimpiazzare gli slat e i flap (ipersostentatori rispettivamente del bordo d'attacco e di fuga) nelle manovre ad alta incidenza, risparmiando così in peso e in costi del combustibile.

- Conclusioni

Le ricerche biomimetiche hanno ancora ampi margini di sviluppo. Questa scienza progredisce di pari passo con le innovazioni tecnologiche, la sua crescita pertanto non è ancora ad un punto di saturazione. I miglioramenti che la società può trarne sono illimitati, e spesso le innovazioni hanno in sé perfino il carattere dell'ecosostenibilità. Non esito pertanto ad affermare che la biomimetica potrà segnare un'importante svolta nel futuro non soltanto dell'ingegneria, ma anche umanitario.

*“Ogni cosa che puoi immaginare la natura l'ha già creata”
Albert Einstein*

Ringraziamenti

Ringrazio anzitutto tutti coloro che hanno contribuito alla stesura di questa tesi, in particolar modo la mia relatrice, nonché professoressa, l'Ing. Stefania Scarsoglio, per avermi affidato un argomento estremamente interessante e concreto, e per aver dimostrato in ogni occasione una grandissima professionalità ornata da un'ampia disponibilità e flessibilità a soddisfare le mie richieste.

Ringrazio inoltre tutti coloro che hanno fatto parte di questo percorso triennale.

Ringrazio tutto il corpo docenti che hanno preso parte alla mia formazione come ingegnere rendendosi sempre disponibili.

Ringrazio tutti i miei amici di vecchia data che mi hanno accompagnato sin dall'inizio di questo viaggio e che hanno dimostrato il loro affetto nei miei confronti non scordandosi di me e facendomi sentire la loro presenza quando ne avevi bisogno.

Ringrazio i miei magnifici compagni "di tutti i giorni" che hanno fatto pesare molto poco una distanza geografica dalle mia terra nativa non trascurabile. In particolare ringrazio i miei cari amici Mikhael, Francesco ed Andrea per non avermi mai voltato le spalle sia all'interno che all'esterno dell'ambiente universitario.

Ringrazio tutta la mia famiglia, in particolare mio padre, mia madre e mio fratello, per avermi sempre sostenuto, per aver creduto in me supportando ogni scelta, lasciandomi spazio e allo stesso tempo standomi vicini, dandomi sempre il consiglio migliore. Senza di loro non sarei mai arrivato qui dove sono adesso.

Ringrazio infine la mia dolce metà, Maria Antonietta, che è riuscita a darmi ogni giorno la forza per lottare e per crederci, spronando a mettere tutto me stesso in ogni cosa che ho fatto. La ringrazio per aver sempre accettato di lasciarmi spazio quando mi serviva, e per aver sacrificato il suo tempo quando avevo bisogno di lei. Sicuramente la sua presenza non è mai stata indifferente o messa in discussione. Senza di lei non ce l'avrei mai fatta.

Insomma, in poche parole ringrazio chi c'era, chi c'è e, soprattutto, chi ci sarà.

Ivan Domenico Barbieri.

Bibliografia

- Michael S. Triantafyllou, Gabriel D. Weymouth, and Jianmin Miao; “*Biomimetic Survival Hydrodynamics and Flow Sensing*”, pubblicato per la prima volta il 16 Luglio 2015 sulla rivista “*Annual Review of Fluid Mechanics*”;
- Paolo Domenici & Robert W. Blake; “*The Kinematics and Performance of Fish Fast-Start Swimming*”, pubblicato per la prima volta il 4 Febbraio 1997 sulla rivista “*The Journal of Experimental Biology*”;
- Michael S. Triantafyllou e George S. Triantafyllou; “*Un robot che simula il nuoto dei pesci*”, pubblicato sulla rivista “*Le scienze*” nel 1995;
- William C. Witt, Li Wen, George V. Lauder; “*Hydrodynamics of C-Start Escape Responses of Fish as Studied with Simple Physical Models*”, pubblicata per la prima volta sulla rivista “*Integrative & Comparative Biology*”, Ottobre 2015;
- G. D. Weymouth, V. Subramaniam, M. S. Triantafyllou; “*Ultra-fast escape maneuver of an octopus-inspired robot*”, 13 Settembre 2014;
- Frank E. Fish, Paul W. Weber, Mark M. Murray, Laurens E. Howle; “*The Tubercles on Humpback Whales' Flippers: Application of Bio-Inspired Technology*”, pubblicato la prima volta sulla rivista “*Integrative & Comparative Biology*” il 14 Maggio 2011;
- Dr. Franke E. Fish, Juliann M. Battle, “*Hydrodynamic design of the humpback whale flipper*”, pubblicato per la prima volta sul giornale “*Morphology*” nel Luglio 1995;
- J. Kim, H.S. Yoon, J.H. Jung, H. Chun e D.W. Park, “*Hydrodynamic characteristics for flow around wavy wings with different wave lengths*”, pubblicato la prima volta sulla rivista “*International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*” nel Dicembre 2012;
- Z. Wei, T.H. New e Y.D. Cui; “*An experimental study on flow separation control of hydrofoils with leading-edge tubercles at low Reynolds number*”, pubblicata la prima volta sulla rivista “*Ocean Engineering*” l'1 Novembre 2015;
- Renzo Arina, “*Fondamenti di Aerodinamica*”, pubblicato ad opera della casa editrice “*Levrotto & Bella*”;