



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento di Ingegneria Industriale DII
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

Simulazione numerica diretta del nuoto dei pesci con
analisi delle performance

Relatore Prof. Francesco Picano
Correlatore Ing. Federico Dalla Barba

Rudelli Matteo 1236484

Anno Accademico 2021/2022

Ringraziamenti

Ringrazio il Professore Francesco Picano, per avermi accompagnato e supportato nel raggiungimento di questo grande traguardo.

Inoltre, un sentito grazie anche al correlatore di tesi, Dott. Federico Dalla Barba, per i continui confronti, per il costante supporto e per aver condiviso con me la passione in questo ambito.

Alla mia famiglia, ai nonni, alla mia complice, ai miei amici, ai miei compagni di università e a tutti coloro che ho incontrato ed hanno contribuito a costruire il mio percorso di vita fino ad oggi. Ringraziare ognuno di voi sarebbe infinitamente lungo, per questo scrivo qui un enorme grazie per ogni vostro piccolo o grande gesto, per ogni attenzione e per ogni cenno che ha contribuito a darmi forza e grinta per portare a termine questo percorso. Spero che i miei riconoscimenti nei vostri confronti possano arrivarvi tramite le mie emozioni, sorrisi, lacrime di gioia ed abbracci.

A mamma e papà, al loro infinito amore, ai loro insegnamenti, al loro importante supporto, alle loro carezze nei momenti del bisogno e alla loro spinta nei periodi difficili; che oggi mi hanno permesso di arrivare fino a qui. Grazie, senza di voi tutto questo non sarebbe stato possibile.

Concludo oggi questo traguardo ma porterò sempre con me un grande bagaglio di ricordi sia positivi che negativi che mi hanno formato e reso la persona che sono oggi.

“Ogni cosa che puoi immaginare, la natura l’ha già creata.”

Albert Einstein

Sommario

I pesci si spostano in acqua nuotando, ovvero mediante il meccanismo di spinta data dalla deformazione del loro corpo. Il meccanismo del nuoto libero di un corpo deformabile in un mezzo è determinato dall'interazione tra la dinamica del corpo e la fluidodinamica non-stazionaria.

Il presente lavoro di tesi ha come obiettivo lo studio e lo sviluppo di un codice in grado di simulare, a livello fluidodinamico computazionale, un corpo in movimento descritto da una deformazione periodica. Si è poi andati ad osservare il comportamento di vari stili di nuotata al variare di parametri che identificano la forma e la deformazione del pesce. Parleremo nel dettaglio di come lo spessore del corpo influisca sulle performance della nuotata libera.

La conclusione che possiamo trarre è che la teoria e la modellazione rimangono centrali per migliorare la nostra comprensione del nuoto ondulatorio ed oscillatorio. Semplici modelli, basati solo sulla massa aggiunta, possono aiutare a fornire una visione appropriata della meccanica del nuoto ondulatorio, ad esempio per animali come anguille e razze. Per comprendere meglio il nuoto dei nuotatori oscillatori, come i tonni ed i delfini, i modelli devono considerare sia le forze dovute alla massa aggiunta che le forze circolatorie, cosa che avviene nel modello utilizzato in questo studio di tesi.

Indice

Elenco delle figure.....	iii
Elenco delle tabelle.....	ix
Introduzione.....	1
Obiettivo del lavoro di tesi.....	1
Capitolo 1 Contesto scientifico	4
Considerazioni iniziali	6
Stili di nuotata.....	7
Struttura della scia.....	10
Nuotata ondulatoria ed oscillatoria	13
L'impatto della deformazione del corpo	14
Importanza del contraccolpo	15
Misura delle performance	17
Capitolo 2 Metodologia	19
Cenni riguardo la CFD.....	19
Caratteristiche delle mesh	21
Le equazioni che governano e le condizioni al contorno	21
Adimensionalizzazione delle equazioni di Navier-Stokes.....	23
Il metodo numerico.....	24
Accoppiamento Fluido-Struttura	24
IBM.....	25

Cinematica del corpo e parametri non dimensionali.....	25
Setup delle simulazioni numeriche e dettagli computazionali.....	29
Calcolo delle forze e dell'efficienza.....	31
Visualizzazione della scia.....	33
Capitolo 3 Risultati numerici e discussione.....	34
Analisi delle performance in funzione dello spessore del corpo.....	35
Struttura della scia.....	63
Scia di Von Karman inversa.....	69
Capitolo 4 Considerazioni finali.....	73
Capitolo 5 Bibliografia.....	78

Elenco delle figure

Figura 1: Esempio dei quattro tipi di nuotatori: (a) nuotatore oscillatore; (b) nuotatore ondulatore; (c) nuotatore pulsatile; (d) nuotatore drag-based.	8
Figura 2: Profilo Naca0004 rappresentato in 4 istanti temporali lungo un ciclo di pinneggiata di un cinematiso del tipo anguilliforme.	9
Figura 3: Profilo Naca0004 rappresentato in 4 istanti temporali lungo un ciclo di pinneggiata di un cinematiso del tipo carangiforme.....	10
Figura 4: (a) Frequenza e (b) Ampiezza non dimensionale, in funzione della velocità di nuoto specifica sulla lunghezza del corpo per diversi cetacei. I grafici sono ripresi da [30] che a sua volta cita i dati originali di [40] e i grafici di [41].....	11
Figura 5: Scia di Von Kàrmàn inversa per un profilo Naca0012 con cinematiso di tipo carangiforme. $Re^* = 8171$ e $St^* = 0.20$. Si può osservare il campo di vorticità generata dal pesce. Osserviamo inoltre i Thresold per la variabile Q (la quale permette la visualizzazione della scia), i quali si attivano nelle zone più intense di vorticità.....	12
Figura 6: Quattro categorie classiche di propulsione ondulatoria dei pesci illustrate con i contorni del corpo e le linee medie derivate da recenti dati sperimentali. I profili dei pesci che nuotano sono mostrati sopra con spostamenti che illustrano la progressione in avanti. Le linee medie, invece, sono mostrate a destra e rappresentano, ad intervalli di tempo equidistanti, la posizione della linea media durante un battito di coda. Tutti i pesci avevano una lunghezza totale compresa tra 20 e 25 cm (L) e nuotavano ad una velocità simile (da 1,6 a 1,8 L/s). I tempi mostrati sotto indicano la durata del battito di coda. La lunghezza di scala che si può vedere è di 2cm. (Immagine presa da Smits [30]).	13

Figura 7: Sviluppo della linea media per le varie tipologie di deformazioni descritte sopra. Sotto invece possiamo vedere la loro deformazione corrispondente corretta con il contraccollo.	15
Figura 8: Sviluppo di ampiezza lungo la corda del profilo (x) per i cinematismi di tipo anguilliforme (azzurro) e carangiforme (arancione). Con x pari a zero ci si riferisce alla testa del pesce, con x pari ad uno alla coda.	27
Figura 9: Corda media delle due tipologie di cinematismi di nuotata. Il primo grafico rappresenta la corda media nel tempo di uno stile Carangiforme, il secondo grafico rappresenta quello anguilliforme. h è lo scostamento laterale della linea media.	28
Figura 10: Tipologie di profilo studiate, queste figure rappresentano i vari spessori simulati ed in questo caso le immagini vengono prese per il cinematismo di tipo carangiforme.	35
Figura 11: Grafico che rappresenta, per il cinematismo di tipo sintetico, l'andamento della velocità stazionaria media una volta che il pesce ha raggiunto la velocità di crociera, rispetto al rapporto spessore su lunghezza del corpo.	36
Figura 12: Grafico che rappresenta, per il cinematismo di tipo carangiforme, l'andamento della velocità stazionaria media una volta che il pesce ha raggiunto la velocità di crociera, rispetto al rapporto spessore su lunghezza del corpo.	37
Figura 13: Grafico che rappresenta, per il cinematismo di tipo anguilliforme, l'andamento della velocità stazionaria media una volta che il pesce ha raggiunto la velocità di crociera, rispetto al rapporto spessore su lunghezza del corpo.	37
Figura 14: Grafico che rappresenta il guadagno sulla velocità di crociera andando ad aumentare il numero di Reynolds di riferimento per la simulazione. Confronto tra $Re0 = 1000$ e $Re0 = 4000$	40

Figura 15: Rappresentazione del campo di vorticità prodotto da un profilo snello ed uno tozzo, aventi entrambi il cinematismo di tipo carangiforme. Si può notare che le vorticità generate dal corpo tozzo risultano essere più intense rispetto a quelle presenti nella scia del corpo snello.	41
Figura 16: Grafico che rappresenta, per Reynolds 1000, l'andamento della velocità di crociera in relazione con lo spessore del corpo (h/L) confrontando le tre tipologie di cinematismo prese in esame.	42
Figura 17: Grafico che rappresenta, per Reynolds 4000, l'andamento della velocità di crociera in relazione con lo spessore del corpo (h/L) confrontando le tre tipologie di cinematismo prese in esame.	43
Figura 18: Perdita percentuale della velocità di crociera per un corpo tozzo (Naca0024) rispetto ad un corpo snello (Naca0004).	44
Figura 19: Grafico che rappresenta la differenza tra velocità massima e minima una volta che il pesce ha raggiunto la velocità di crociera. – Cinematismo sintetico.	45
Figura 20: Grafico che rappresenta la differenza tra velocità massima e minima una volta che il pesce ha raggiunto la velocità di crociera. – Cinematismo carangiforme.	46
Figura 21: Grafico che rappresenta la differenza tra velocità massima e minima una volta che il pesce ha raggiunto la velocità di crociera. – Cinematismo anguilliforme.	46
Figura 22: Andamento del numero di St^* al variare del rapporto spessore su lunghezza caratteristica per i casi con Reynolds 1000 e 4000. Cinematismo di tipo sintetico.	49
Figura 23: Andamento del numero di St^* al variare del rapporto spessore su lunghezza caratteristica per i casi con Reynolds 1000 e 4000. Cinematismo di tipo carangiforme.	50

Figura 24: Andamento del numero di St^* al variare del rapporto spessore su lunghezza caratteristica per i casi con Reynolds 1000 e 4000. Cinematismo di tipo anguilliforme.	50
Figura 25: Andamento del numero di St^* al variare del rapporto spessore su lunghezza caratteristica confrontando le tre diverse tipologie di cinematismo nel caso di Reynolds pari a 1000.....	51
Figura 26: Andamento del numero di St^* al variare del rapporto spessore su lunghezza caratteristica confrontando le tre diverse tipologie di cinematismo nel caso di Reynolds pari a 4000.....	51
Figura 27: Rendimento di propulsione per il cinematismo di tipo sintetico all'aumentare dello spessore.....	55
Figura 28: Rendimento di propulsione per il cinematismo di tipo carangiforme all'aumentare dello spessore.	56
Figura 29: Andamento delle due potenze che definiscono il rendimento. P_0 si riferisce alla potenza che è necessario spendere per tenere un profilo immobile fisso in un punto alla velocità di crociera raggiunta dallo stesso profilo mentre nuota. P_+ si riferisce alla potenza spesa dal pesce per mantenere la velocità di crociera raggiunta. – Caso Carangiforme, Reynolds 4000.....	57
Figura 30: Rendimento di propulsione per il cinematismo di tipo anguilliforme all'aumentare dello spessore.	58
Figura 31: Andamento delle due potenze che definiscono il rendimento. P_0 si riferisce alla potenza che è necessario spendere per tenere un profilo immobile fisso in un punto alla velocità di crociera raggiunta dallo stesso profilo mentre nuota. P_+ si riferisce alla potenza spesa dal pesce per mantenere la velocità di crociera raggiunta. – Caso Anguilliforme, Reynolds 4000.....	59
Figura 32: Rendimento per Reynolds 1000 all'aumentare dello spessore. A confronto vediamo i tre diversi cinematismi.....	60

Figura 33: Rendimento per Reynolds 4000 all'aumentare dello spessore. A confronto vediamo i tre diversi cinematismi.	61
Figura 34: Rendimento per Reynolds 1000 preso in esame il profilo Naca0012. A confronto vediamo i tre diversi cinematismi.	62
Figura 35: Rendimento per Reynolds 4000 preso in esame il profilo Naca0012. A confronto vediamo i tre diversi cinematismi.	62
Figura 36: Reynolds pari a 4000 – Cinematismo carangiforme – Naca0004 – Campo di vorticità.....	64
Figura 37: Reynolds pari a 4000 – Cinematismo carangiforme – Naca0024 – Campo di vorticità.....	64
Figura 38: Reynolds pari a 4000 – Cinematismo anguilliforme – Naca0004 – Campo di vorticità.....	65
Figura 39: Reynolds pari a 4000 – Cinematismo anguilliforme – Naca0024 – Campo di vorticità.....	65
Figura 40: Reynolds pari a 4000 – Cinematismo sintetico – Naca0004 – Campo di vorticità.....	66
Figura 41: Reynolds pari a 4000 – Cinematismo sintetico – Naca0024 – Campo di vorticità.....	66
Figura 42: Reynolds pari a 1000 – Cinematismo anguilliforme – Naca0004 – Campo di vorticità.....	67
Figura 43: Reynolds pari a 1000 – Cinematismo anguilliforme – Naca0024 – Campo di vorticità.....	67
Figura 44: Reynolds pari a 4000 – Cinematismo carangiforme – Naca0012 – Threshold della variabile Q e Campo di vorticità.....	68
Figura 45: Reynolds pari a 4000 – Cinematismo anguilliforme – Naca0012 – Threshold della variabile Q e Campo di vorticità.....	68

Figura 46: Reynolds pari a 4000 – Cinematismo sintetico – Naca0012 – Threshold della variabile Q e Campo di vorticità.....	68
Figura 47: Velocità lungo x nel tempo con la pulsazione che cambia da $\omega_1 = 10 \text{ rad s}^{-1}$ a $\omega_2 = 5 \text{ rad s}^{-1}$. Grafico preso da Panniccia [62].....	70
Figura 48: (a) Fase di accelerazione con la struttura della scia del tipo “reverse Karman street”; (b) Fase di decelerazione con la struttura della scia del tipo “Karman street”. Immagine presa da Panniccia [62].	70
Figura 49: Grafico che rappresenta la velocità assoluta del pesce rispetto al tempo. Nella prima fase di accelerazione, il periodo di oscillazione della coda è pari a 0.25, arrivati poi a velocità di crociera viene aumentato il periodo di oscillazione a 0.35 facendo sì che il pesce subisca una decelerazione fino ad arrivare ad una nuova velocità di crociera.	71
Figura 50: Figura che rappresentano il campo di vorticità lungo l’asse uscente dal foglio. La figura in alto è un’istantanea del campo durante la fase di accelerazione del profilo. La figura in basso, invece, è un’istantanea del campo durante la fase di decelerazione.	72

Elenco delle tabelle

Tabella 1: Indici delle rette che interpolano i punti definiti dalle velocità di crociera e dal rapporto spessore su lunghezza del corpo. Risulta interessante notare il valore del coefficiente R al quadrato che in prima approssimazione possiamo considerare unitario.	38
Tabella 2: Velocità di crociera medie in confronto tra differenti numeri di Reynolds. Si può notare un guadagno in percentuale sempre positivo all'aumentare del numero di Reynolds.	39
Tabella 3: Confronto tra corpo snello e corpo tozzo per quanto riguarda le velocità medie di crociera. In tutti i casi ci aggiriamo intorno a perdite di 36 punti percentuali per il corpo tozzo (Naca0024) rispetto al corpo snello (Naca0004).	43
Tabella 4: Tabella che rappresenta i valori di differenza tra la velocità massima e minima raggiunta la velocità di crociera.	47
Tabella 5: Valori di Re^* e St^* adimensionalizzati con U^*	48
Tabella 6: Efficienza di Froude calcolata attraverso il modello EBT per i vari casi analizzati durante lo studio in esame.	53
Tabella 7: Valori del rendimento (P_0/P_+) per tutti i casi analizzati.	63

Introduzione

La fluidodinamica della propulsione subacquea è un'area di ricerca che ha portato a numerose collaborazioni tra biologi e ingegneri e che ha inoltre favorito numerose indagini sperimentali e simulazioni numeriche. Gli studi hanno contribuito ad approfondire la comprensione della biologia riguardante i pesci ed i mammiferi acquatici e hanno dato ispirazione allo sviluppo di nuovi sistemi innovativi sottomarini. Questo livello di attenzione è stato guidato, almeno in parte, dalla grazia e dalla bellezza di molti animali mentre nuotano. Infine, vi è una grande possibilità che l'evoluzione abbia portato a meccanismi propulsivi sempre più efficienti, manovrabili e più silenziosi di quelli attualmente in uso nelle applicazioni marine.

Obiettivo del lavoro di tesi

Questo lavoro di tesi è stato avviato per far fronte a due principali necessità, una di carattere ingegneristico, l'altra di carattere prettamente biologico. Dal punto di vista ingegneristico sono di particolare interesse la forma e il movimento dei pesci che hanno raggiunto un alto livello di ottimizzazione grazie ad una lunghissima fase evolutiva. In questo ambito si riscontra la necessità di capire le dinamiche che stanno alla base della nuotata, cioè che caratteristiche o che condizioni permettano ad un corpo immerso in un fluido di essere più efficace e quali invece più efficiente. Si tratta, in sostanza, di individuare quali stili di nuotata consentano ad un corpo immerso in un fluido di andare più veloce e quali consentano al corpo di coprire la maggior distanza con il minor dispendio di energia. Attraverso questo lavoro di tesi, è stato possibile affinare un modello in grado di darci delle risposte in termini di velocità raggiunte e di potenza

consumata, in modo da poter capire, in un secondo momento, che direzione prendere in una prima fase di progettazione.

Per quanto riguarda le necessità di carattere biologico, si tratta di capire come i pesci possano essere ostacolati dai sempre più frequenti interventi dell'uomo sul territorio che creano danni ambientali e quindi situazioni artificiali non compatibili con la vita naturale. Un esempio di come l'intervento umano rappresenti un pericolo per gli habitat della fauna acquatica riguarda la fase di riproduzione dei pesci di fiume. È noto che certe specie di pesci hanno la necessità di risalire i fiumi per potersi riprodurre. D'altro canto però, il forte bisogno che al giorno d'oggi ci spinge a cercare di ottenere energia da fonti rinnovabili, come quella idroelettrica, rischia di ostacolare il naturale corso di vita della ittiofauna fluviale. È sorta quindi la necessità di capire come sia possibile conciliare le esigenze dell'uomo di ottenere energia da corsi d'acqua e il naturale ciclo della vita dei pesci che li abitano. Per ottenere questo devono essere realizzati degli appositi condotti di risalita ai lati delle centrali idroelettriche e degli interventi idraulici ittiocompatibili che rispettino, cioè, le necessità, le abitudini e il comportamento dei pesci permettendo loro di risalire la corrente senza particolari problemi.

L'obiettivo di questi studi, dei quali si propone di far parte anche questo lavoro, è quello di comprendere le dinamiche che stanno alla base della nuotata dei vari pesci per progettare dei condotti di risalita ottimizzati, in grado di permettere il naturale ciclo della vita. Attualmente alcuni studi testimoniano come una grande quantità di pesci non siano in grado, in un primo momento, di trovare il condotto a loro dedicato e, in un secondo momento, di avere le energie o le potenzialità per risalirlo. Lo studio fluidodinamico a livello ingegneristico può sicuramente dare delle risposte utili per miglioramenti anche in questo ambito. Ad esempio, conoscendo le caratteristiche del pesce, si potrà capire la quantità di energia consumata per risalire un condotto forzato, avente una corrente contraria ad una determinata velocità. Di conseguenza, in base alla tipologia di pesce preso in esame, si potrà capire come progettare al meglio il condotto a lui dedicato.

Gli animali acquatici forniscono, anche, una grande fonte di ispirazione per la progettazione di dispositivi robotici subacquei che seguono le leggi della locomozione biologica. Un gran numero di scienziati ed ingegneri si ispirano a pesci per costruire veicoli subacquei. Attualmente, la tecnologia non è ancora in grado di imitare tutte le caratteristiche della locomozione dei pesci sviluppate durante un lungo periodo di evoluzione, dato che questa locomozione è molto complessa. I pesci nuotano usando le forze di interazione tra le ondulazioni dei loro corpi e l'acqua circostante. La spinta è generata da due modalità di propulsione distinte, propulsione ondulatoria e propulsione oscillatoria. La propulsione ondulata sembra essere la soluzione più promettente per i veicoli subacquei utilizzati, ad esempio, nei sistemi di sicurezza sottomarini. Le caratteristiche più importanti di questo tipo di propulsione sono la sua bassa rumorosità, la migliore efficienza energetica, la bassa turbolenza dell'acqua e la possibilità di mimetizzarsi con il resto della fauna [1]. Appare quindi evidente che alla base della realizzazione di questo tipo di veicoli biomimetici si trovano studi fluidodinamici dei quali questo lavoro fa parte.

Questo studio di tesi, in particolare, andrà ad approfondire nel dettaglio il ruolo che lo spessore del corpo gioca nell'efficacia e nell'efficienza della nuotata.

Capitolo 1 Contesto scientifico

La letteratura che circonda questo campo è molto vasta. Tutto ebbe inizio dalle prime osservazioni di Leonardo da Vinci, più di cinquecento anni fa (es. *Atlanticus Codex folio 571 A recto*). Duecento anni dopo, Borrelli, un altro scienziato italiano, analizzò il movimento dei pesci in un modo molto dettagliato. Nel suo libro “De motu animalium” descrive e valorizza il ruolo fondamentale della coda. A partire dalla fine del XIX secolo, sono state intraprese ricerche più dettagliate per classificare le varie specie di pesci, in termini di coda, appendici laterali e movimenti del corpo necessari alla loro propulsione. Un gran vantaggio è stato dato, nella prima metà del secolo scorso, dal lavoro sperimentale di Gray J. [2], che ha spiegato per la prima volta la cinematica della nuotata. Nel suo studio mostra e definisce le regole essenziali che descrivono l'onda generata dal pesce. Partendo da questo lavoro, Taylor G. [3] ha formulato un modello di grande successo, chiamato modello resistivo, adatto per la nuotata dominata dalle forze viscosi. Al contrario, Lighthill M. [4] e Wu T. [5] hanno proposto separatamente un approccio teorico per studiare le caratteristiche della nuotata dominata da effetti inerziali (modello reattivo), perciò, nuotate dominate da flussi non viscosi. Per lo sviluppo dei loro modelli hanno considerato un corpo allungato con una deformazione prescritta che si muoveva dalla testa alla coda con una velocità V . Il corpo poi era immerso in acqua contro una corrente a velocità costante U , leggermente inferiore a V . Gli scienziati in un modo molto intuitivo hanno previsto la potenza trasmessa dal corpo al fluido circostante, che è anche la potenza trasferita alla scia. In seguito, dall'equilibrio complessivo hanno determinato la forza propulsiva necessaria per contrastare la resistenza dovuta all'avanzamento nel mezzo. Il loro obiettivo, in sostanza, era quello di trovare la spinta di un corpo deformabile, attraverso una formulazione opportunamente semplificata ed ingegnosa, per consentire la stima dell'efficienza di Froude del nuotatore. Il loro modello, descritto successivamente in diversi articoli, sottolinea il ruolo fondamentale della massa aggiunta. Essa contribuisce al

trasferimento di energia al fluido, permettendo la produzione di spinta e la generazione della scia vorticoso. Successivamente al loro lavoro, uscirono un gran numero di articoli che descrivevano molte tecniche sperimentali e metodi numerici. Essi prendevano in considerazione un corpo deformabile fissato nella sua posizione in un flusso uniforme oppure legato, con velocità di moto opposta in un liquido quiescente. Tra i contributi sperimentali cito Lauder T. [6], che ha fornito una descrizione dei principali assetti sperimentali, Tytell E. [7], che ha confrontato i dati ottenuti da uno studio attraverso PIV (Particle Image Velocimetry) con le stime fornite da Lighthill [4] e Wolfgang [8], per l'uso combinato dei risultati sperimentali e numerici. Tra i contributi di carattere numerico si può citare Dong L. [9], che ha riprodotto le condizioni proposte da Lighthill e Wu per un flusso viscoso. Pochi anni dopo, Borazjani I. [10], suggerì di trovare, per una data velocità, la condizione di equilibrio per una nuotata autonoma. In alcuni articoli, le reazioni di contraccolpo, introdotte da Lighthill per soddisfare le equazioni di equilibrio, sono state riconosciute come un punto di cruciale importanza per una corretta valutazione dell'efficienza della nuotata. Si veda ad esempio Reid [11] e Maertens [12]. Un approccio alternativo, in termini di componenti di velocità del centro di massa come incognite, è stato originariamente introdotto da Saffman P. [13] e successivamente adottato da Carling [14]. Sulla stessa linea di ragionamento Kern S. [15] ha esteso la procedura per trovare soluzioni ottimali per flussi 3D e Kanso E. [16] ha ottenuto le variabili di locomozione del centro di massa del nuotatore, applicando direttamente la conversione della quantità di moto totale. In realtà, il sistema Fluido-Struttura deve essere preso in considerazione con particolare attenzione allo scambio di forze interne (vedi Eldredge J. [17]), per poter studiare un corpo semovente immerso in un fluido. A causa del fatto che resistenza e spinta si controbilanciano, l'efficienza di Froude deve essere sostituita da altre misure. Questo perché non è facile calcolare la potenza di propulsione, non avendo la spinta generata dal pesce. Il costo di trasporto (COT: cost of transport), ovvero l'inverso del noto km/litro, utilizzato per le auto ed altri veicoli [18], è dato dal rapporto tra l'energia

spesa e la distanza percorsa, oppure dal rapporto tra la potenza e la velocità mediate in più cicli di nuotata. Dopo questa scoperta, una grande produzione scientifica è uscita nell'ultimo decennio con il focus principale sul COT della nuotata libera per diverse specie, aventi differenti forme e diversi stili di nuotata (vedi Maertens Y. [19], Borazjani [20]). Attenzione particolare è stata portata ai parametri dell'efficienza ed ai differenti contributi energetici spesi durante la nuotata [21]. Infine, un gran numero di documenti si basa sulla soluzione combinata della dinamica del corpo deformabile e delle equazioni di Navier-Stokes per flussi viscosi incomprimibili attraverso diversi metodi di calcolo (vedi Yang Yan [22], Gazzola [23], Bhalla [24]). Una completa rassegna degli approcci più comuni è fornita in diversi libri, ad esempio da Webb [25] e Videler [26] ed in molti articoli di riviste, ad esempio Lighthill [27], Wu [28], Lauder [29], Smits [30].

Considerazioni iniziali

I punti principali da tenere in considerazione sono facilmente riassumibili grazie ad uno studio approfondito che racchiude tutte le precedenti scoperte scientifiche. Per quanto riguarda la propulsione subacquea, fondamentali sono le seguenti affermazioni:

- i. Le forze interne scambiate dal corpo con il fluido circostante, cioè la spinta e la resistenza sono reciprocamente intrecciate, non sono chiaramente identificabili;
- ii. La traiettoria reale deve tenere conto di tutte le reazioni di contraccolpo, introdotte dalla deformazione prescritta del corpo principale;
- iii. La soluzione dell'interazione fluido-struttura dovrebbe essere risolta considerando il sistema completo di equazioni con le variabili cinematiche come output del problema;

- iv. Le misure di efficienza standard non sono facili da definire, poiché la spinta non è disponibile per una nuotata libera stazionaria e il CoT deve essere usato;
- v. L'ondulazione forzata è caratterizzata da una velocità di fase che influenza il valore asintotico dello stato stazionario della velocità di locomozione e la posizione del rilascio di vortici lungo la scia.

Tutte queste considerazioni stanno alla base del modello utilizzato per lo studio di tesi. Iniziando da un semplice modello bidimensionale, l'obiettivo è quello di realizzarne uno tridimensionale per avvicinarci alla realtà dei fatti. Considereremo il moto transitorio in accelerazione da fermo, ma soprattutto i movimenti in condizioni di crociera. Quest'ultima dovrebbe essere la condizione più efficiente, in quanto è la modalità scelta dai pesci per il nuoto sostenuto (vedi Fish e Rohr [31] e Triantafyllou [32]).

Un secondo scopo è quello di provare a mettere in comunicazione studi di carattere biologico con studi di carattere fluidodinamico. I biologi che osservano il comportamento dei pesci studiano ad esempio come essi reagiscano una volta che devono risalire in un condotto forzato. Questo viene creato artificialmente per permettere la risalita dei fiumi in presenza di una centrale idroelettrica, per esempio. Si tratta di studi svolti a livello probabilistico attraverso una conoscenza sperimentale delle grandezze in gioco di carattere fluidodinamico in prossimità del pesce. Recentemente in dipartimento è iniziata una collaborazione tra i due gruppi di ricerca per capire meglio a livello fluidodinamico le varie grandezze in gioco. Tutto questo per capire e riuscire a progettare migliori condotti per la risalita dei pesci.

Stili di nuotata

La biologia è ricca di complessità, vi è una vasta gamma di morfologie corporee e stili di nuotata. Una distinzione primaria può essere effettuata tramite il numero di Reynolds. Quando sono le forze viscosse a dominare,

la propulsione richiede un movimento particolare che rompe la simmetria, come conseguenza della linearità delle equazioni di governo. Anche per quanto riguarda i pesci molto piccoli, con lunghezze che si aggirano attorno al millimetro, si devono adottare dei movimenti particolari. Per pesci un po' più grandi, di circa 10mm, che nuotano ad una lunghezza del corpo al secondo, il numero di Reynolds supera 100 e i movimenti reciproci diventano la forma dominante di propulsione.

Per questi organismi, si possono identificare quattro principali tipi di nuotatori: ondulatori, oscillatori, pulsatili e basati sulla resistenza, come possiamo vedere in figura 1. I nuotatori ondulatori sono animali che generano un'onda viaggiante lungo il loro corpo oppure animali che utilizzano la loro pinna per spingere il fluido indietro. Tra questi troviamo le anguille, le lamprede ed alcune razze. I nuotatori oscillatori, come il salmone, il tonno, i delfini e gli squali, si spingono principalmente utilizzando una pinna caudale semirigida. Gli animali, invece, che prendono periodicamente un volume d'acqua e poi lo scaricano impulsivamente per produrre spinta sono chiamati nuotatori pulsatili, come per esempio, le meduse, i calamari, i pesci rana ed alcuni molluschi (Fish [33] e Dabiri [34]). Infine, i nuotatori che sfruttano la resistenza, come noi umani, sono le tartarughe, le foche e le anatre. Essi spingono un corpo tozzo come una pinna rigida attraverso il fluido per generare spinta [35].

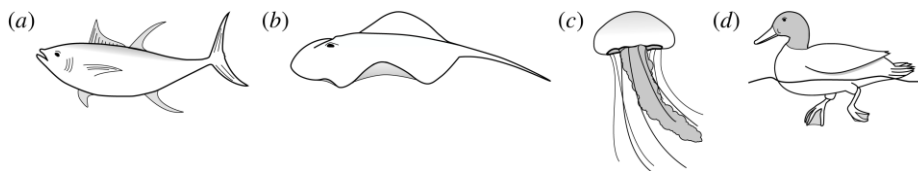


Figura 1: Esempio dei quattro tipi di nuotatori: (a) nuotatore oscillatore; (b) nuotatore ondulatore; (c) nuotatore pulsatile; (d) nuotatore drag-based.

In questo studio si approfondiranno i nuotatori ondulatori ed oscillatori, che usano il moto del corpo e/o la pinna in coda. Nella definizione convenzionale, nuotatori anguilliformi come le anguille generano un'onda viaggiante di ampiezza crescente lungo tutto il corpo. Invece, nuotatori

come il tonno e lo sgombro, tendono a tenere rigida la parte anteriore del corpo e solo la parte posteriore è utilizzata per la propulsione. Questo stile di nuotata necessita però una grande pinna caudale ad alto rapporto d'aspetto (Lindsey [36], Sfakiotakis [37]). È possibile fare un'ulteriore distinzione tra nuotatori oscillatori rispetto ai nuotatori ondulatori in questo modo: in generale i nuotatori ondulatori mostrano una lunghezza d'onda, della deformazione corporea, più corta rispetto alla loro lunghezza; i nuotatori oscillatori, al contrario, mostrano una lunghezza d'onda maggiore rispetto alla lunghezza del corpo. Nella figura 2 possiamo vedere da una semplice rappresentazione in alto un profilo deformato con cinematica di tipo anguilliforme, in basso con cinematica di tipo carangiforme.

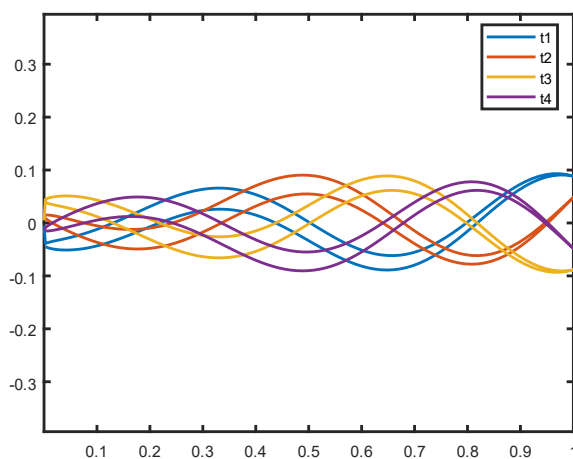


Figura 2: Profilo Naca0004 rappresentato in 4 istanti temporali lungo un ciclo di pinneggiata di un cinematisimo del tipo anguilliforme.

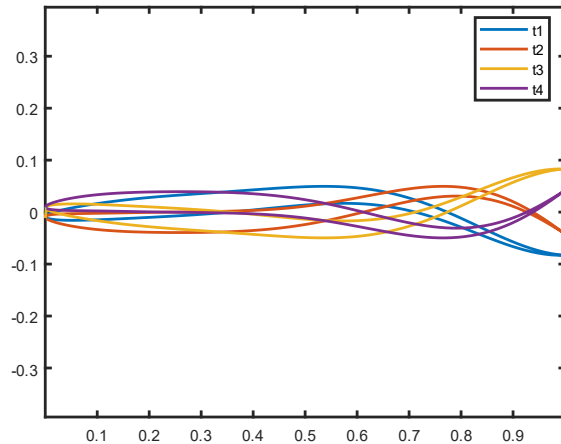


Figura 3: Profilo Naca0004 rappresentato in 4 istanti temporali lungo un ciclo di pinneggiata di un cinematismo del tipo carangiforme.

Come detto prima, si può vedere che il cinematismo di tipo anguilliforme ha una lunghezza d'onda decisamente più piccola rispetto a quella del carangiforme.

Struttura della scia

La struttura idrodinamica della scia è determinata dal numero di Reynolds, dalla frequenza adimensionale e dall'ampiezza adimensionale dell'oscillazione del corpo. La frequenza adimensionale è tipicamente espressa sia come numero di Strouhal St , sia come frequenza ridotta k . Abbiamo $St = 2af/U$ e $k = fc/U$, dove a è l'ampiezza di oscillazione della coda, f è la frequenza di oscillazione ($f = 1/T = \omega/2\pi$), U è la velocità del centro di massa del pesce e c è una lunghezza caratteristica, come la lunghezza del corpo o la corda della pinna caudale.

Triantafyllou ha analizzato le prestazioni della nuotata di un'ampia varietà di pesci e mammiferi e ha scoperto che la maggior parte di essi nuota nell'intervallo di numeri di Strouhal che va da 0,2 a 0,35 [38]. Questa osservazione conferma studi precedenti (come Bainbridge R. [39]) che dimostrano come i pesci tendono ad aumentare la loro velocità aumentando la frequenza di ondulazione della coda e mantenendo l'ampiezza costante (tipicamente è del 15-20% della lunghezza del corpo).

Facendo così, i pesci tendono a mantenere il numero di Strouhal costante. Risultati analoghi sono stati ritrovati da Fish e Rohr [31] per il nuoto dei cetacei (si veda figura 4).

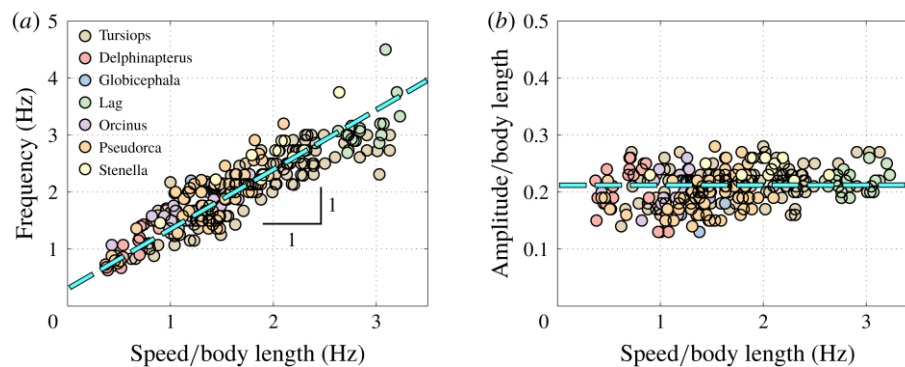


Figura 4: (a) Frequenza e (b) Ampiezza non dimensionale, in funzione della velocità di nuoto specifica sulla lunghezza del corpo per diversi cetacei. I grafici sono ripresi da [30] che a sua volta cita i dati originali di [40] e i grafici di [41].

Triantafyllou ha fatto due ulteriori osservazioni [38]:

- L'efficienza di un profilo che flappeggia e beccheggia mostra un picco di efficienza per un intervallo ottimale ($0.2 \leq St \leq 0.35$).
- Il profilo di velocità media nella scia assomiglia ad un getto.

Triantafyllou ha poi concluso che i pesci nuotano in questo particolare intervallo di numeri di Strouhal perché corrisponde alla frequenza di amplificazione massima; quindi, ci si aspetta che la propulsione sia più efficiente [38]. Inoltre, nota che la struttura della scia prodotta dalla propulsione somiglia alla scia di Von Karman inversa [42]. Questa scia invece di produrre resistenza all'avanzamento, come la scia di Von Karman, produce spinta dal momento che i segni dei vortici sono invertiti. Nello studio in esame non sono stati considerati gli effetti sul numero di Reynolds, probabilmente perché i numeri di Reynolds per questo set di dati erano relativamente alti (da 10^4 a circa 10^6 in base alla lunghezza del corpo). Tuttavia, gli effetti viscosi possono continuare ad essere importanti anche a numeri di Reynolds molto alti (vedi Smits A. [30]).

Questa opinione, che il modello di scia di strada di von Kàrmàn inversa corrisponda alla modalità di nuoto più efficiente, e che sia tipica dei pesci in crociera, è ancora ampiamente diffusa. Negli anni '90, tuttavia, non era semplice capire il comportamento della scia di von Kàrmàn inversa e fu solo con l'avvento della PIV (Particle image velocimetry) che i modelli di vortice prodotti dai pesci poterono essere esaminati in dettaglio (si veda Muller [43], Drucker [44], Lauder [45]). Un esempio di scia generata da un pesce a velocità di crociera può essere visto in figura 5.

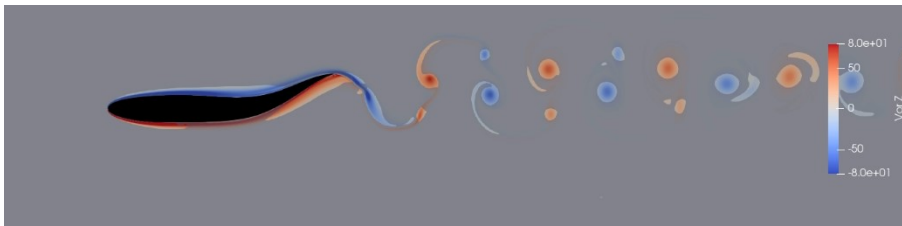


Figura 5: Scia di Von Kàrmàn inversa per un profilo Naca0012 con cinematisimo di tipo carangiforme. $Re^ = 8171$ e $St^* = 0.20$. Si può osservare il campo di vorticità generata dal pesce. Osserviamo inoltre i Threshold per la variabile Q (la quale permette la visualizzazione della scia), i quali si attivano nelle zone più intense di vorticità.*

È chiaro che differenti scie sono possibili e si può dire che una nuotata efficiente non è necessariamente limitata ad un particolare modello di scia [30]. Questa visualizzazione del pattern della scia tende ad ignorare il fatto che le scie dei pesci sono altamente tridimensionali. Come descrive bene Lighthill [27], la vorticità diffusa dalla parte centrale della pinna caudale è molto maggiore di quella che può essere rilasciata dalle punte esterne. La scia di von Kàrmàn inversa è vista solo in una particolare sezione trasversale (vedi Videler J. [26]). Perciò, studi svolti a livello bidimensionale non sono direttamente traducibili in effettive scie di pesci. Più avanti si vedrà che è necessario trattare la struttura della scia e le performance della nuotata (spinta, potenza ed efficienza), come due argomenti differenti ma interconnessi in quanto non vi è un evidente collegamento tra di loro. Possiamo citare anche Zhang J. [46], nel contesto di un'ala che sbatte. Egli ha visto che esaminare la scia è molto simile a guardare le impronte di animali terrestri. Sebbene alcune informazioni possano essere raccolte dalla scia, non raccontano l'intera storia. Allo

stesso modo Taylor [47] scrive che una spiegazione dell'efficienza propulsiva data solo in termini di scia sembra un po' incompleta. Suggestisce poi che lo sviluppo efficiente della scia può essere una conseguenza, piuttosto che una causa di propulsione efficiente [48] (Si veda anche Floryan [49]).

Nuotata ondulatoria ed oscillatoria

Per confrontare gli stili di nuotata dei nuotatori ondulatori e oscillatori, osserviamo come cambia la forma della linea media del corpo durante un periodo di oscillazione. I risultati sono mostrati per un certo numero di specie diverse in figura 6.

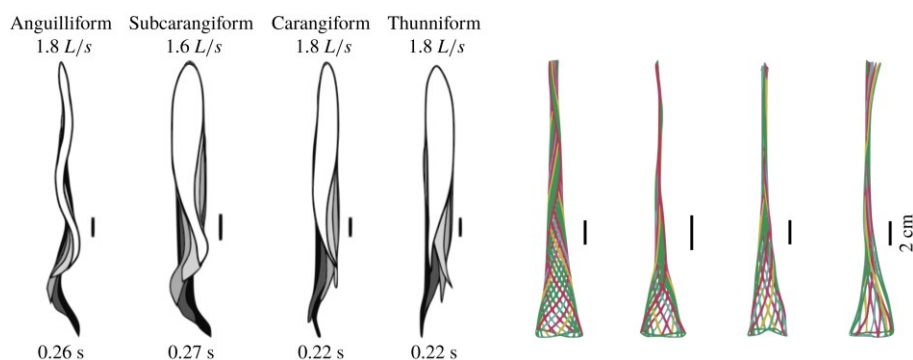


Figura 6: Quattro categorie classiche di propulsione ondulatoria dei pesci illustrate con i contorni del corpo e le linee medie derivate da recenti dati sperimentali. I profili dei pesci che nuotano sono mostrati sopra con spostamenti che illustrano la progressione in avanti. Le linee medie, invece, sono mostrate a destra e rappresentano, ad intervalli di tempo equidistanti, la posizione della linea media durante un battito di coda. Tutti i pesci avevano una lunghezza totale compresa tra 20 e 25 cm (L) e nuotavano ad una velocità simile (da 1,6 a 1,8 L/s). I tempi mostrati sotto indicano la durata del battito di coda. La lunghezza di scala che si può vedere è di 2 cm. (Immagine presa da Smits [30]).

La distinzione tra i tipi di nuotatori è ovviamente meno chiara di quella implicita nella visione convenzionale, secondo cui esistono differenze morfologiche distinte tra nuotatori ondulatori ed oscillatori (vedi Lindsey [50] e Sfakiotakis [51]). Come si può notare, tutti e quattro i tipi mostrati in figura 6 evidenziano un movimento sulla linea media che cresce in

modo simile in ampiezza lungo la lunghezza del corpo. Sebbene il movimento anguilliforme cresca in modo più uniforme rispetto ad altre specie, non vi è una grande distinzione tra gli altri tre tipi, in cui il movimento è largamente limitato nella parte posteriore del corpo. Invece di utilizzare la morfologia corporea per distinguere i nuotatori oscillatori ed ondulatori, utilizziamo un criterio basato sul meccanismo che genera la spinta. Nel primo gruppo abbiamo animali che passano un'onda viaggiante lungo il corpo, come le anguille, le lamprede e i serpenti. Chiamiamo questi nuotatori ondulatori, perché la lunghezza d'onda dell'ondulazione è uguale o inferiore alla lunghezza del corpo. Nel secondo gruppo abbiamo nuotatori carangiformi e tunniformi nei quali il meccanismo principale per produrre spinta è una pinna caudale. Per questo tipo di nuotatori la lunghezza d'onda dell'ondulazione è più lunga della lunghezza del corpo. In alcune specie, tuttavia, non è sempre possibile effettuare una netta demarcazione tra nuoto ondulatorio ed oscillatorio. Gli squali, ad esempio, mostrano movimenti che vanno dall'anguilliforme al tunniforme [52]. Essi hanno anche una coda eterocerca distintiva, cioè con una forma asimmetrica della pinna caudale; quindi, si prevede che generino strutture di scia asimmetriche [53]. L'ampia distinzione basata sul meccanismo propulsivo si rivela utile come principio organizzativo. Nelle pagine seguenti analizzeremo i risultati ottenuti da cinematismi provenienti dal mondo ondulatorio (anguilliforme) e dal mondo oscillatorio (carangiforme).

L'impatto della deformazione del corpo

In letteratura sono stati trovati un gran numero di approcci diversi per descrivere differenti specie di pesci. La maggior parte di essi si basa su espressioni analitiche per lo spostamento laterale della linea media ottenute adattando dati da osservazioni sperimentali. Queste espressioni, come abbiamo già visto, consistono in un'onda viaggiante moltiplicata per una modulazione di ampiezza polinomiale, i cui coefficienti vengono modificati in base allo stile di nuotata dei pesci. Per un nuotatore

anguilliforme e carangiforme, le rispettive modulazioni di ampiezza del movimento verranno descritte successivamente. Si suppone che questi spostamenti rappresentino i movimenti reali dei pesci osservati sperimentalmente. Tuttavia, in generale, non soddisfano la conservazione della quantità di moto lineare ed angolare; perciò, è necessaria una correzione del contraccolpo. Ne consegue un sostanziale cambiamento dello spostamento finale come mostrato in figura 7, dove è possibile apprezzare le differenze tra gli involuipi della linea media prescritti e quelli modificati che tengono conto del contraccolpo, rappresentando quindi l'intero movimento. La deformazione sintetica usata inizialmente è riportata nella stessa figura per facilitare il confronto.

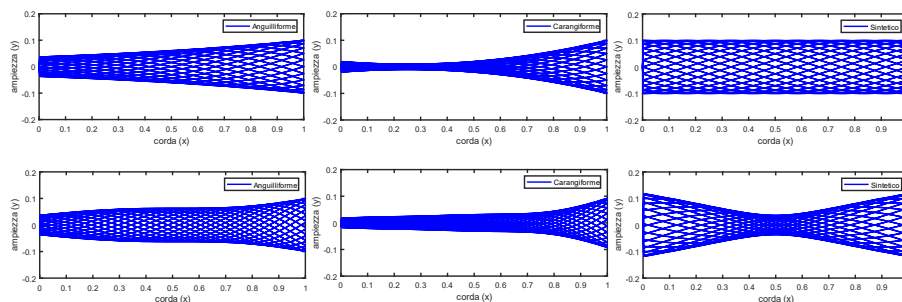


Figura 7: Sviluppo della linea media per le varie tipologie di deformazioni descritte sopra. Sotto invece possiamo vedere la loro deformazione corrispondente corretta con il contraccolpo.

Importanza del contraccolpo

Dallo studio dell'articolo pubblicato da Panniccia [54] sull'importanza del contraccolpo possiamo trarre delle considerazioni interessanti. In questo studio è stata studiata una locomozione di un corpo ondulatorio, a galleggiamento neutro, sia per lo stato stazionario che per il regime transitorio. A causa della complessità dei fenomeni coinvolti è stato adottato un modello bidimensionale semplificato. Oltre alla velocità di crociera media, che rappresenta il risultato principale cercato, essi hanno prestato una particolare attenzione alle componenti di velocità trasversali del centro di massa del corpo. Esse descrivono il moto di contraccolpo originariamente introdotto da Lighthill per soddisfare le equazioni di

equilibrio del nuotatore libero. I risultati e le considerazioni più interessanti dallo studio svolto da Panniccia sono qui brevemente riassunti, nell'intento di evidenziare quanto osservato sulla rilevanza del contraccolpo nella nuotata libera:

- i. Sono state considerate varie andature vincolate per valutare l'importanza delle varie componenti della velocità sul movimento complessivo del corpo;
- ii. La velocità di avanzamento e la relativa energia spesa mostrano chiaramente che la situazione ottimale è quella di nuoto libero, rispetto a tutti i movimenti vincolati;
- iii. Le componenti della velocità oscillatoria del baricentro corporeo, che corrispondono ai moti di contraccolpo, possono essere uno strumento semplice ed efficace per comprendere e classificare diversi stili di nuoto;
- iv. L'attenuazione dei moti di contraccolpo può essere vista come un metodo per controllare alcuni aspetti cinematici e dinamici della traiettoria del nuotatore, come si può ben osservare da casi noti in natura (pinne estensibili di certe tipologie di pesci);

Lo studio svolto da Panniccia, sebbene basato su risultati numerici molto semplificati, fornisce una preziosa intuizione sull'importanza del contraccolpo per lo studio del nuoto libero.

Nel nostro lavoro di tesi, inizialmente, il modello non permetteva al pesce di essere libero lungo tutti i tre gradi di libertà. Lo studio dell'articolo citato sopra [54], però, ha spinto a modificare il modello in modo che il corpo immerso nel fluido potesse non avere più vincoli. Tutto ciò perché i risultati ottenuti da Panniccia erano molto diversi da una condizione di nuotata vincolata rispetto ad una condizione di nuotata libera. In breve, ad esempio, un corpo libero di traslare lungo le due direzioni ma vincolato angolarmente riesce a raggiungere velocità di crociera più alte ma con un dispendio di energia nettamente maggiore. Si può osservare questo fatto

anche in natura, vi sono dei pesci che hanno la possibilità di estendere o meno delle pinne laterali o verticali. In questo modo un pesce che vuole solamente raggiungere velocità elevate, per scappare da predatori, estende le pinne vincolando il terzo grado di libertà. Nel momento in cui non ha bisogno di raggiungere velocità elevate ritira le pinne svincolando il corpo angolarmente, sacrificando quindi la velocità per un dispendio di energia nettamente inferiore.

Misura delle performance

Nel nostro studio è stata posta particolare attenzione alla spinta, alla potenza ed all'efficienza del corpo deformabile. Come accennato prima, le principali variabili adimensionali che governano le performance sono il numero di Strouhal, St , la frequenza ridotta k e il numero di Reynolds basato sulla corda, $Re = cU/\nu$, dove ν è la viscosità cinematica del fluido. Si ha inoltre il rapporto di aspetto $AR = s^2/A$, dove s è la larghezza ed A è l'area superficiale della pinna (se stiamo considerando un'analisi tridimensionale). I risultati delle performance propulsive di solito sono presentati sotto forma di coefficiente di spinta adimensionale, coefficiente di potenza spesa ed efficienza di Froude, convenzionalmente definiti:

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho U^2 A}, \quad C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U^3 A}, \quad \eta = \frac{TU}{TU+P},$$

dove T è la componente di forza lungo la direzione del flusso, P è la potenza spesa e ρ è la densità del fluido. Vi è un particolare ostacolo: la forza netta di spinta T è data dalla spinta prodotta dal movimento del corpo F_x meno la forza di Drag D , perciò abbiamo che $T = F_x - D$. Per un corpo semovente, in uno stato stazionario (nuoto libero), la spinta totale è equivalente al Drag. Quindi, $T = 0$, $C_T = 0$ e l'efficienza non può più essere calcolata. In questi casi quindi si passa alla valutazione del CoT (Cost of transport), inizialmente introdotto da Von Karman [55]. Il CoT, per un animale di peso mg è definito come $CoT = P/mgU$. Questa

quantità è molto utile anche per confrontare le performance di animali diversi, dove P è data dal tasso metabolico, il minimo del CoT si assume alla velocità alla quale l'animale riesce a coprire la maggior distanza per il minimo costo di energia. Fish e Rohr notano che i pesci hanno il CoT più basso di qualsiasi vertebrato e che i cetacei hanno valori due o tre volte superiori rispetto a pesci di dimensioni simili [31]. Probabilmente perché hanno maggiori dispendi energetici di mantenimento. Hanno poi scoperto che il CoT per i pesci ed i mammiferi è una funzione della massa corporea m , seguendo l'andamento di $m^{-0.25}$.

In certi animali possiamo separare la resistenza dalla spinta. Se per esempio, riusciamo a identificare la pinna caudale come la fonte primaria di spinta ed il corpo come la fonte primaria di resistenza, allora la pinna deve generare una forza netta positiva (la sua spinta F_x meno la sua resistenza D_p) per superare la resistenza generata dal corpo D_b . In questo caso, la pinna può essere considerata separatamente e noi possiamo definire l'efficienza di propulsione come $\eta = TU/(TU + P)$, dove P è la potenza necessaria a generare la spinta propulsiva netta $T = F_x - D_p$, ignorando l'efficienza metabolica. Ci occupiamo quindi solo dell'efficienza meccanica. Inoltre, la forza propulsiva netta T , determinerà la velocità di avanzamento del corpo, attraverso il bilancio delle forze $T = F_x - D_p = D_b$. Quest'ultimo tipo di ragionamento è spesso utilizzato nei modelli propulsivi per nuotatori oscillatori come tonni e delfini.

Capitolo 2 Metodologia

Sono state adottate, per motivi di chiarezza, le seguenti notazioni: (1) le variabili in **grassetto** sono vettori; (2) le variabili in *corsivo* sono scalari; (3) i parametri con apice * sono adimensionalizzati utilizzando la velocità di nuoto semovente U (ms^{-1}) alla velocità quasi stazionaria o di crociera; (4) i parametri con apice/pedice “o” sono adimensionalizzati usando la velocità caratteristica di riferimento U_o (ms^{-1}). C'è un'eccezione all'ultima definizione per la velocità di nuoto adimensionale, che è definita come $U^*=U/U_o$.

Cenni riguardo la CFD

La CFD (computational fluid dynamics) è nata nei primi anni '70. Una prima limitazione all'utilizzo di questa tecnologia è stata data dalla potenza di calcolo dei computer allora in commercio. Il suo sviluppo è andato di pari passo ai miglioramenti continui in ambito tecnologico. All'inizio degli anni '80 si cominciarono a fare le prime simulazioni 2D, inizialmente, 3D successivamente, basate sulle equazioni di Eulero. Poco dopo, si introdussero le equazioni di Navier-Stokes per simulare i primi flussi viscosi. Allo stesso momento iniziarono anche a svilupparsi i primi modelli di turbolenza, che si differenziarono per grado di complessità ed accuratezza [56].

Attualmente esistono tre tipi di approccio principali per la soluzione di un problema fluidodinamico tramite la CFD, descritti qui in seguito:

- **DNS** o Direct Numerical Simulation, che risolvono numericamente le equazioni di Navier-Stokes senza alcun tipo di modello. Queste equazioni rappresentano tutta la fisica dei flussi turbolenti, fino alle scale più piccole dove avviene la dissipazione

dell'energia. Nella simulazione, quindi, è necessario catturare tutti i processi fisici; questo comporta un gran costo computazionale, che può essere sostenuto da calcolatori con grandi requisiti. Il vantaggio principale di questa tecnica sta nel fatto che la soluzione è molto precisa, comparabile con una prova sperimentale. Tanto che risulta possibile ottenere il campo di velocità istante per istante, cosa impossibile da ottenere per via sperimentale. [57]

- **LES** Large Eddy Simulation, con le quali vengono simulate solo le strutture vorticosi di dimensioni maggiori, che risentono delle particolari geometrie macroscopiche del flusso. Per quanto riguarda le scale più piccole, avendo le stesse caratteristiche a livello microscopico, vengono risolte tramite un opportuno modello di turbolenza per ogni tipo di flusso. Con l'adozione di questa tecnica assume un ruolo fondamentale la scala di filtraggio, sotto la quale l'effetto delle piccole scale va modellato. Tale scala deve essere definita in modo che il modello risulti indipendente dal flusso simulato. Dato che usiamo una discretizzazione più leggera il costo computazionale è minore rispetto ad una DNS. [57]
- **RANS** Range Average Navier-Stokes, nelle quali vengono risolte le equazioni mediate, ottenendo un profilo medio di velocità. Queste equazioni non risultano essere chiuse, è quindi necessario utilizzare un modello di turbolenza. Questa tecnica, utilizzata per studiare flussi di interesse ingegneristico, ha un costo computazionale inferiore alle due descritte sopra. [57]

Nello studio in esame abbiamo utilizzato un approccio DNS per le simulazioni fluidodinamiche, infatti il nostro codice non implementa modelli di turbolenza per risolvere le scale turbolente più piccole. Si deve prestare molta attenzione al valore del numero di Reynolds e di conseguenza tarare la nostra griglia in modo tale da risolvere in maniera corretta il fluido.

Caratteristiche delle mesh

Nel capitolo precedente sono stati descritti i tre principali tipi di approccio. Un altro aspetto fondamentale, per quanto riguarda le simulazioni CFD, è la generazione della mesh. Le simulazioni computazionali si svolgono considerando un dominio fluido, questo viene poi discretizzato attraverso la creazione della mesh. In questo processo vengono creati dei nodi all'interno del dominio fluido su cui vengono calcolate le variabili del problema e l'area del dominio (o il volume nel caso di simulazioni 3D) viene divisa in parti dette celle.

Il processo di creazione della mesh, che può rivelarsi molto dispendioso in termini computazionali per raggiungere un bel risultato, è di fondamentale importanza. La precisione della mesh si riscontra sulla correttezza e sulla stabilità della simulazione [58]. In linea generale si può dire che aumentando il numero di celle utilizzate per la discretizzazione del dominio fluido, la soluzione fluida sarà più precisa. L'aumento delle celle ha però delle ricadute in termini di tempo impiegato per svolgere la simulazione.

Nel nostro caso la mesh è di tipo euleriano, consiste quindi in una suddivisione omogenea dello spazio lungo tutte e tre le direzioni. Per far sì che l'IBM possa lavorare correttamente, ogni cella deve essere uguale alle altre ed è necessario che i nodi, lungo le tre direzioni, siano equidistanti. Vi sono inoltre altri tipi di IBM, che riescono a lavorare con griglie non strutturate, ma non è il nostro caso.

Le equazioni che governano e le condizioni al contorno

Le equazioni che governano il moto di un fluido viscoso newtoniano incomprimibile sono le equazioni di Navier-Stokes 3D, non stazionarie ed incomprimibili. In questo lavoro, ed al fine di facilitare la simulazione

numerica del nuoto semovente, le equazioni di governo sono formulate nel sistema di riferimento non inerziale che si muove con il pesce. Le equazioni, quindi, sono adimensionalizzate da una velocità di riferimento caratteristica U_0 e dalla lunghezza del pesce L . Le equazioni che governano il moto si riferiscono ad un sistema di riferimento non inerziale che si muove con velocità \mathbf{u}_c e velocità angolare $\boldsymbol{\Omega}$, riferite al sistema di riferimento inerziale. Esse vengono riportate in forma conservativa come segue:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \\ \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \right) + \nabla \cdot [(\mathbf{u} - \mathbf{v})\mathbf{u} + \mathbf{u}\mathbf{w}] = -\nabla p + \frac{1}{Re_o} \nabla^2 \mathbf{u} \end{cases}$$

dove $Re_o = U_0 L / \nu$ è il numero di Reynolds, t è il tempo e \mathbf{u} , \mathbf{v} e \mathbf{w} sono definite come:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \mathbf{v} + \mathbf{u}_r(t) = \mathbf{Q}^T \mathbf{u}_a(t) \\ \mathbf{v} &= \mathbf{u}_c + \boldsymbol{\Omega} \mathbf{r}_r \\ \mathbf{w} &= \boldsymbol{\Omega} \mathbf{r}_r \end{aligned} ,$$

dove \mathbf{u}_a è la velocità cartesiana assoluta adimensionale del flusso nel sistema di riferimento inerziale, \mathbf{u}_r è la velocità cartesiana relativa adimensionale del fluido nel sistema di riferimento non inerziale, \mathbf{r}_r è il vettore posizione adimensionale relativo al sistema di riferimento non inerziale, \mathbf{Q}^T è la matrice di rotazione che permette di passare dal sistema di riferimento non inerziale a quello inerziale, p è la pressione adimensionale.

Si è interessati nel risolvere le equazioni in un dominio contenente un corpo flessibile che si può deformare secondo una cinematica ben definita. Pertanto, le equazioni di N-S, che governano il problema, devono essere accompagnate con condizioni al contorno appropriate, le quali potrebbero essere confini di fluido o di un solido immerso in movimento. In questo studio il sistema di riferimento non inerziale è attaccato al centro di massa del pesce. Il moto del centro di massa si ottiene risolvendo le equazioni

della seconda legge del moto di Newton per il pesce. In forma adimensionale abbiamo:

$$M_{rid} \frac{d\mathbf{U}^*}{dt} = \mathbf{C}_F^0,$$

dove \mathbf{U}^* è la velocità del pesce adimensionalizzata con U_0 , $M_{rid} = m/\rho L^3$ è la massa ridotta (dove m è la massa del corpo e ρ è la densità del fluido) e $\mathbf{C}_F^0 = \mathbf{F}/\rho(U_0)^2 L^2$ è il coefficiente della forza \mathbf{F} (dove \mathbf{F} è il vettore forza esercitato sul corpo dal fluido). In questo lavoro permettiamo al corpo di traslare lungo tutte le direzioni e di ruotare attorno a tutti gli assi di rotazione; perciò, per il sistema bidimensionale abbiamo liberi tre gradi di libertà.

Adimensionalizzazione delle equazioni di Navier-Stokes

A livello numerico conviene, come affermato in precedenza, adimensionalizzare le equazioni di Navier-Stokes. L'importanza della trasformazione delle formule in forma adimensionale ha dei suoi vantaggi:

- i. Semplificazione matematica delle equazioni;
- ii. Corretta similitudine sperimentale, permette una conduzione di esperimenti per diverse condizioni fisiche su modelli in scala ridotta a parità di valori caratteristici;
- iii. Accuratezza delle soluzioni numeriche, in quanto una scelta opportuna dei valori di riferimento garantisce che le incognite del problema risultino dell'ordine dell'unità;
- iv. Indipendenza delle unità di misura.

Come abbiamo detto in precedenza, le equazioni che governano il problema sono adimensionalizzate rispetto ad una velocità caratteristica U_0 ed a una lunghezza caratteristica L . Il numero di Reynolds è definito attraverso la seguente equazione: $Re_0 = \frac{U_0 L}{\nu}$ e la viscosità dell'acqua è circa $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Non avendo a disposizione grandi risorse computazionali per lo studio in esame non possiamo simulare dei pesci, ad esempio, lunghi un metro che nuotano ad un metro al secondo. Questo perché il numero di Reynolds sarebbe 10^6 e porterebbe ad un costo computazionale troppo elevato per svolgere delle simulazioni attraverso un approccio numerico diretto. Abbiamo quindi deciso di valutare due lunghezze caratteristiche di pesci: una tipologia di pesci lunga 2.5cm e l'altra 10cm, entrambi che nuotano ad una velocità di riferimento $U_0 = 0.04 \text{ m/s}$. Avendo quindi definito queste due grandezze caratteristiche otteniamo due numeri di Reynolds (Re_0) diversi: (1) $Re_0 = 1000$ per la lunghezza di 2.5cm, (2) $Re_0 = 4000$ per la lunghezza di 10cm. Nello studio e nel capitolo riguardante i risultati numerici ottenuti torneremo a valutare i risultati in forma adimensionale, quindi parlando del caso con il numero di Reynolds pari a 1000 e del caso di Reynolds pari a 4000.

Con questo ragionamento, però, se volessimo rappresentare i risultati di velocità in metri al secondo dovremmo semplicemente moltiplicare il valore di U_0 con i risultati di velocità ottenuti dalle simulazioni numeriche, in questo modo: $U = U^* \cdot U_0 [\text{m/s}]$.

Il metodo numerico

Il corpo flessibile del pesce viene gestito con un'interfaccia immersa nella griglia cartesiana utilizzando il metodo IBM (Immersed boundary method). Il metodo utilizzato è descritto in dettaglio da Dalla Barba [59].

ACCOPPIAMENTO FLUIDO-STRUTTURA

L'interazione Fluido-Struttura (FSI) è un fenomeno comune in molti contesti ingegneristici e scientifici. Tuttavia, soluzioni analitiche sono

spesso impossibili ed anche a livello numerico si riscontrano molte difficoltà. Nella letteratura possiamo trovare un'ampia gamma di metodologie per affrontare il problema. In questo contesto, ad esempio, andremo a simulare un corpo in movimento con una deformazione prescritta. Questo metodo si basa sulle equazioni di Navier-Stokes per il campo fluido accoppiate alle equazioni che descrivono la dinamica del corpo, grazie alla seconda legge di Newton, attraverso un Immersed Boundary Method (IBM) che permette di tenere conto dello scambio di forze tra fluido e solido.

IBM

Quando si considerano interfacce complesse ed in evoluzione nel tempo, i metodi denominati IBM sono strumenti potenti in grado di imitare le condizioni al contorno no-slip e di velocità normale a parete nulla. Il principio alla base dell'IBM è quello di imporre una forza aggiuntiva al fluido in prossimità dell'interfaccia fluido-solido, così che le condizioni al contorno della parete siano soddisfatte entro una certa precisione. Il presente modello utilizza un algoritmo IBM multidiretto per tener conto dello scambio di forza fluido-solido. La formulazione incomprimibile delle equazioni di Navier-Stokes governa la fluidodinamica mentre un accoppiamento con la seconda equazione di Newton è ottenuto tramite l'algoritmo IBM. La metodologia proposta è stata implementata in un codice Fortran parallelizzato. La validazione di questo modello si può approfondire nell'articolo pubblicato da Dalla Barba [59].

Cinematica del corpo e parametri non dimensionali

Il corpo del nuotatore usato è stato un profilo simmetrico NACA. La cinematica per l'avanzamento dei pesci è nella forma di un'onda che viaggia contro la direzione di avanzamento, con un'ampiezza massima alla

coda del pesce [2]. L'equazione che descrive l'onda di deformazione laterale del pesce è la seguente:

$$h(x, t) = a(x)\sin(kx - \omega t),$$

dove x è la direzione assiale considerata lungo la corda del profilo, $h(x, t)$ è l'escursione laterale del corpo al tempo t , $a(x)$ è lo sviluppo di ampiezza come funzione di x , k è il numero d'onda dell'ondulazione del corpo che corrisponde ad una lunghezza d'onda $\lambda = 2\pi/k$ ed ω è la pulsazione.

Lo sviluppo di ampiezza $a(x)$ per la cinematica anguilliforme è approssimato da una funzione esponenziale presa dallo studio di Borazjani [20] ed è la seguente:

$$a(x) = a_{max}e^{x-1},$$

dove a_{max} è l'ampiezza rilevata alla coda.

Per quanto riguarda la cinematica carangiforme, lo sviluppo di ampiezza utilizzato viene approssimato da una curva quadratica con la forma:

$$a(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2.$$

Per un pesce di tipo anguilliforme il coefficiente a_{max} è stato definito pari a 0.1 [60]. Invece, per quanto riguarda la cinematica di tipo carangiforme i coefficienti usati sono i seguenti: $a_0 = 0.02$, $a_1 = -0.08$, $a_2 = 0.16$. Quest'ultimi sono stati scelti per rispettare la curva trovata sperimentalmente da Videler ed Hess [61]. Entrambi i cinematismi hanno la massima ampiezza alla coda di $a_{max} = 0.1$. In figura 8 si possono vedere gli sviluppi di ampiezza per i cinematismi di tipo anguilliforme e carangiforme. Nel caso del cinematismo di tipo sintetico [62] lo sviluppo dell'ampiezza lungo la corda è costante ed unitario, pari a 0.1.

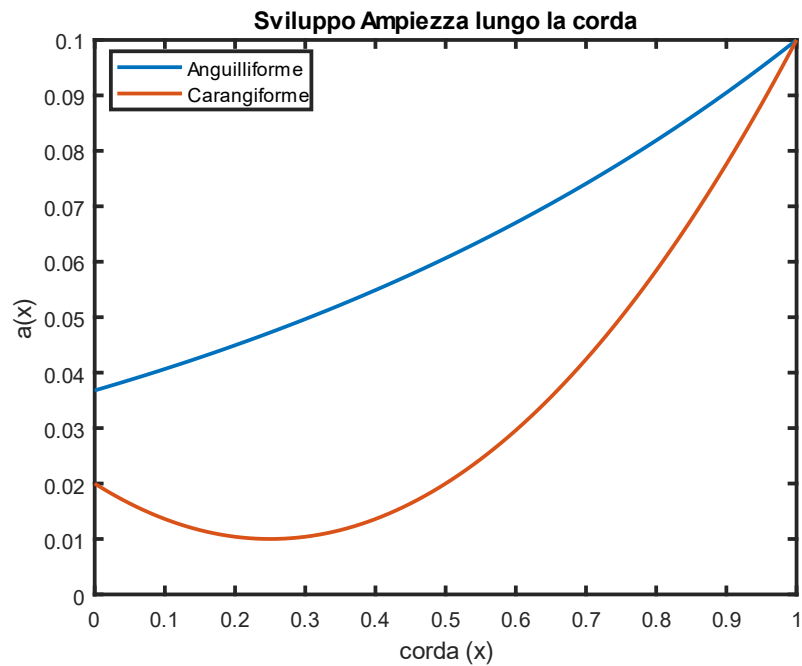


Figura 8: Sviluppo di ampiezza lungo la corda del profilo (x) per i cinematismi di tipo anguilliforme (azzurro) e carangiforme (arancione). Con x pari a zero ci si riferisce alla testa del pesce, con x pari ad uno alla coda.

Il numero d'onda per tutte le simulazioni si basa sulla lunghezza d'onda adimensionale $\lambda/L = 0.642$ per l'anguilliforme e $\lambda/L = 0.95$ per il carangiforme [20]. La figura 9 mostra la linea media del profilo nel tempo di un battito di coda.

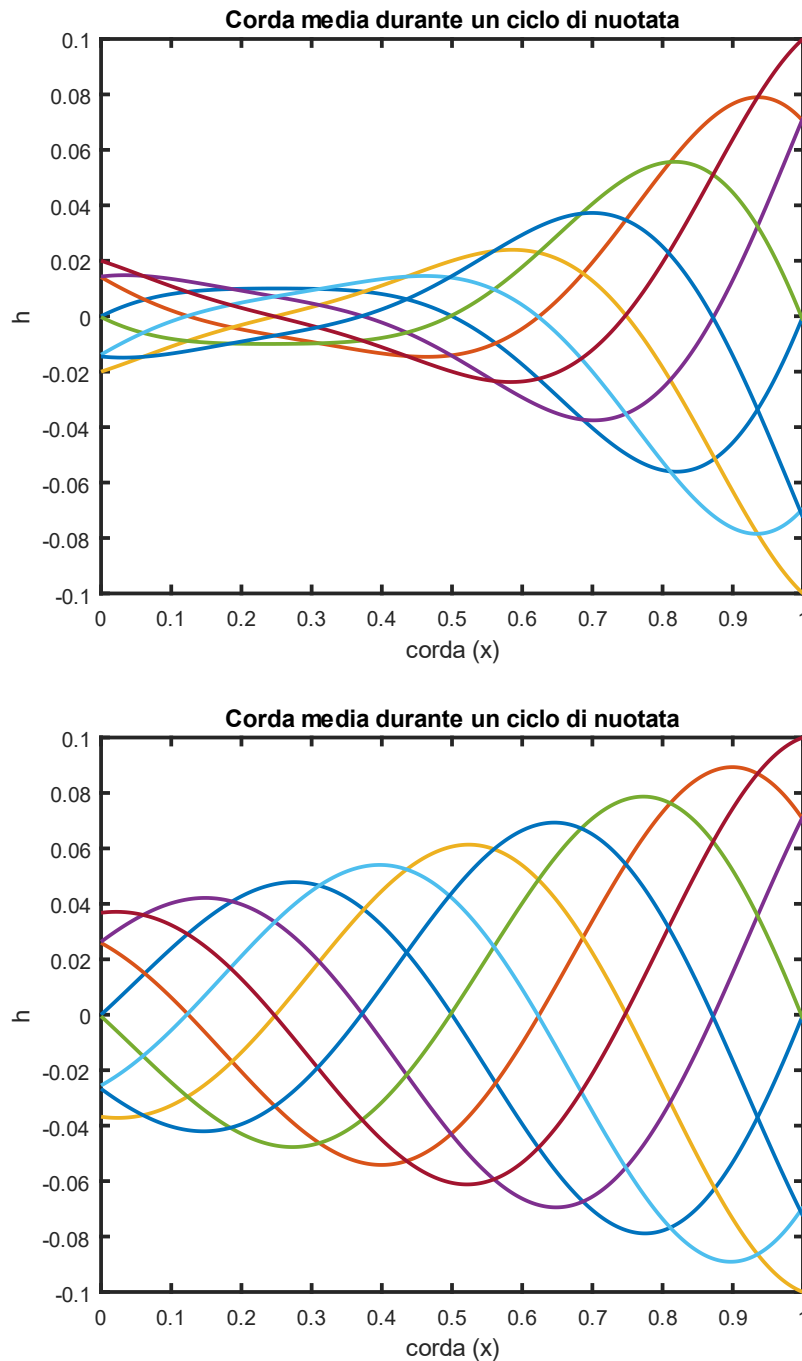


Figura 9: Corda media delle due tipologie di cinematismi di nuotata. Il primo grafico rappresenta la corda media nel tempo di uno stile Carangiforme, il secondo grafico rappresenta quello anguilliforme. h è lo scostamento laterale della linea media.

Per quanto riguarda lo stile studiato da Panniccia [62], l'andamento è molto semplice, lo scostamento massimo è costante e pari a $0.1L$.

I quattro parametri adimensionali principali per confrontare le varie tipologie di nuotata sono: (1) Il numero di Reynolds Re^* , definito dall'equazione $Re^* = UL/\nu$; (2) Il numero di Strouhal St^* definito dall'equazione $St^* = fA/U$, basata sulla massima escursione laterale della coda $A = 2a_{max}$ e sulla frequenza del battito di coda f ; (3) la lunghezza d'onda adimensionale λ/L ; e (4) lo sviluppo di ampiezza adimensionale $a(x/L)/L$.

Setup delle simulazioni numeriche e dettagli computazionali

Il corpo è immerso nel fluido con una frequenza di oscillazione definita e la velocità di avanzamento viene calcolata in base alle forze che agiscono su di esso. Le simulazioni vengono fatte avanzare finché il pesce non raggiunge uno stato quasi stazionario, cioè finché la velocità di crociera in media non risulta costante.

Possiamo dire che la velocità U in regime quasi stazionario dipende dalla frequenza di oscillazione della coda. Questo perché il numero di Re^* e di St^* dipendono dalla velocità di avanzamento U^* . Perciò per ottenere un numero di Reynolds effettivo quasi stazionario all'interno di un certo range, la frequenza di oscillazione dovrà essere scelta attentamente. Nel nostro caso fissiamo un numero di Re_0 e di St_0 prima di lanciare la simulazione ed a posteriori calcoliamo i valori effettivi, conoscendo la velocità quasi stazionaria U^* . Nello studio bidimensionale sono state effettuate le simulazioni per il caso $Re_0 = 1000$ e per $Re_0 = 4000$, entrambi con $St_0 = 0.4$, quindi con pulsazione pari a $\omega = 25.12$.

Inizialmente si è deciso di andare a studiare un profilo simmetrico attraverso un codice bidimensionale. Sono stati studiati sia l'influenza di parametri geometrici del profilo, come lo spessore adimensionale, sia

l'influenza di parametri di carattere cinematico, i quali modificano lo stile di nuotata. Principalmente ci si è focalizzati sulla variazione dello spessore per quanto riguarda i parametri geometrici e sulla variazione dell'ampiezza di oscillazione, relazionata con la frequenza attraverso l'equazione $Re_\omega = a_{max}\omega L/\nu$. Per quanto riguarda questo studio di tesi vedremo come lo spessore influisce sulle caratteristiche prestazionali di un pesce mentre viaggia a velocità stazionaria. Naturalmente, comunque, questo approccio farà sì che ogni nuotatore a crociera raggiungerà una velocità quasi stazionaria U diversa da quella di riferimento U_0 , per cui $U^* = U/U_0 \neq 1$ a causa delle diverse forme del corpo e cinematismi usati.

Relativamente a questo studio, sono state svolte svariate simulazioni al variare dello spessore adimensionale e confrontando anche vari stili di nuotata. Come abbiamo visto, i pesci che usano l'ondulazione del corpo o della pinna caudale per spostarsi sono classificati in 4 categorie: Anguilliformi, sub-carangiformi, carangiformi e tunniformi [30]. I due tipi di nuotatori, anguilliformi e carangiformi, differiscono tra di loro in forma del corpo e stile di nuotata. In questo lavoro di tesi si è deciso di andare a confrontare tre tipi di cinematismi diversi, mantenendo sempre la stessa geometria. La geometria scelta, per semplicità, è stata quella di un profilo alare Naca simmetrico. I tre cinematismi scelti, come vedremo in seguito sono del tipo "sintetico" [62], carangiforme ed anguilliforme [20]. Con questi tre stili di nuotata si è andati ad osservare l'efficacia e l'efficienza del movimento al variare dello spessore del profilo.

Il dominio delle simulazioni bidimensionali è un rettangolo con dimensioni $4L \times 2L$ discretizzato con circa 295 mila nodi nel caso di Reynolds 1000 e con circa 2 milioni di nodi per il caso con Reynolds 4000. L'altezza è più di 10 volte lo spessore del corpo, la lunghezza invece è 4 volte la corda del profilo. Il pesce è posizionato a $1L$ dalla superficie di ingresso e centrato per quanto riguarda la dimensione trasversale al moto. La massa è mantenuta costante per tutti i pesci studiati.

Dato che in dipartimento questo argomento di studio era appena partito, inizialmente si è cercato di confrontare qualitativamente i risultati ottenuti con varie pubblicazioni scientifiche. Le principali sono state: Paniccia [62] e [54], Borazjani [20], Smits [30], Maertens [12], Yang Yan [22] e Wolfgang [8]. Successivamente, dopo aver tarato bene il codice si è passati alle analisi delle performance andando a variare lo spessore del corpo.

Calcolo delle forze e dell'efficienza

Nelle nostre simulazioni consideriamo una nuotata rettilinea lungo la direzione x . La componente delle forze idrodinamiche lungo la direzione di avanzamento può essere calcolata integrando la pressione e le forze viscosi agenti sul corpo come segue:

$$F(t) = \int_A (-pn_x dA + \tau_{xj} n_j) dA,$$

dove n_j è la j -esima componente del vettore normale alla superficie dA e τ_{ij} è il tensore degli stress viscosi. In base al segno di $F(t)$, potrebbe contribuire alla spinta o alla resistenza fluidodinamica.

I valori medi della spinta, velocità e potenza spesa sono ottenuti mediando i risultati istantanei lungo un buon numero di cicli di nuotata. Sono state adimensionalizzate le quantità medie in due modi: (1) le quantità adimensionalizzate con il simbolo “*” sono state scalate con la velocità di nuotata calcolata U , che è la tipica definizione dei vari coefficienti come quelli di forza o spinta; (2) le quantità adimensionalizzate con il simbolo “o” sono scalate con la velocità caratteristica U_o , che è la velocità usata per adimensionalizzare le equazioni di governo.

L'efficienza di Froude η_f , funzione della forza di spinta e della velocità quasi stazionaria è definita come segue:

$$\eta_f = \frac{TU}{TU+P},$$

dove P è la potenza media persa a causa dell'oscillazione laterale. Risulta importante notare che l'efficienza di Froude può essere calcolata solo per una nuotata rettilinea a velocità costante, quando la spinta è perfettamente bilanciata dalla resistenza e la forza complessiva agente sul corpo risulta nulla. Perciò, possiamo calcolare l'efficienza solo una volta arrivati alla velocità di crociera.

Si può inoltre valutare l'efficienza di Froude con il metodo EBT (Elongated body theory) nel seguente modo [27]:

$$\eta_{EBT} = \frac{1}{2} \cdot (1 + \beta) = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{U^*P}{\lambda}\right),$$

dove $\beta = U/V$ è la slip velocity, definita come il rapporto tra la velocità di nuotata U e la velocità di propagazione dell'onda dovuta all'ondulazione del corpo. Questo modo per valutare l'efficienza di Froude permette di non calcolare la spinta e la potenza spesa durante la nuotata.

Un ulteriore metodo per valutare l'efficienza della nuotata è il famoso CoT (costo di trasporto). Come descritto nel capitolo precedente il CoT permette di relazionare la potenza spesa nella propulsione con la velocità di nuotata. Si può definire anche come il rapporto tra l'energia totale spesa e la distanza percorsa dal pesce.

Il metodo da noi utilizzato per valutare l'efficienza del nuotatore è stato quello di prendere in esame un rendimento di propulsione, definito da due potenze. Questo rendimento risulta comodo per il semplice motivo che viene ricavato dal rapporto di due potenze, in modo che poi si possa andare a valutare una grandezza adimensionale. Conoscendo, quindi, la potenza spesa dal corpo per mantenere la velocità di crociera (P_+) e la potenza che bisognerebbe spendere per tenere in posizione il profilo in esame, senza alcuna deformazione, alla velocità di crociera da lui raggiunta in precedenza (P_0), si è in grado di valutare il rendimento sopra citato in questo modo:

$$R = \frac{P_0}{P_+}$$

Dove la potenza viene calcolata come l'integrale sul contorno del pesce, secondo:

$$P = \int_S [(U - V_x) \cdot \tau_x + V_y \cdot \tau_y] dS$$

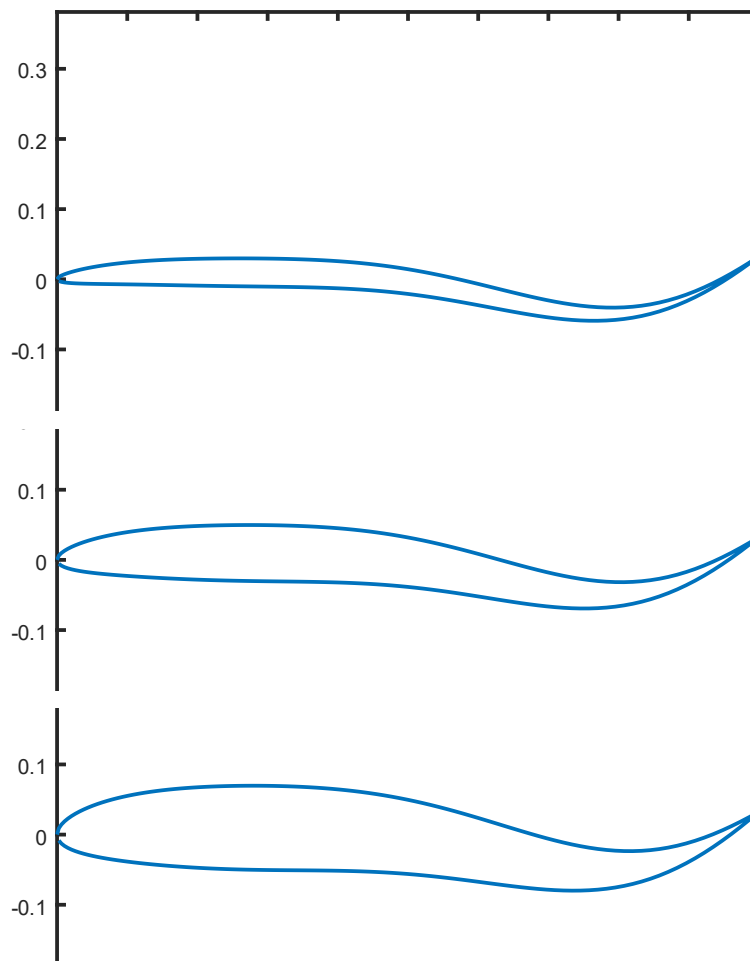
dove U è la velocità dell'inflow, V_x e V_y sono le velocità del contorno del pesce e τ_x , τ_y le componenti della tensione. All'interno del modello, in realtà, vengono calcolate due componenti della potenza $P+$ e $P-$, rispettivamente cedute e assorbite dal flusso.

Visualizzazione della scia

La visualizzazione tridimensionale della scia, per le diverse simulazioni effettuate è stata fatta attraverso isosuperfici della variabile Q . La quantità Q è definita come $Q = \frac{1}{2}(\|\Omega\|^2 - \|S\|^2)$, dove S e Ω rappresentano rispettivamente la parte simmetrica ed asimmetrica del gradiente di velocità e $\|\bullet\|$ è la norma Euleriana. In accordo con Hunt [63], le zone dove $Q > 0$, cioè zone dove le rotazioni dominano sul flusso rettilineo, sono occupate da strutture vorticosi. Nel nostro lavoro di tesi si è scelto di spostare la soglia di attivazione da zero ad uno, in modo da isolare e visualizzare meglio la scia generata durante la propulsione del pesce.

Capitolo 3 Risultati numerici e discussione

Come discusso in precedenza, per un determinato ambiente fluidodinamico (fissato Re_0) tutte le simulazioni sono state svolte con la stessa frequenza di oscillazione (fissato St_0). Per tutti i casi le simulazioni sono state portate avanti finché il pesce non raggiungeva una velocità di crociera quasi stazionaria. Il focus primario del lavoro di tesi è stato quello di valutare le performance del pesce al variare dello spessore, andando a vedere le principali differenze tra corpo snello e corpo tozzo. Di seguito possiamo vedere le varie geometrie studiate.



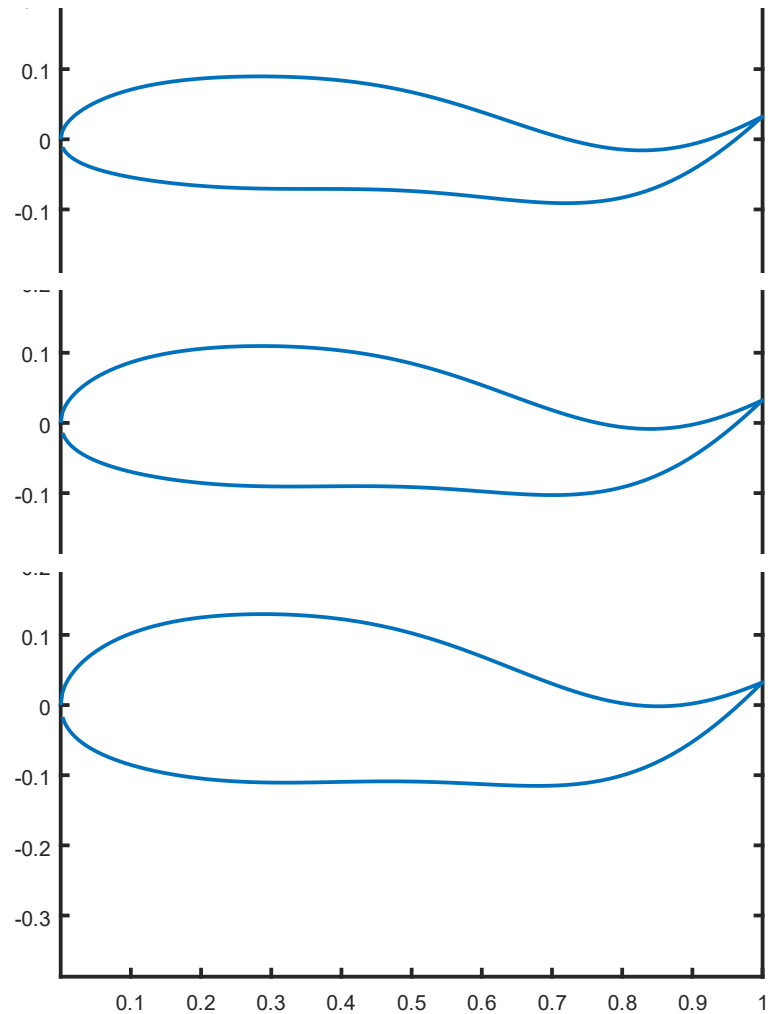


Figura 10: Tipologie di profilo studiate, queste figure rappresentano i vari spessori simulati ed in questo caso le immagini vengono prese per il cinematismo di tipo carangiforme.

Dalle simulazioni svolte fino ad ora e grazie a molti articoli che sviluppano questo tema, possiamo fare delle considerazioni generali e qualitative su quanto studiato.

Analisi delle performance in funzione dello spessore del corpo

Dallo studio di come lo spessore possa andare ad influire sull'efficacia e sull'efficienza della nuotata si sono tratte varie osservazioni. Innanzitutto,

il fatto principale e più facile da notare è quello che all'aumentare del rapporto spessore su lunghezza del corpo diminuisce la velocità di crociera. Ricordiamo che tutti questi risultati sono stati ottenuti lasciando invariati gli altri parametri. Questa diminuzione di velocità, all'aumentare dello spessore, sembra essere dovuta alla maggior resistenza fluidodinamica subita dal pesce. Un corpo tozzo risulta più in difficoltà a fendere il fluido rispetto ad un corpo snello; perciò, a parità di altre condizioni raggiungerà velocità più basse. Come si può notare dai grafici di seguito, in tutti e tre i cinematismi otteniamo una diminuzione della velocità di crociera all'aumentare dello spessore.

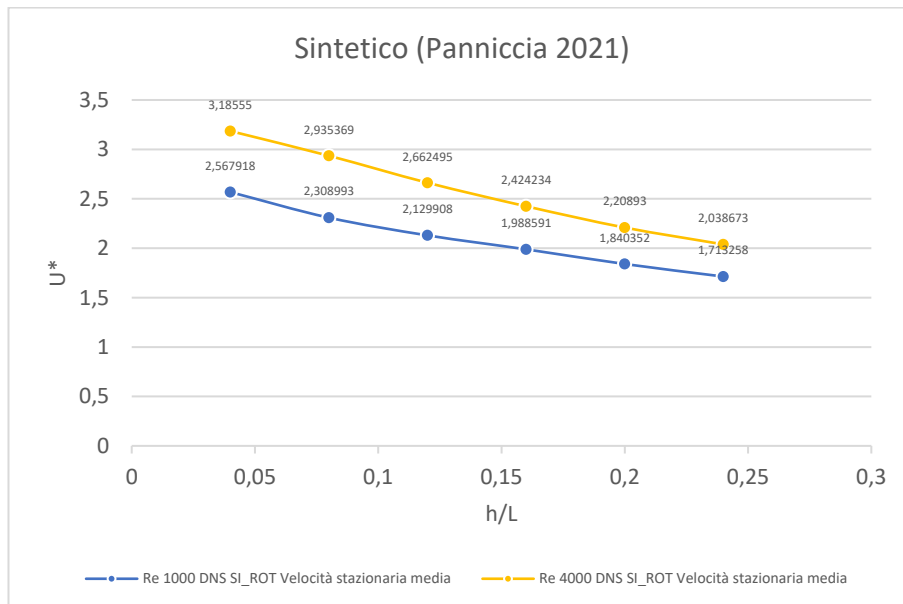


Figura 11: Grafico che rappresenta, per il cinematismo di tipo sintetico, l'andamento della velocità stazionaria media una volta che il pesce ha raggiunto la velocità di crociera, rispetto al rapporto spessore su lunghezza del corpo.

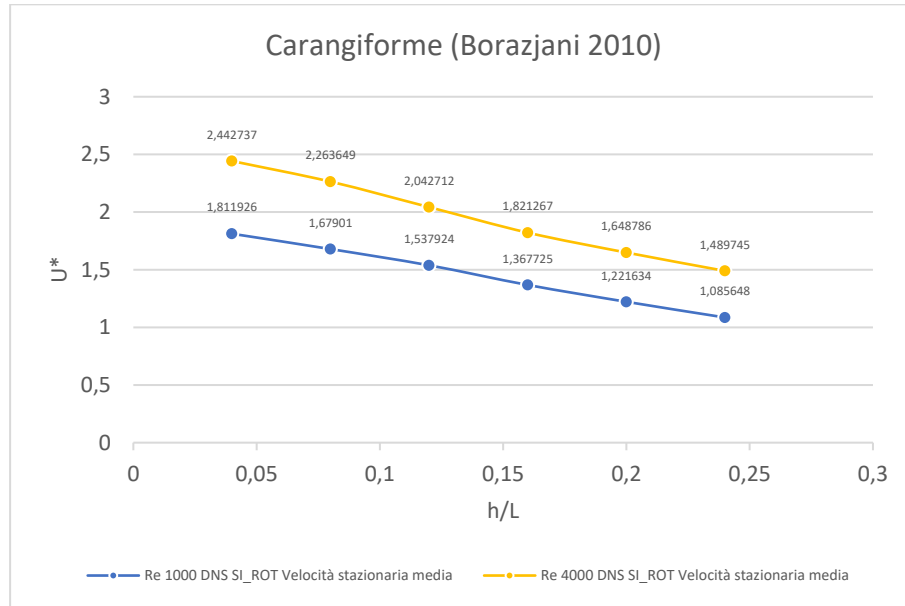


Figura 12: Grafico che rappresenta, per il cinematisimo di tipo carangiforme, l'andamento della velocità stazionaria media una volta che il pesce ha raggiunto la velocità di crociera, rispetto al rapporto spessore su lunghezza del corpo.

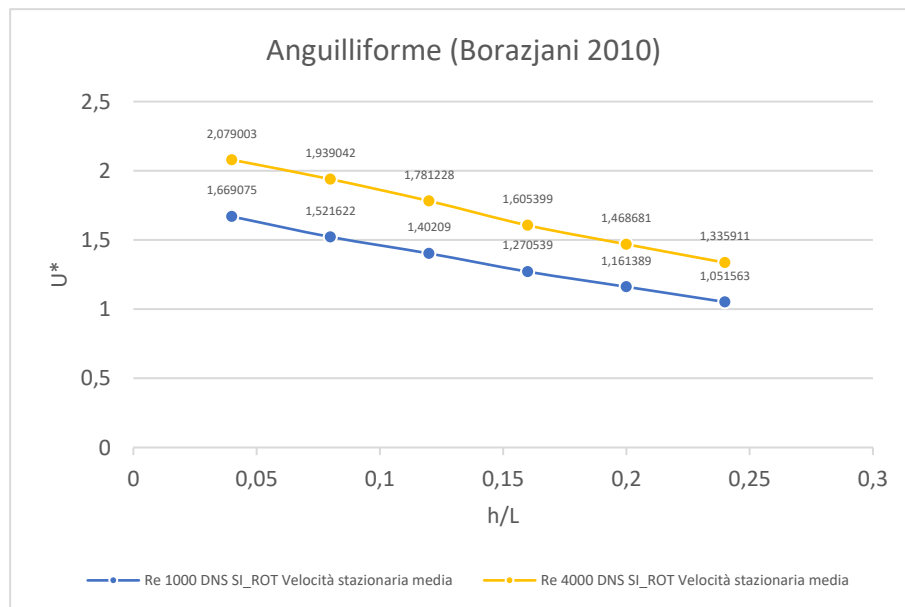


Figura 13: Grafico che rappresenta, per il cinematisimo di tipo anguilliforme, l'andamento della velocità stazionaria media una volta che il pesce ha raggiunto la velocità di crociera, rispetto al rapporto spessore su lunghezza del corpo.

Un ulteriore aspetto interessante da notare è che, per tutti e tre i cinematismi studiati, abbiamo un andamento lineare per quanto riguarda la velocità di crociera, in relazione con lo spessore del corpo.

Tabella 1: Indici delle rette che interpolano i punti definiti dalle velocità di crociera e dal rapporto spessore su lunghezza del corpo. Risulta interessante notare il valore del coefficiente R al quadrato che in prima approssimazione possiamo considerare unitario.

Sintetico (Panniccia 2021)			
Re_0	m	q	R^2
1000	-4,1575	2,6736	0,9827
4000	-5,8228	3,3911	0,9944
Carangiforme (Borazjani 2010)			
Re_0	m	q	R^2
1000	-3,6955	1,968	0,9988
4000	-4,8723	2,6346	0,9966
Anguilliforme (Borazjani 2010)			
Re_0	m	q	R^2
1000	-3,0713	1,776	0,9973
4000	-3,7742	2,233	0,9993

Dalla tabella, oltre ai valori delle rette che interpolano i vari punti, possiamo osservare il valore del coefficiente R^2 . Questo valore sta ad indicare quanto bene i dati si adattano alla retta di interpolazione. Per tutti i cinematismi studiati e per entrambi i numeri di Reynolds possiamo osservare che questo coefficiente è pari ad uno, con un errore di circa $\pm 0,01$. Questo fatto sta a sottolineare la perfetta linearità della velocità media di crociera del pesce al variare del rapporto spessore su lunghezza caratteristica.

Avendo condotto lo studio sia per $Re_0 = 1000$ che per $Re_0 = 4000$, possiamo notare che all'aumentare del numero di Reynolds, per tutte le geometrie, la velocità di crociera risulta essere maggiore. Questo perché gli sforzi viscosi vanno diminuendo facendo sì che la resistenza dovuta allo scivolamento risulti minore. Si può notare dai grafici sopra riportati che per ogni cinematismo abbiamo velocità di crociera maggiori per i casi con $Re_0 = 4000$, rispetto ai casi con $Re_0 = 1000$. Riporto di seguito le

tabelle che riassumono il guadagno sulla velocità media all'aumentare del numero di Reynolds. Andando a svolgere delle prove ulteriori per Reynolds 2000, ad esempio, si potrebbe capire l'andamento della velocità media rispetto al numero di Re_0 .

Tabella 2: Velocità di crociera medie in confronto tra differenti numeri di Reynolds. Si può notare un guadagno in percentuale sempre positivo all'aumentare del numero di Reynolds.

Sintetico (Panniccia 2021)				
Velocità di crociera media U^*				
h/L	Re1000	Re4000	Guadagno %	Media
0,04	2,57	3,19	24,05	22,85
0,08	2,31	2,94	27,13	
0,12	2,13	2,66	25,01	
0,16	1,99	2,42	21,91	
0,20	1,84	2,21	20,03	
0,24	1,71	2,04	18,99	
Carangiforme (Borazjani 2010)				
Velocità di crociera media U^*				
h/L	Re1000	Re4000	Guadagno %	Media
0,04	1,81	2,44	34,81	34,63
0,08	1,68	2,26	34,82	
0,12	1,54	2,04	32,82	
0,16	1,37	1,82	33,16	
0,20	1,22	1,65	34,97	
0,24	1,09	1,49	37,22	
Anguilliforme (Borazjani 2010)				
Velocità di crociera media U^*				
h/L	Re1000	Re4000	Guadagno %	Media
0,04	1,67	2,08	24,56	26,72
0,08	1,52	1,94	27,43	
0,12	1,40	1,78	27,04	
0,16	1,27	1,62	27,82	
0,20	1,16	1,47	26,46	
0,24	1,05	1,34	27,04	

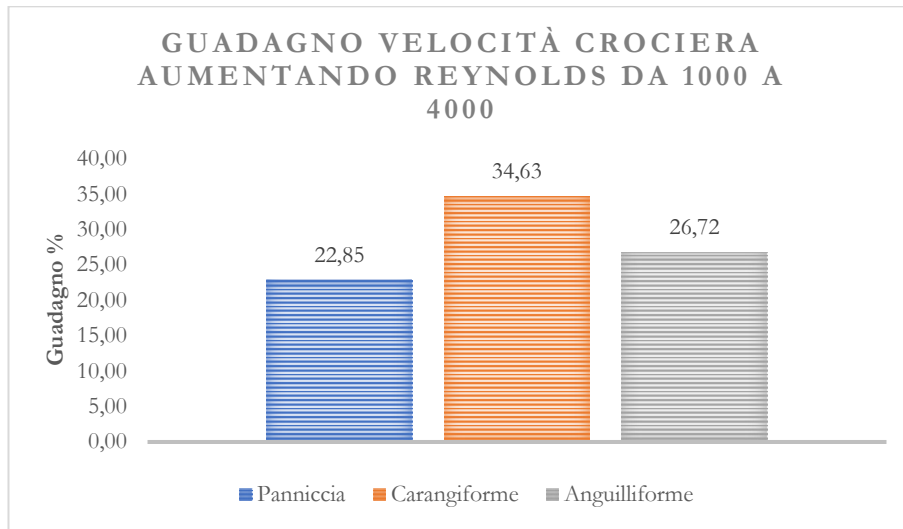


Figura 14: Grafico che rappresenta il guadagno sulla velocità di crociera andando ad aumentare il numero di Reynolds di riferimento per la simulazione. Confronto tra $Re_0 = 1000$ e $Re_0 = 4000$.

Dal grafico qui sopra possiamo andare ad osservare un fatto molto interessante. Si può vedere che il cinematismo sintetico [62], ha un guadagno in percentuale minore rispetto agli altri due cinematismi considerati. Possiamo giustificare questo fatto osservando l'ampiezza di oscillazione del suo corpo, che in media risulta più grande lungo la corda. Questo ci porta a dire che il cinematismo sintetico risente di una resistenza all'avanzamento maggiore rispetto a quella sentita da parte del cinematismo di tipo carangiforme. Andando ad aumentare il numero di Reynolds limitiamo la resistenza da parte degli sforzi viscosi, avendo però uno stile di nuotata così ampio non riduciamo la resistenza dovuta alla forma del pesce istante per istante. Attraverso questo ragionamento il fatto che il guadagno di velocità da parte del carangiforme sia maggiore risulta corretto. Esso in percentuale soffre maggiormente le forze viscosi rispetto a quelle di forma. Andando quindi a ridurre la viscosità del fluido il cinematismo di tipo carangiforme avrà un guadagno di velocità maggiore rispetto al cinematismo di tipo sintetico. Questo ragionamento si concretizza anche per il cinematismo di tipo anguilliforme che, avendo un'ampiezza media lungo la corda tra i due estremi, avrà un guadagno di

velocità che sta nel mezzo tra il cinematismo di tipo sintetico e quello di tipo carangiforme.

Andando ad osservare un qualsiasi campo di vorticità, possiamo notare che aumentando lo spessore, le vorticità rilasciate dalla coda risultano essere sempre più intense e concentrate in punti dello spazio più definiti.

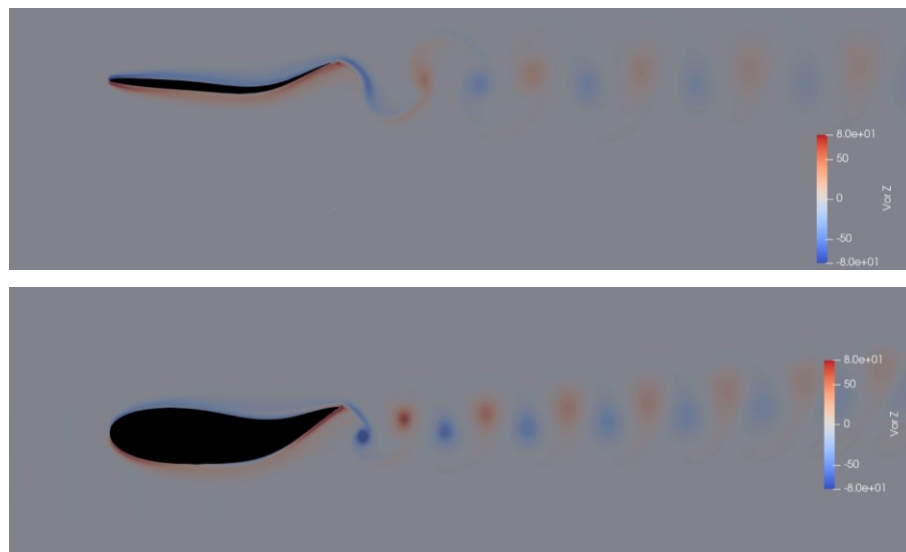


Figura 15: Rappresentazione del campo di vorticità prodotto da un profilo snello ed uno tozzo, aventi entrambi il cinematismo di tipo carangiforme. Si può notare che le vorticità generate dal corpo tozzo risultano essere più intense rispetto a quelle presenti nella scia del corpo snello.

Questo fenomeno sembra essere dovuto alla differenza di forma dei due profili. Più avanti prenderemo in considerazione anche la potenza che il pesce deve spendere per la propulsione e vedremo che un profilo tozzo, seppur arrivando ad una velocità di crociera più ridotta, dovrà spendere maggior energia. Così dicendo possiamo andare a giustificare le vorticità generate, le quali visivamente risultano essere più intense.

Andando, invece, a commentare le varie velocità di crociera confrontandole tra i diversi cinematismi, per le stesse condizioni in partenza (figura 16 e 17), si può osservare che nel caso del cinematismo di tipo sintetico [62], le velocità di crociera risultano essere più elevate

rispetto agli altri casi. Questo perché l'ampiezza dell'oscillazione è costante lungo la corda ed è più ampia, in media, rispetto alle altre tipologie di nuotata. Di conseguenza il cinematismo di tipo sintetico mette in movimento più fluido e trasferisce maggior energia, andando ad ottenere sicuramente una maggior spinta a discapito di una minor efficienza di nuotata, come si potrà vedere in seguito. Al secondo posto, sempre per quanto riguarda la velocità di crociera, osserviamo che il cinematismo di tipo carangiforme risulta essere, anche se di poco, più efficace rispetto a quello anguilliforme. Il cinematismo di tipo carangiforme avendo comunque, in media, un'ampiezza di oscillazione minore, permette di raggiungere delle velocità leggermente maggiori rispetto all'anguilliforme. La differenza tra le velocità di crociera dei due cinematismi va man mano a diminuire aumentando lo spessore del corpo, fino quasi a coincidere con il profilo Naca0024. Di seguito riporto due grafici che permettono di confrontare le velocità raggiunte con i vari cinematismi, per i due numeri di Reynolds considerati.

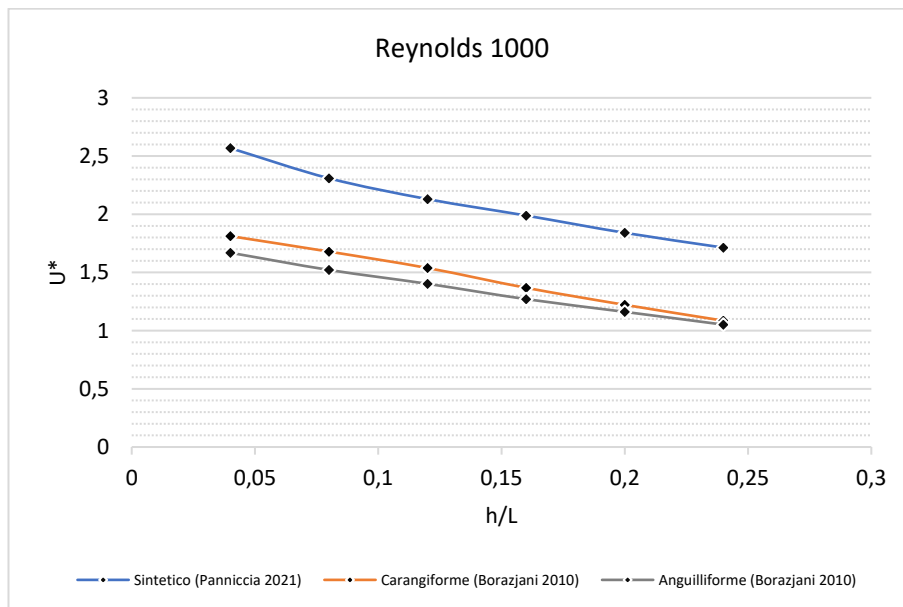


Figura 16: Grafico che rappresenta, per Reynolds 1000, l'andamento della velocità di crociera in relazione con lo spessore del corpo (h/L) confrontando le tre tipologie di cinematismo prese in esame.

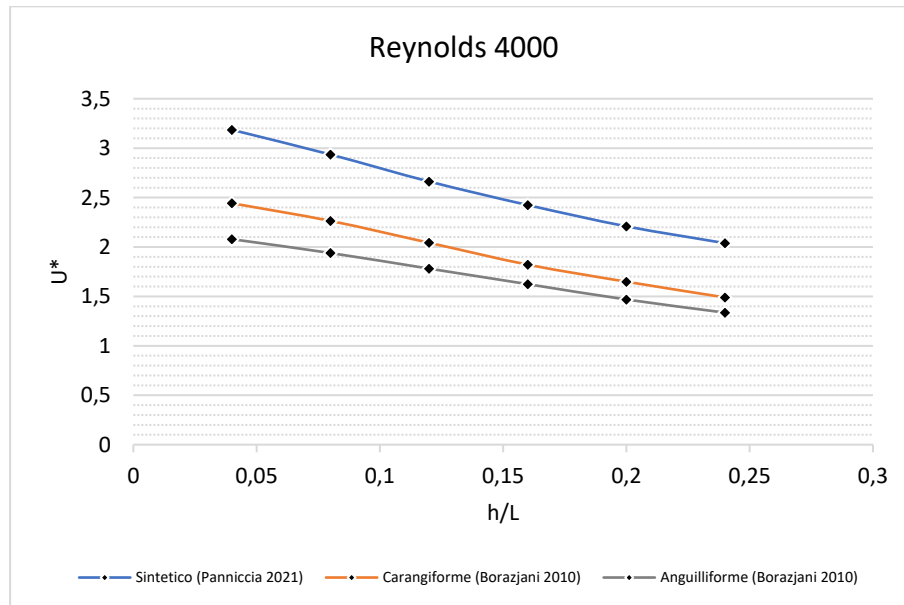


Figura 17: Grafico che rappresenta, per Reynolds 4000, l'andamento della velocità di crociera in relazione con lo spessore del corpo (h/L) confrontando le tre tipologie di cinematismo prese in esame.

Andando ora a vedere quale cinematismo risulta più sensibile al variare dello spessore, possiamo notare che in tutti e tre i casi abbiamo una perdita intorno ai 36 punti percentuali sulla velocità di crociera per il Naca0024 rispetto al Naca0004. Leggermente più sensibile all'incremento dello spessore risulta essere il carangiforme per entrambi i numeri di Reynolds. Di seguito riporto una tabella che presenta la differenza tra le velocità con corpo snello e corpo tozzo.

Tabella 3: Confronto tra corpo snello e corpo tozzo per quanto riguarda le velocità medie di crociera. In tutti i casi ci aggiriamo intorno a perdite di 36 punti percentuali per il corpo tozzo (Naca0024) rispetto al corpo snello (Naca0004).

Reynolds 1000			
	U* Naca0004	U* Naca0024	Perdita %
Sintetico	2,567918	1,713258	33,28
Carangiforme	1,811926	1,085648	40,08
Anguilliforme	1,669075	1,051563	37,00
Reynolds 4000			

	U* Naca0004	U* Naca0024	Perdita %
Sintetico	3,18555	2,038673	36,00
Carangiforme	2,442737	1,489745	39,01
Anguilliforme	2,079003	1,335911	35,74

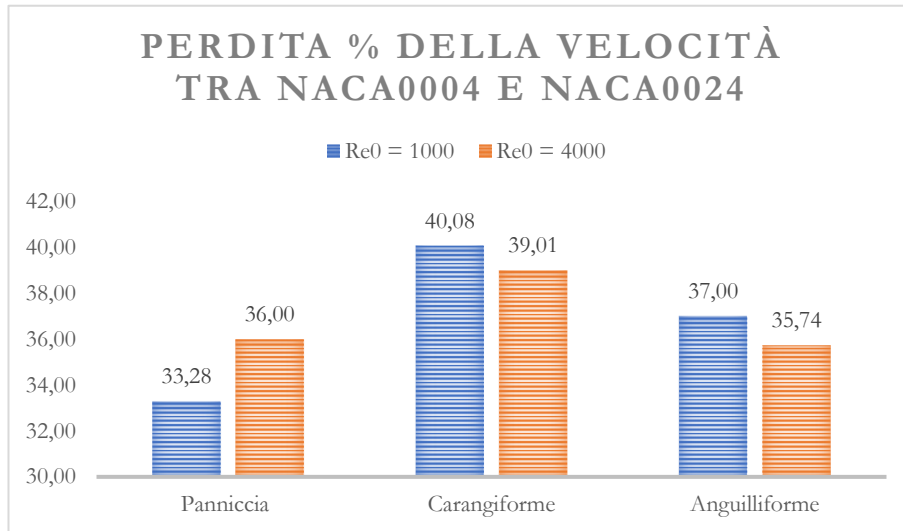


Figura 18: Perdita percentuale della velocità di crociera per un corpo tozzo (Naca0024) rispetto ad un corpo snello (Naca0004).

Dalla tabella e dal grafico riportati qui sopra notiamo delle differenze tra i vari cinematismi studiati. Innanzitutto, si può osservare che il carangiforme risulta perdere, in percentuale, più velocità all'aumentare dello spessore rispetto agli altri due casi. Questo perché, collegandoci al ragionamento fatto in precedenza, lo stile di nuotata è più sensibile ad un aumento dello spessore, in quanto soffre maggiormente una resistenza di carattere viscoso rispetto ad una di forma. Al contrario, il cinematismo che risulta risentire meno dell'aumento dello spessore è quello di tipo sintetico, in quanto un aumento della resistenza viscosa, dovuto all'aumento dello spessore, incide in modo minore sulla resistenza totale.

Il moto dei pesci consiste in oscillazioni periodiche che permettono di generare spinta. Queste oscillazioni fanno sì che la velocità di crociera non sia completamente costante ma che presenti dei massimi e dei minimi dovuti alla spinta non uniforme durante un battito di coda. Si può andare a valutare la differenza tra picco massimo e picco minimo di velocità

longitudinale, trasversale ed angolare. Di seguito riporto le tabelle riassuntive ed i rispettivi grafici per quanto riguarda la differenza tra velocità massima e minima assoluta (U^*), una volta che il pesce ha raggiunto la velocità di crociera.

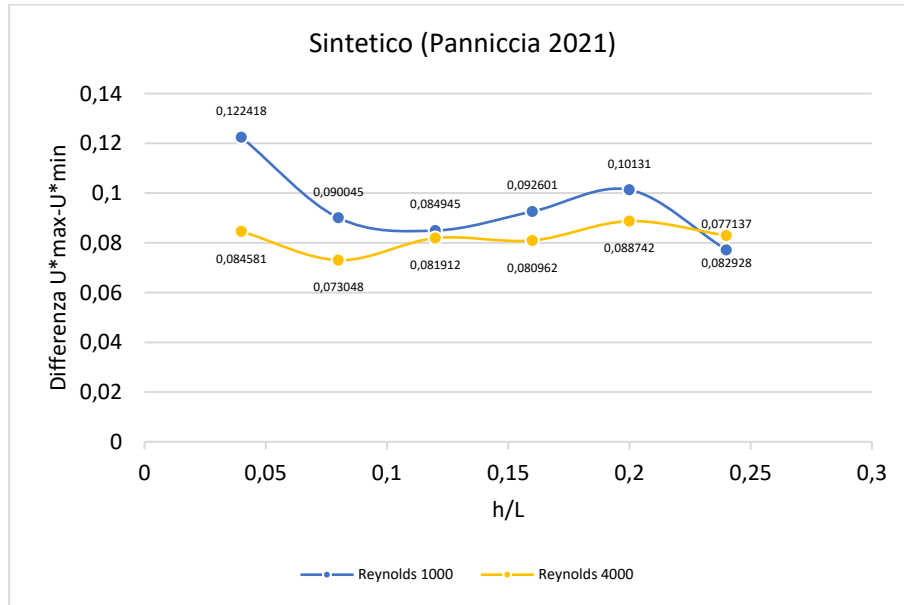


Figura 19: Grafico che rappresenta la differenza tra velocità massima e minima una volta che il pesce ha raggiunto la velocità di crociera. – Cinematismo sintetico

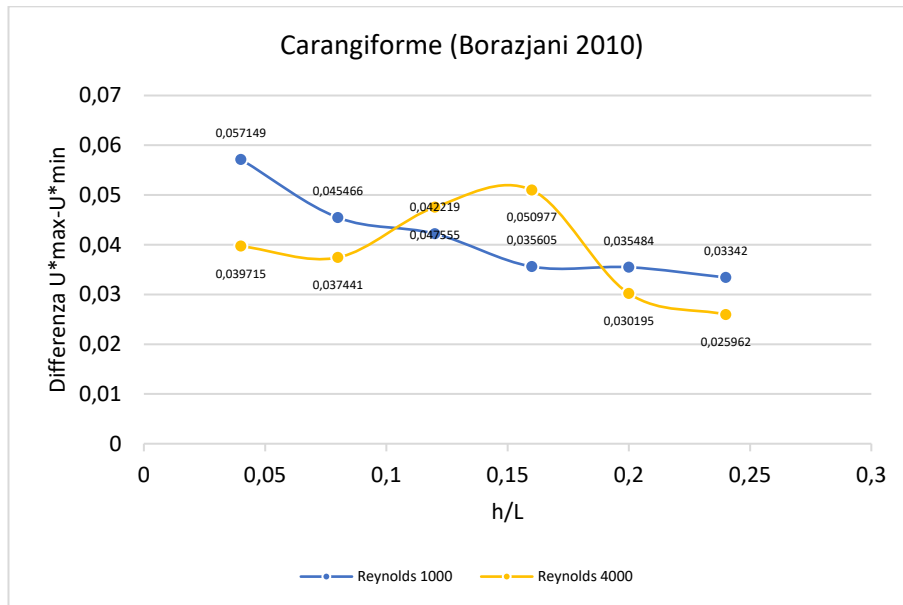


Figura 20: Grafico che rappresenta la differenza tra velocità massima e minima una volta che il pesce ha raggiunto la velocità di crociera. – Cinematismo carangiforme

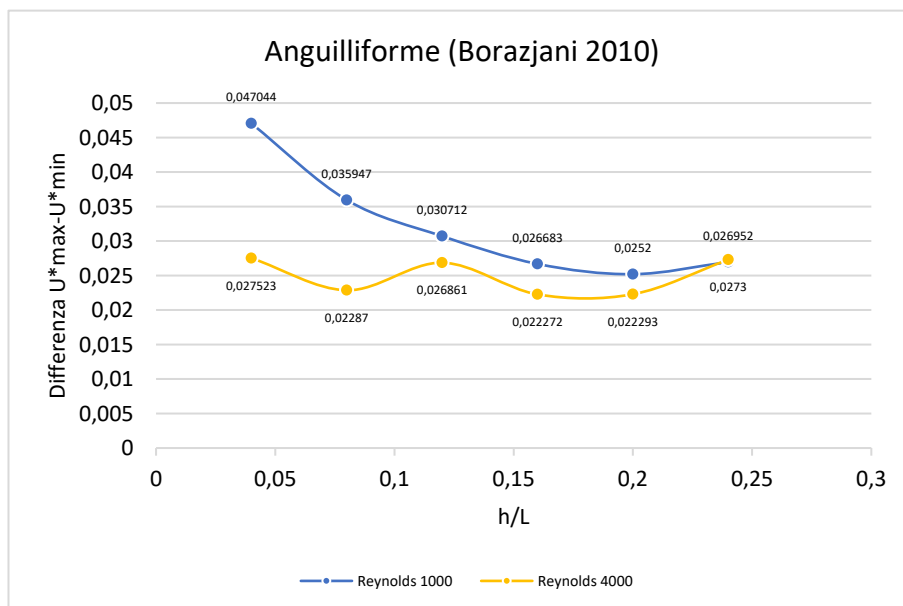


Figura 21: Grafico che rappresenta la differenza tra velocità massima e minima una volta che il pesce ha raggiunto la velocità di crociera. – Cinematismo anguilliforme

Tabella 4: Tabella che rappresenta i valori di differenza tra la velocità massima e minima raggiunta la velocità di crociera.

$Re_0 = 1000 - St_0 = 0.4$		
Sintetico (Panniccia 2021)		
h/L	U*	$U^*_{max} - U^*_{min}$
0,04	2,567918	0,122418
0,08	2,308993	0,090045
0,12	2,129908	0,084945
0,16	1,988591	0,092601
0,2	1,840352	0,10131
0,24	1,713258	0,077137
Carangiforme (Borazjani 2010)		
0,04	1,811926	0,057149
0,08	1,67901	0,045466
0,12	1,537924	0,042219
0,16	1,367725	0,035605
0,2	1,221634	0,035484
0,24	1,085648	0,03342
Anguilliforme (Borazjani 2010)		
0,04	1,669075	0,047044
0,08	1,521622	0,035947
0,12	1,40209	0,030712
0,16	1,270539	0,026683
0,2	1,161389	0,0252
0,24	1,051563	0,026952
$Re_0 = 4000 - St_0 = 0.4$		
Sintetico (Panniccia 2021)		
h/L	U*	$U^*_{max} - U^*_{min}$
0,04	3,18555	0,084581
0,08	2,935369	0,073048
0,12	2,662495	0,081912
0,16	2,424234	0,080962
0,2	2,20893	0,088742
0,24	2,038673	0,082928
Carangiforme (Borazjani 2010)		
0,04	2,442737	0,039715
0,08	2,263649	0,037441
0,12	2,042712	0,047555
0,16	1,821267	0,050977
0,2	1,648786	0,030195

0,24	1,489745	0,025962
Anguilliforme (Borazjani 2010)		
0,04	2,079003	0,027523
0,08	1,939042	0,02287
0,12	1,781228	0,026861
0,16	1,605399	0,031437
0,2	1,468681	0,022293
0,24	1,335911	0,0273

Nelle simulazioni andiamo ad assegnare dei valori caratteristici, come Re_0 e St_0 . Alla fine, si può andare a calcolare, in base alla velocità raggiunta dal pesce, il nuovo numero di Reynolds Re^* ed il numero di Strouhal effettivo St^* . Di seguito riporto quindi i valori di Re^* ed St^* adimensionalizzati con U^* .

Tabella 5: Valori di Re^* e St^* adimensionalizzati con U^* .

Sintetico - $Re_0 = 1000 - St_0 = 0.4$ - periodo 0.25						
h/L	NACA0004	NACA0008	NACA0012	NACA0016	NACA0020	NACA0024
U*	2,568	2,309	2,130	1,989	1,840	1,713
Re*	2567,9	2309,0	2129,9	1988,6	1840,4	1713,3
St*	0,16	0,17	0,19	0,20	0,22	0,23
Sintetico - $Re_0 = 4000 - St_0 = 0.4$ - periodo 0.25						
h/L	NACA0004	NACA0008	NACA0012	NACA0016	NACA0020	NACA0024
U*	3,186	2,935	2,662	2,424	2,209	2,039
Re*	12742,2	11741,5	10650,0	9696,9	8835,7	8154,692
St*	0,13	0,14	0,15	0,17	0,18	0,20
Carangiforme - $Re_0 = 1000 - St_0 = 0.4$ - periodo 0.25						
h/L	NACA0004	NACA0008	NACA0012	NACA0016	NACA0020	NACA0024
U*	1,812	1,679	1,538	1,368	1,222	1,086
Re*	1811,9	1679,0	1537,9	1367,7	1221,6	1085,6
St*	0,22	0,24	0,26	0,29	0,33	0,37
Carangiforme - $Re_0 = 4000 - St_0 = 0.4$ - periodo 0.25						
h/L	NACA0004	NACA0008	NACA0012	NACA0016	NACA0020	NACA0024
U*	2,443	2,264	2,043	1,821	1,649	1,490
Re*	9770,9	9054,6	8170,8	7285,1	6595,1	5958,980
St*	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,27
Anguilliforme - $Re_0 = 1000 - St_0 = 0.4$ - periodo 0.25						
h/L	NACA0004	NACA0008	NACA0012	NACA0016	NACA0020	NACA0024
U*	1,669	1,522	1,402	1,271	1,161	1,052

Re*	1669,1	1521,6	1402,1	1270,5	1161,4	1051,6
St*	0,24	0,26	0,29	0,31	0,34	0,38
Anguilliforme - $Re_0 = 4000 - St_0 = 0.4$ - periodo 0.25						
h/L	NACA0004	NACA0008	NACA0012	NACA0016	NACA0020	NACA0024
U*	2,079	1,939	1,781	1,605	1,469	1,336
Re*	8316,0	7756,2	7124,9	6421,6	5874,7	5343,6
St*	0,19	0,21	0,22	0,25	0,27	0,30

Dalle tabelle qui sopra si può fare una considerazione interessante: si può notare che i valori di St^* sono compresi tra circa 0.2-0.4 per tutti i casi studiati. Questo range di valori è tipico per la maggior parte di pesci [30]. Si può notare come variando lo spessore e diminuendo di conseguenza la velocità di crociera, il numero di Strouhal va ad aumentare leggermente ma pur sempre rimanendo sul range classico. Osservando invece il numero di St^* , al variare di Re_0 , si può vedere bene come per ogni stile di nuotata, andando ad aumentare il numero di Re_0 avremo una diminuzione di St^* .

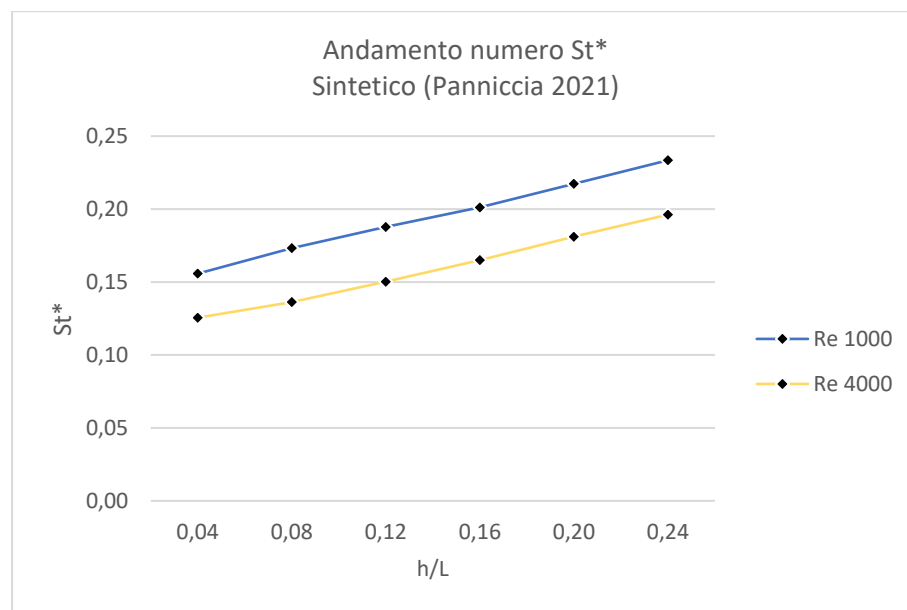


Figura 22: Andamento del numero di St^* al variare del rapporto spessore su lunghezza caratteristica per i casi con Reynolds 1000 e 4000. Cinematismo di tipo sintetico.

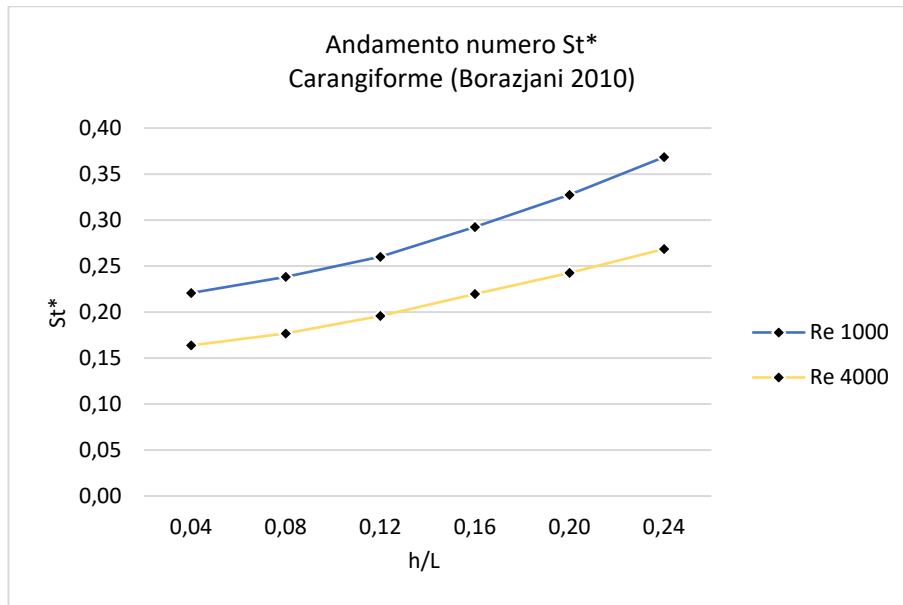


Figura 23: Andamento del numero di St^* al variare del rapporto spessore su lunghezza caratteristica per i casi con Reynolds 1000 e 4000. Cinematismo di tipo carangiforme.

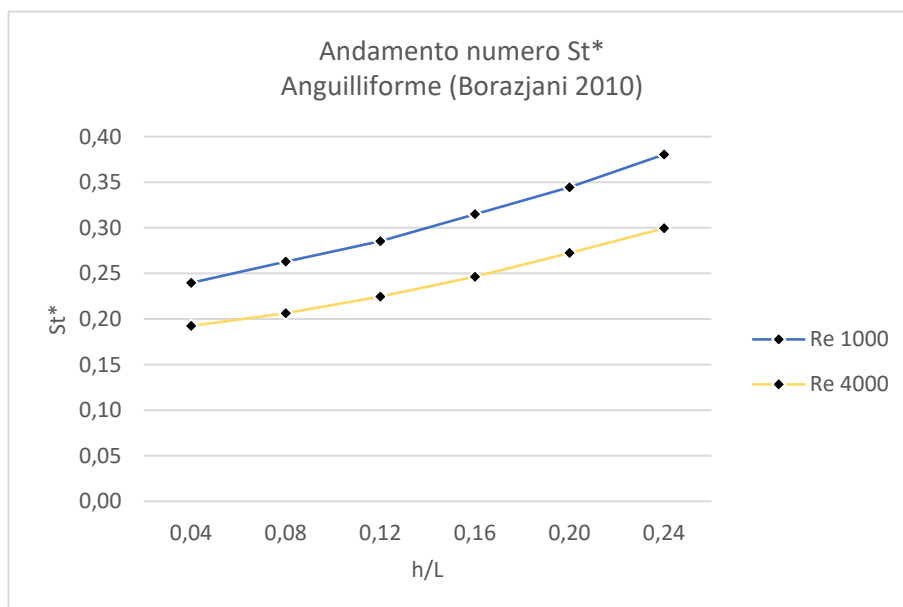


Figura 24: Andamento del numero di St^* al variare del rapporto spessore su lunghezza caratteristica per i casi con Reynolds 1000 e 4000. Cinematismo di tipo anguilliforme.

Considerando ancora il numero di St^* , andiamo ora a confrontare i vari cinematismi; si può vedere che per entrambi i numeri di Re_0 l'anguilliforme ha valori di St^* leggermente più grandi.

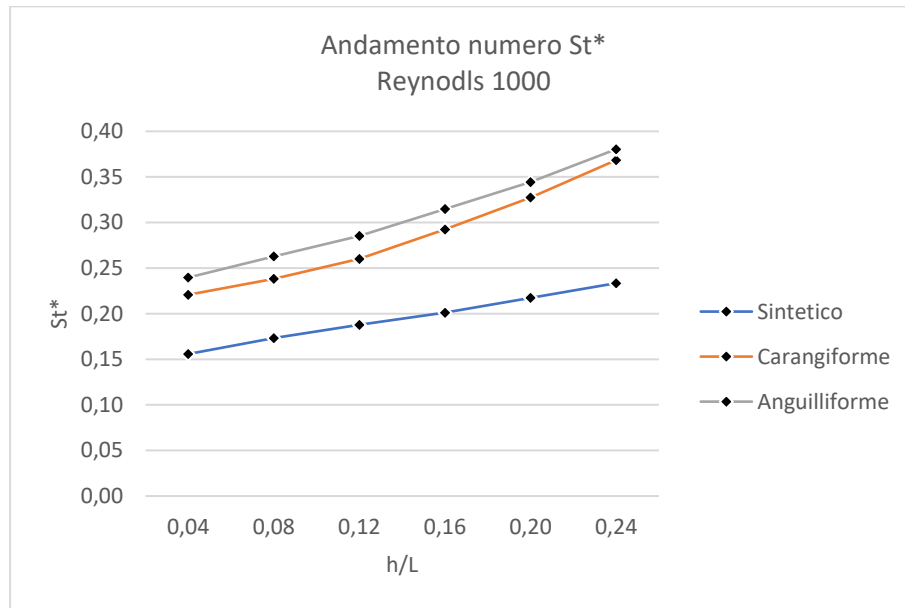


Figura 25: Andamento del numero di St^* al variare del rapporto spessore su lunghezza caratteristica confrontando le tre diverse tipologie di cinematismo nel caso di Reynolds pari a 1000.

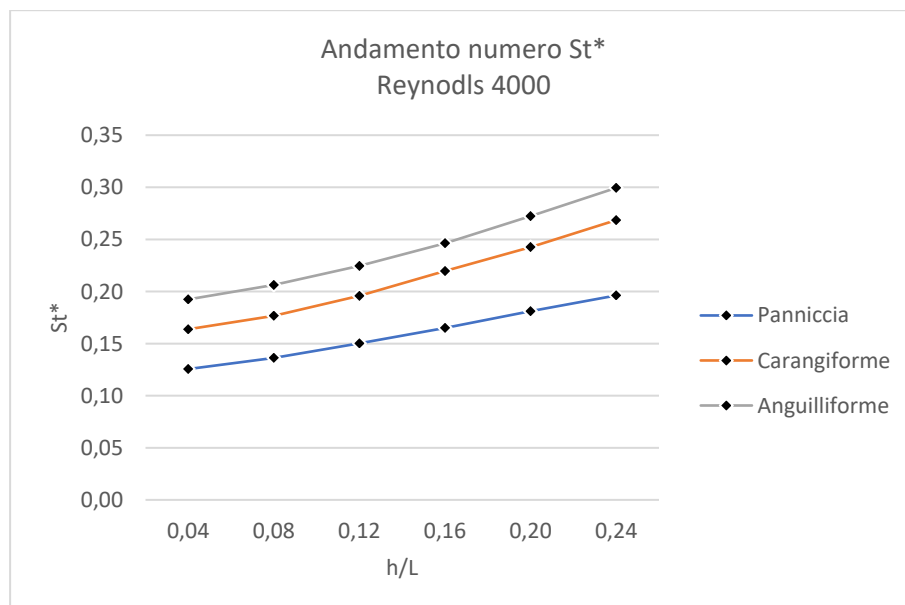


Figura 26: Andamento del numero di St^* al variare del rapporto spessore su lunghezza caratteristica confrontando le tre diverse tipologie di cinematismo nel caso di Reynolds pari a 4000.

Parlando ora di efficienza, possiamo trarre alcune considerazioni. In una fase preliminare di studio, si è deciso di analizzare l'efficienza attraverso il modello EBT [27]. Come definito anche nei capitoli precedenti si può semplificare il calcolo dell'efficienza di Froude attraverso il seguente modo:

$$\eta_{EBT} = \frac{1}{2} \cdot (1 + \beta) = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{U^*P}{\lambda}\right),$$

dove $\beta = U/V$ è la *slip velocity*, definita come il rapporto tra la velocità di nuotata U e la velocità di propagazione dell'onda dovuta all'ondulazione del corpo V . Questo modello è valido in condizioni inviscide, perciò non andrebbe bene nel nostro caso di studio. Abbiamo comunque deciso di utilizzare questo metodo per il fatto che il calcolo risulta molto rapido. Una volta che conosciamo la velocità di crociera e la velocità dell'onda da parte della deformazione del corpo non abbiamo bisogno di altro. Non vi è quindi bisogno di conoscere né la spinta generata dal pesce né l'energia spesa durante la sua nuotata. Un secondo modo per valutare l'efficienza è il CoT, noto come costo di trasporto. Con questo metodo dobbiamo conoscere l'energia spesa dal pesce per percorrere una determinata distanza, oppure la potenza e la velocità mediate in più periodi di propulsione. Possiamo calcolare il CoT nel seguente modo:

$$CoT = \frac{E}{d} = \frac{P_{mean}}{U_{mean}},$$

ove E è l'energia spesa per coprire una determinata distanza d , P_{mean} è la potenza spesa per la propulsione e U_{mean} è la velocità di crociera, entrambe le grandezze sono mediate su più cicli di nuotata. Il metodo da noi utilizzato è stato quello di valutare un rendimento di propulsione, per il semplice motivo che viene ricavato dal rapporto di due potenze in modo da valutare una grandezza adimensionale. Conoscendo la potenza spesa dal corpo per mantenere la velocità di crociera (P^+) e la potenza che bisognerebbe spendere per tenere in posizione il profilo in esame, senza alcuna deformazione, alla velocità di crociera da lui raggiunta in

precedenza (P_0), si è in grado di valutare il rendimento sopra citato in questo modo:

$$R = \frac{P_0}{P_+}$$

Andiamo prima a commentare i risultati ottenuti valutando l'efficienza di Froude, calcolata attraverso il modello EBT. Viene riportata in seguito una tabella che riassume i risultati per ogni caso analizzato.

Tabella 6: Efficienza di Froude calcolata attraverso il modello EBT per i vari casi analizzati durante lo studio in esame.

Sintetico - Reo=1000 - periodo 0.25 - Sto=0.4						
h/L	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24
η_{EBT} [%]	82,10	78,86	76,62	74,86	73,00	71,42
Sintetico - Reo=4000 - periodo 0.25 - Sto=0.4						
h/L	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24
η_{EBT} [%]	89,82	86,69	83,28	80,30	77,61	75,48
Carangiforme - Reo=1000 - periodo 0.25 - Sto=0.4						
h/L	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24
η_{EBT} [%]	73,84	72,09	70,24	68,00	66,07	64,28
Carangiforme - Reo=4000 - periodo 0.25 - Sto=0.4						
h/L	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24
η_{EBT} [%]	82,14	79,78	76,88	73,96	71,69	69,60
Anguilliforme - Reo=1000 - periodo 0.25 - Sto=0.4						
h/L	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24
η_{EBT} [%]	82,50	79,63	77,30	74,74	72,61	70,47
Anguilliforme - Reo=4000 - periodo 0.25 - Sto=0.4						
h/L	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24
η_{EBT} [%]	90,48	87,75	84,68	81,62	78,60	76,01

Dalla definizione di η_{EBT} , dato che manteniamo la stessa frequenza di oscillazione della coda andando a confrontare spessori differenti, l'efficienza andrà calando all'aumentare dello spessore. Questo perché le velocità di crociera ottenute dalla nostra analisi diminuiscono. Dato che nei diversi casi andiamo a cambiare solo lo spessore del corpo, attraverso questo modello semplificato, otteniamo che anche questi andamenti risultano lineari con il variare dello spessore. Questo perché l'unico

parametro della formula che cambia è la velocità di crociera. Quello che possiamo osservare dal calcolo dell'efficienza di Froude è quindi che, attraverso il modello EBT, non prendiamo in considerazione l'ampiezza di oscillazione, la quale sicuramente a livello di consumo di energia risulta rilevante. Basti considerare la grande differenza di oscillazione tra un pesce che sfrutta il cinematismo sintetico [62] ed uno che sfrutta il cinematismo carangiforme [20]. Nel secondo caso otteniamo velocità di nuotata leggermente inferiori ma con un'ampiezza media lungo la corda nettamente più piccola. Questo fatto sicuramente influenzerà l'energia consumata dal pesce durante la propulsione.

Come detto in precedenza, per valutare la bontà della nuotata dei casi studiati è stato calcolato un rendimento, il quale si trova facendo il rapporto tra due potenze: (1) la potenza spesa dal pesce per mantenersi alla velocità di crociera raggiunta, (2) la potenza spesa per tenere fisso in un punto il profilo, senza deformazioni, alla stessa velocità di crociera. Andando a valutare questo rapporto per tutti i casi studiati si notano andamenti simili, ed altri no, a quelli riscontrati con l'efficienza di Froude, calcolata usando il modello EBT proposto da Lighthill [27]. Non otteniamo più, però, un andamento lineare in quanto nel calcolo della potenza influiranno sicuramente altri parametri, come l'ampiezza di oscillazione, oltre che la velocità di nuotata.

Innanzitutto, dai grafici riportati qui sotto, si può notare che all'aumentare dello spessore il rendimento cala, per entrambi i numeri di Re_0 analizzati. Questo vuol dire che un corpo tozzo spende più energia rispetto ad un corpo snello per la locomozione semovente. Di seguito possiamo vedere tre grafici che corrispondono ai tre cinematismi di nuotata studiati.

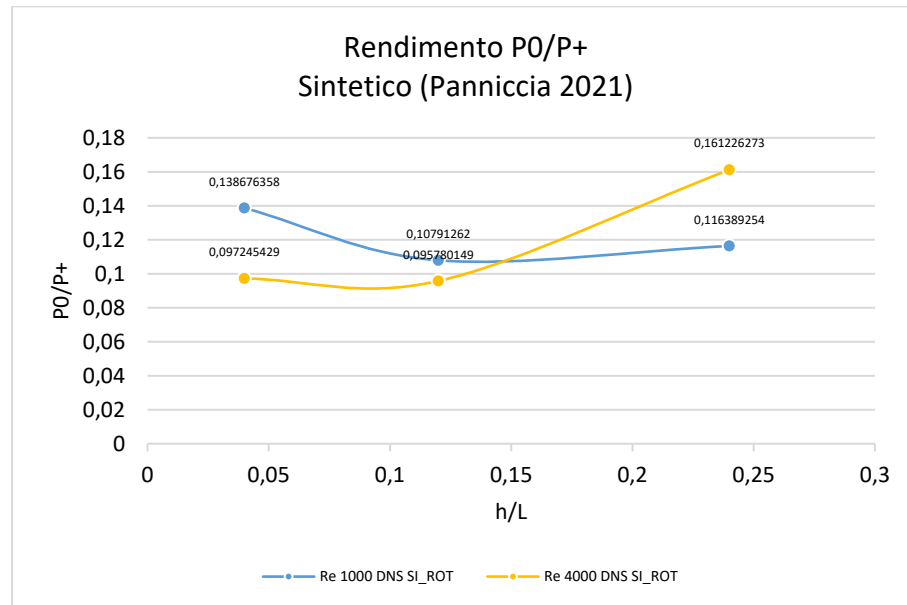


Figura 27: Rendimento di propulsione per il cinematismo di tipo sintetico all'aumentare dello spessore.

Diversamente da quanto detto, osservando questo grafico (figura 27), si può però notare un andamento particolare. Osserviamo che, a differenza dagli altri stili di nuotata, all'aumentare dello spessore vi è un timido incremento del rendimento, soprattutto con Re_0 pari a 4000. Per quanto riguarda il numero di Reynolds pari a 1000 si osserva un leggero calo di efficienza all'aumentare dello spessore. Possiamo inoltre notare un'intersezione tra le due curve che ci permette di affermare che per Reynolds 1000 si preferisce, in termini di efficienza, un corpo snello, al contrario invece, nell'altro caso si preferisce un corpo tozzo. Per poter approfondire questo fenomeno sarebbe interessante sviluppare ulteriori simulazioni a diversi numeri di Reynolds.

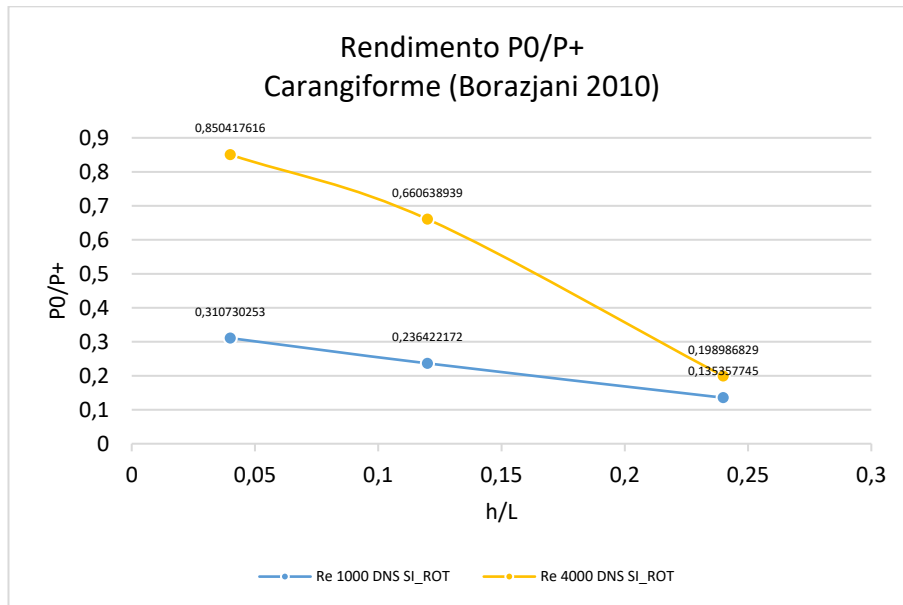


Figura 28: Rendimento di propulsione per il cinematismo di tipo carangiforme all'aumentare dello spessore.

Nel caso del cinematismo di tipo carangiforme (figura 28) si può notare che il rendimento diminuisce linearmente, in prima approssimazione, all'aumentare dello spessore. Il fatto più interessante da commentare è che aumentando il numero di Reynolds, per un corpo snello, si ha un grande incremento del rendimento, passando dal 31% al 85%. Questa differenza va man mano a diminuire, fino quasi ad annullarsi, con il profilo Naca0024. Prendendo in considerazione, ancora, il numero di Reynolds più grande ed andando a confrontare separatamente gli andamenti del numeratore e del denominatore del rendimento, possiamo notare che all'aumentare dello spessore l'incremento di P_0 è molto più limitato rispetto a quello di P_+ . Questo fatto porta a dire che vi è una grande sensibilità, da parte del carangiforme, nel passare da profili sottili a profili spessi. Nel seguente grafico riporto l'andamento di P_0 e di P_+ , utile per notare un netto incremento di P_+ rispetto a P_0 .

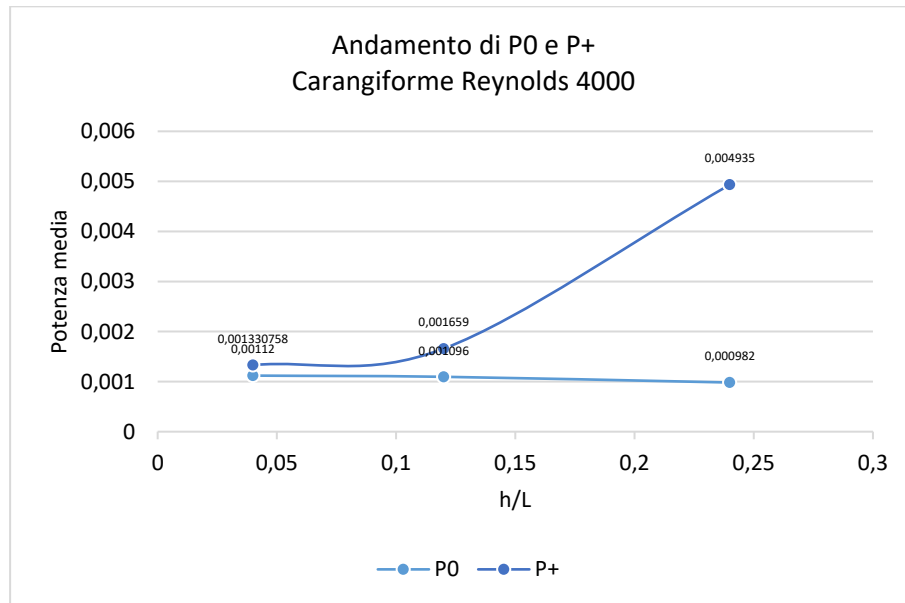


Figura 29: Andamento delle due potenze che definiscono il rendimento. P0 si riferisce alla potenza che è necessario spendere per tenere un profilo immobile fisso in un punto alla velocità di crociera raggiunta dallo stesso profilo mentre nuota. P+ si riferisce alla potenza spesa dal pesce per mantenere la velocità di crociera raggiunta. – Caso Carangiforme, Reynolds 4000.

Possiamo osservare che un aumento di spessore non influisce sulla potenza spesa per tenere il pesce fermo (P0) grazie anche al fatto che vi è un calo della velocità di crociera. È ormai noto che con l'aumento dello spessore il pesce riesce a raggiungere velocità sempre più basse. Andando ad osservare, invece, la potenza spesa per mantenere il pesce in movimento, si può notare come passando da un profilo Naca0012 ad un profilo Naca0024 la potenza P+ cresce di un ordine di grandezza. Questo fenomeno può essere giustificato dal fatto che aumentando lo spessore del corpo dobbiamo mettere in movimento più massa di fluido rispetto a quanta ne sposterebbe un profilo sottile, perciò, sarà necessario un maggior consumo di energia. Lo stile carangiforme, per entrambi i numeri di Reynolds, risulta quindi essere particolarmente sensibile al variare dello spessore del corpo. Diverso da questo stile di nuotata risulta il rendimento trovato per il cinematismo di tipo anguilliforme (vedi figura 30).

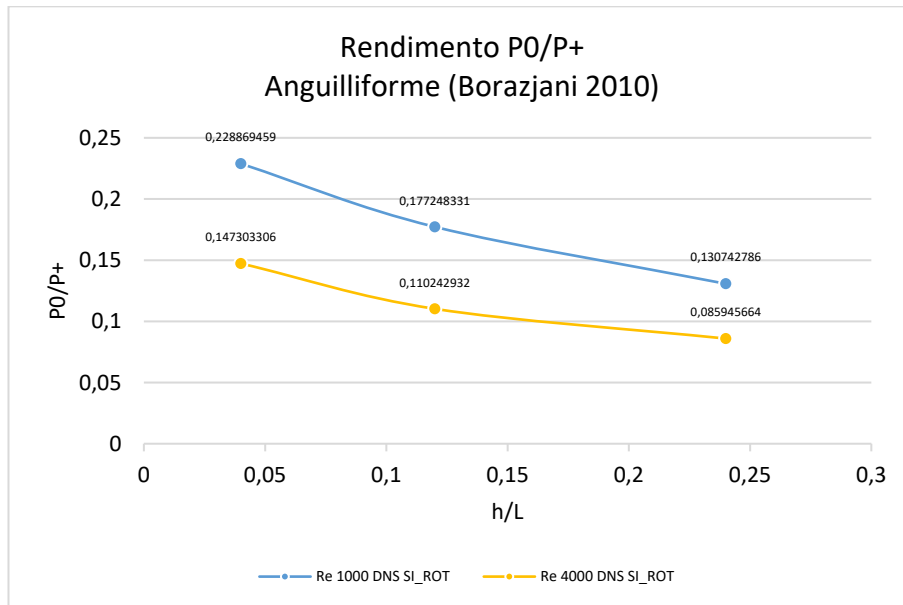


Figura 30: Rendimento di propulsione per il cinematiso di tipo anguilliforme all'aumentare dello spessore.

Dal grafico sopra riportato, la differenza che salta subito agli occhi, rispetto al cinematiso di tipo carangiforme, è quella che per Reynolds 4000 il rendimento è più basso, rispetto al caso con Reynolds 1000. In termini di efficienza, quindi, possiamo dire che nuotare grazie ad un cinematiso di tipo anguilliforme risulta più efficiente a numeri di Reynolds bassi. Per confermare questa tendenza potrebbe essere interessante svolgere un ulteriore studio con un numero di Reynolds più piccolo di 1000. Dal grafico sopra riportato possiamo osservare anche che le due curve hanno lo stesso andamento, distinguendosi ulteriormente dallo stile carangiforme. In questo caso vi sarà comunque una differenza crescente tra P_0 e P_+ all'aumentare dello spessore, ma non tanto grande quanto per lo stile carangiforme. Riporto, per completezza, un grafico che rappresenta P_0 e P_+ per lo stile anguilliforme con Reynolds pari a 4000.

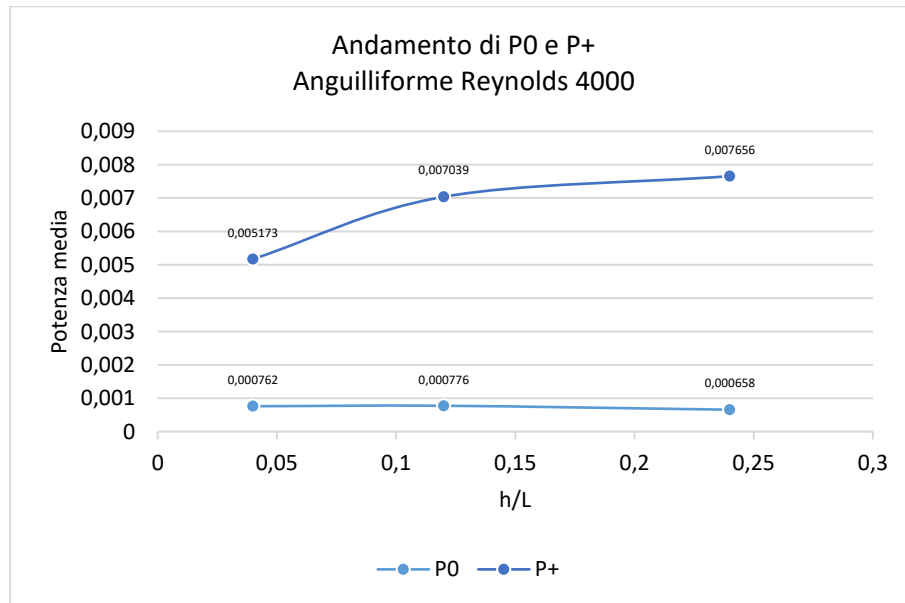


Figura 31: Andamento delle due potenze che definiscono il rendimento. P_0 si riferisce alla potenza che è necessario spendere per tenere un profilo immobile fisso in un punto alla velocità di crociera raggiunta dallo stesso profilo mentre nuota. P_+ si riferisce alla potenza spesa dal pesce per mantenere la velocità di crociera raggiunta. – Caso Anguilliforme, Reynolds 4000.

Passiamo ora a valutare le principali differenze in termini di rendimento confrontando i tre stili di nuotata a parità di condizioni. Di seguito riporto, quindi, due grafici che raggruppano i tre stili di nuotata a parità di ambiente fluidodinamico (fissato Re_0).

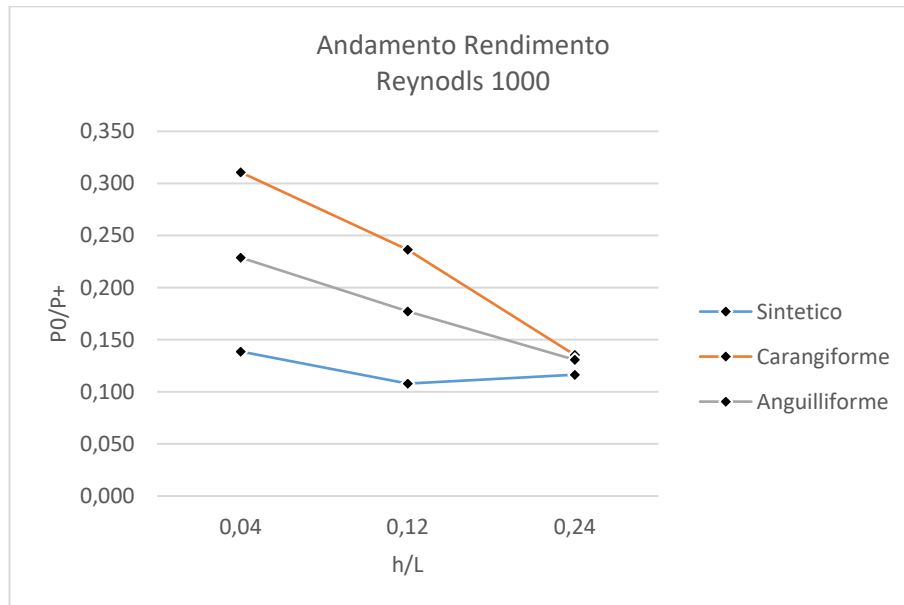


Figura 32: Rendimento per Reynolds 1000 all'aumentare dello spessore. A confronto vediamo i tre diversi cinematismi.

Riferendoci al grafico sopra riportato, possiamo notare come all'aumentare dello spessore il rendimento da parte del carangiforme si avvicina sempre di più al rendimento dell'anguilliforme. Arrivando poi al profilo Naca0024 possiamo vedere che i due rendimenti sono molto simili (vedi figura 32). Si può quindi affermare, in termini di efficienza, che le maggiori differenze tra diversi cinematismi le possiamo notare con profili ragionevolmente sottili. Man mano che ci avviciniamo a spessori dell'ordine del 24% sulla lunghezza del corpo, i tre stili di nuotata vanno in secondo piano andando ad influire molto meno sull'efficienza della nuotata. Questo fatto si può notare anche in figura 33, nel caso di Reynolds 4000. Notiamo un grande rendimento per lo stile carangiforme con profilo snello, ma man mano che aumentiamo lo spessore il valore cala drasticamente, arrivando a valori simili ottenuti anche con gli altri stili di nuotata.

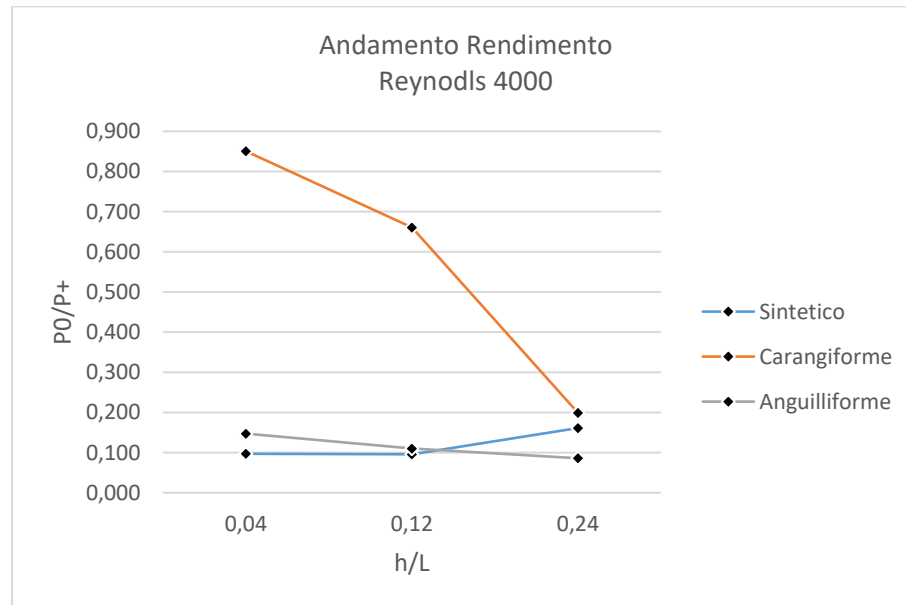


Figura 33: Rendimento per Reynolds 4000 all'aumentare dello spessore. A confronto vediamo i tre diversi cinematismi.

Ulteriore aspetto da osservare è che per Reynolds pari a 4000, tra anguilliforme e sintetico non vi è più una grande differenza in termini di efficienza, come si può notare con Reynolds 1000. Attraverso questi risultati possiamo affermare che il cinematismo di tipo carangiforme è preferibile, sempre in termini di efficienza, a quello anguilliforme per numeri di Reynolds più grandi. Al contrario, svolgendo delle ulteriori simulazioni, per Reynolds più piccoli, si dovrebbe osservare che lo stile anguilliforme risulta essere più efficiente rispetto a quello carangiforme.

Di seguito riporto due grafici, per i due numeri di Reynolds analizzati, i quali vanno a rappresentare, preso in esame lo spessore su lunghezza caratteristica del 12%, il rendimento.

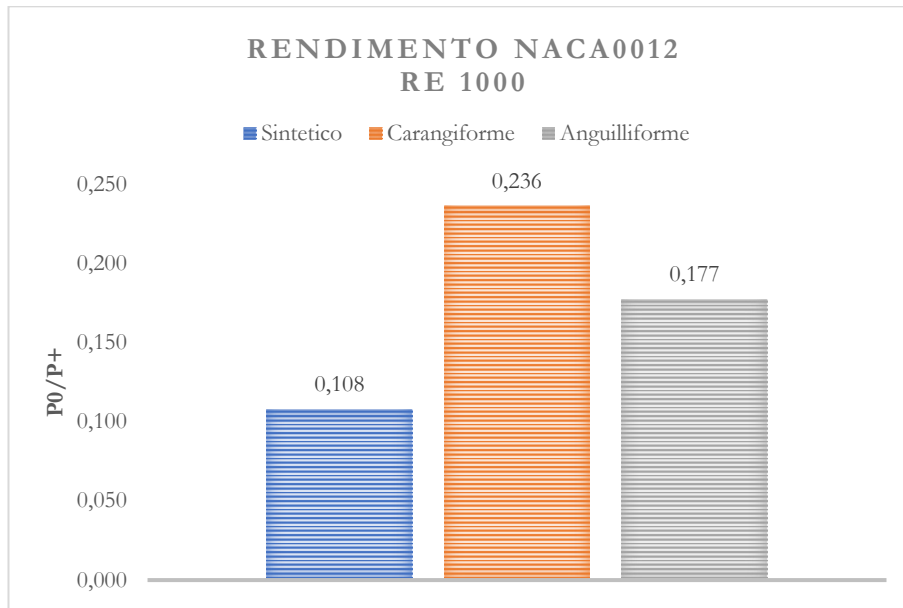


Figura 34: Rendimento per Reynolds 1000 preso in esame il profilo Naca0012. A confronto vediamo i tre diversi cinematismi.

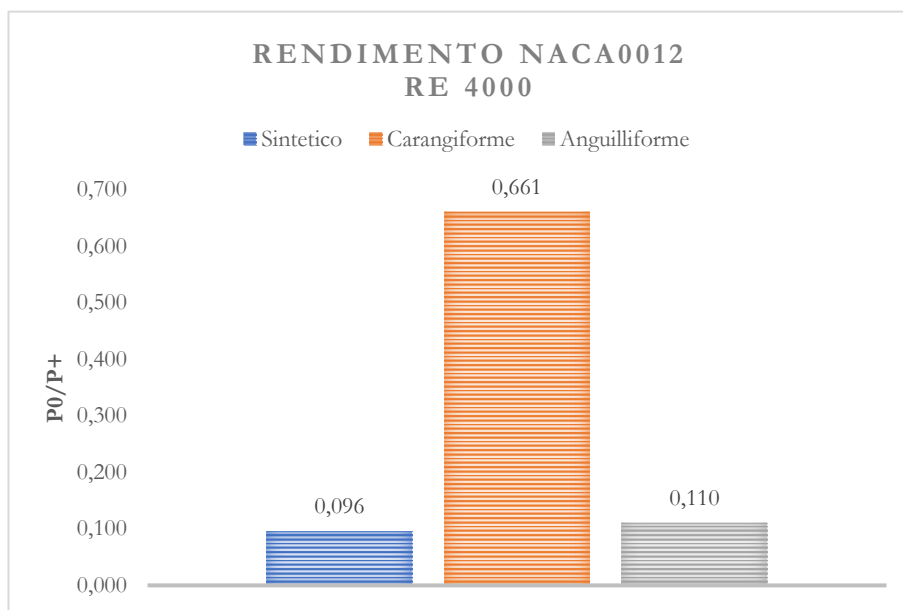


Figura 35: Rendimento per Reynolds 4000 preso in esame il profilo Naca0012. A confronto vediamo i tre diversi cinematismi.

Dai grafici possiamo evidenziare, nel caso di Reynolds 4000, quanto lo stile carangiforme risulta essere più efficiente rispetto agli altri due cinematismi. Lo stile di nuotata sintetico ed anguilliforme, per questo spessore, risultano avere rendimenti simili. Nel caso di Reynolds pari a

mille il rendimento da parte del carangiforme risulta essere più basso e quindi quasi al livello degli altri due stili di nuotata.

Come affermato prima, vari articoli osservano che per numeri di Reynolds bassi, lo stile di nuotata anguilliforme dovrebbe essere più efficiente rispetto a quello carangiforme. L'unico modo per verificare questo fenomeno sarebbe quello di svolgere altre simulazioni con un numero di Reynolds più piccolo di 1000. Di seguito vengono riportati in tabella i valori dei rendimenti per tutti i casi studiati.

Tabella 7: Valori del rendimento (P_0/P_+) per tutti i casi analizzati.

Sintetico - Reo=1000 - periodo 0.25 - Sto=0.4			
h/L	NACA0004	NACA0012	NACA0024
P0/P+	0,139	0,108	0,116
Sintetico - Reo=4000 - periodo 0.25 - Sto=0.4			
h/L	NACA0004	NACA0012	NACA0024
P0/P+	0,097	0,096	0,161
Carangiforme - Reo=1000 - periodo 0.25 - Sto=0.4			
h/L	NACA0004	NACA0012	NACA0024
P0/P+	0,311	0,236	0,135
Carangiforme - Reo=4000 - periodo 0.25 - Sto=0.4			
h/L	NACA0004	NACA0012	NACA0024
P0/P+	0,850	0,661	0,199
Anguilliforme - Reo=1000 - periodo 0.25 - Sto=0.4			
h/L	NACA0004	NACA0012	NACA0024
P0/P+	0,229	0,177	0,131
Anguilliforme - Reo=4000 - periodo 0.25 - Sto=0.4			
h/L	NACA0004	NACA0012	NACA0024
P0/P+	0,147	0,110	0,086

Oltre all'analisi prettamente concentrata sullo spessore, possiamo trarre diverse considerazioni dalle simulazioni svolte e dallo studio di articoli che trattano questo tipo di analisi.

Struttura della scia

In questo paragrafo possiamo andare ad approfondire il tema che riguarda la non diretta relazione tra struttura della scia e performance della nuotata.

Questi due argomenti devono essere trattati come due differenti argomenti ma interconnessi. Come detto nei capitoli precedenti e come è stato affermato da molti studi, non è possibile andare a valutare le performance della nuotata osservando qualitativamente la struttura della scia. Ogni forma del corpo e cinematismi diversi possono essere ugualmente efficienti ma avere due tipologie di scia differenti. Quello che ci può comunicare la scia, da un lato qualitativo, è l'impronta del pesce. Come l'impronta a terra di un qualsiasi animale permette di riconoscerlo, la scia nei pesci permette di riconoscere specie diverse. Dai nostri studi, avendo simulato diversi spessori e cinematismi, per lo stesso profilo, è come se stessi confrontando diverse tipologie di pesci. Di conseguenza andando a vedere la scia generata, ad esempio, da pesci snelli sarà diversa rispetto a quella generata da pesci con corpo tozzo. La prima differenza che possiamo osservare dalla scia di un corpo snello rispetto ad un corpo tozzo riguarda la concentrazione di vorticità. Come possiamo vedere nella figura sotto si nota che le vorticità generate da un corpo snello sono più distribuite rispetto alle vorticità generate da un corpo tozzo, le quali sono più intense e concentrate in un singolo punto.

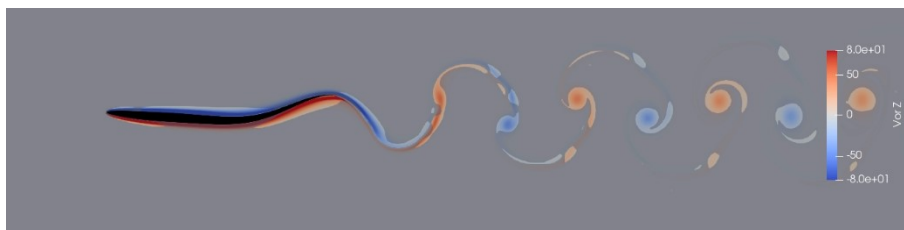


Figura 36: Reynolds pari a 4000 – Cinematismo carangiforme – Naca0004 – Campo di vorticità.

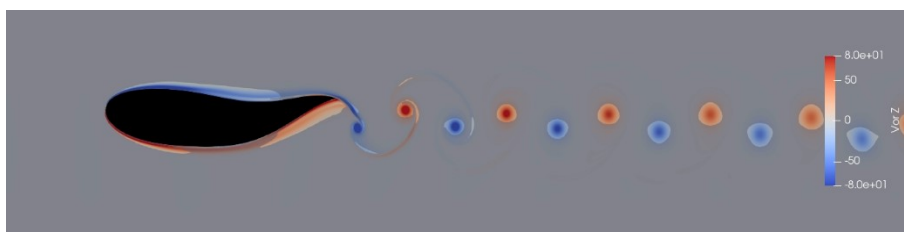


Figura 37: Reynolds pari a 4000 – Cinematismo carangiforme – Naca0024 – Campo di vorticità.

Lo stesso fenomeno si può osservare anche per i cinematismi di tipo sintetico e di tipo anguilliforme. Riporto per completezza i rispettivi campi di vorticità per un ulteriore confronto qualitativo.

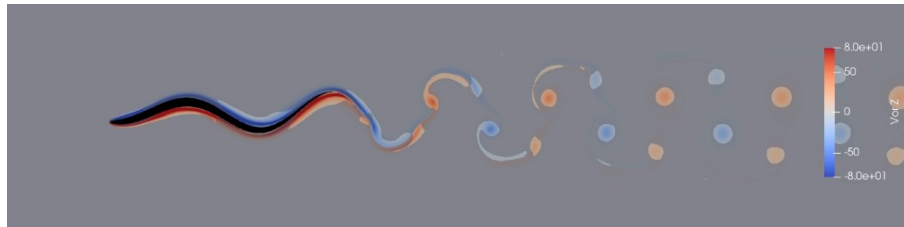


Figura 38: Reynolds pari a 4000 – Cinematismo anguilliforme – Naca0004 – Campo di vorticità.

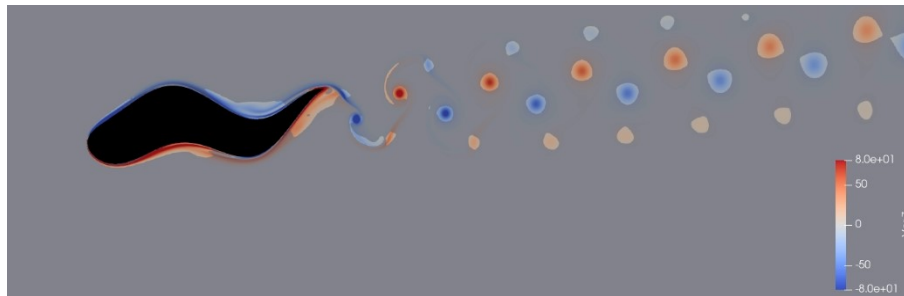


Figura 39: Reynolds pari a 4000 – Cinematismo anguilliforme – Naca0024 – Campo di vorticità.

Osservando la scia per il cinematismo di tipo anguilliforme notiamo innanzitutto che si tratta di una scia doppia. Si può notare che per ogni battito di coda vengono generati due vortici separati, uno di intensità maggiore rispetto al secondo, più esterno. Per il profilo snello si nota comunque quanto affermato prima, la vorticità è maggiormente distribuita lungo la scia a differenza del profilo tozzo, la quale viene concentrata in punti più marcati.

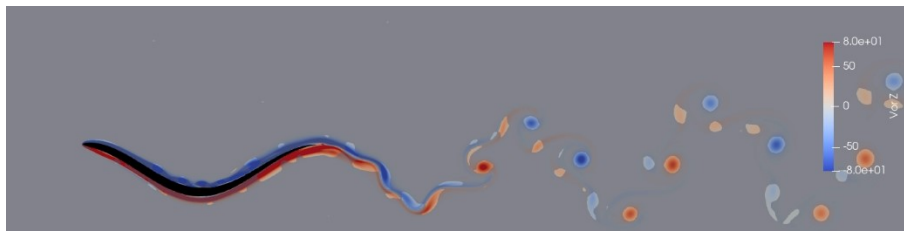


Figura 40: Reynolds pari a 4000 – Cinematismo sintetico – Naca0004 – Campo di vorticità.

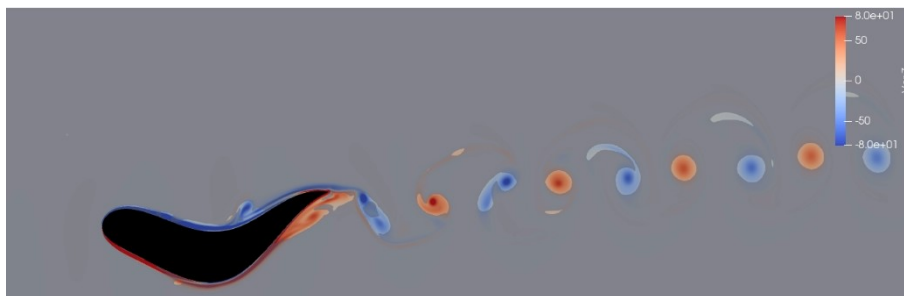


Figura 41: Reynolds pari a 4000 – Cinematismo sintetico – Naca0024 – Campo di vorticità.

Nell' ultimo caso a confronto, il cinematismo di tipo sintetico, possiamo notare una scia ancora diversa. Per il corpo snello si osservano delle vorticità doppie per ogni battito di coda. Andando, però, ad aumentare lo spessore del profilo si passa ad una struttura della scia più classica.

Possiamo fare le stesse osservazioni anche per il caso con Reynolds pari a 1000 (si vedano le figure sotto). Risulta però più complesso perché le differenze tra le varie scie sono meno marcate. Si può osservare infatti che per un cinematismo di tipo anguilliforme con Reynolds pari a 1000 non abbiamo più una doppia scia. Si può notare comunque che la scia generata dal corpo tozzo è più concentrata ed intensa di quella del corpo snello.

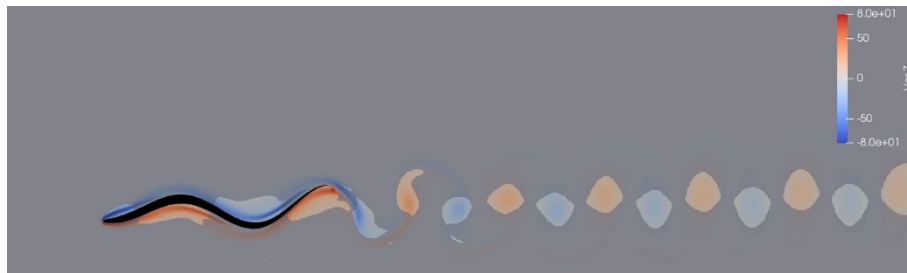


Figura 42: Reynolds pari a 1000 – Cinematismo anguilliforme – Naca0004 – Campo di vorticità.

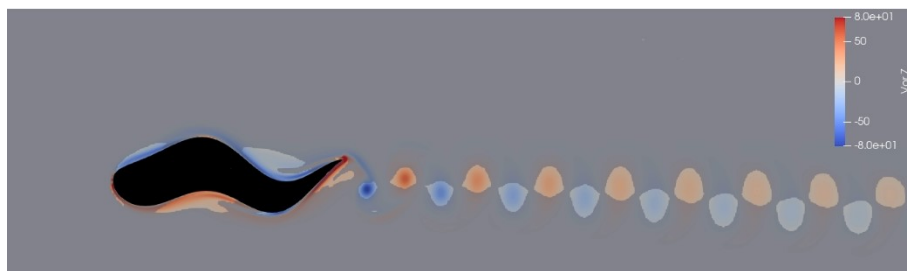


Figura 43: Reynolds pari a 1000 – Cinematismo anguilliforme – Naca0024 – Campo di vorticità.

Possiamo vedere dalla visualizzazione del campo di vorticità che nel caso di un cinematismo di tipo sintetico, per Reynolds pari a 4000, abbiamo due scie completamente diverse (vedi figure 40 e 41). Questa distinzione però non è così marcata per quanto riguarda il cinematismo di tipo anguilliforme e di tipo carangiforme. Un profilo snello genera una scia simile a quella generata dal profilo tozzo (vedi figure 36-39).

Si può ulteriormente confrontare la scia prodotta dai diversi cinematismi prendendo in considerazione la stessa forma del corpo ed andando a confrontarla tra cinematismi diversi. Considerando, per esempio, il profilo Naca0012, si può osservare che si presentano tre scie diverse.

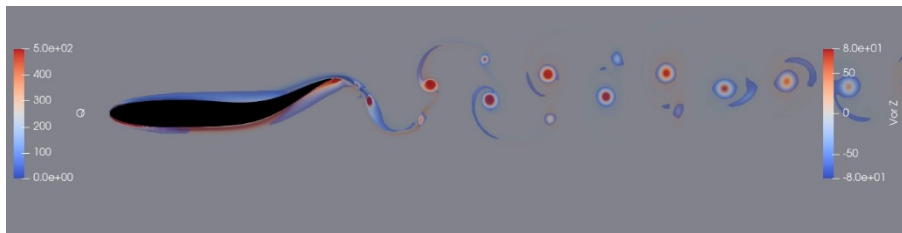


Figura 44: Reynolds pari a 4000 – Cinematismo carangiforme – Naca0012 – Threshold della variabile Q e Campo di vorticità.

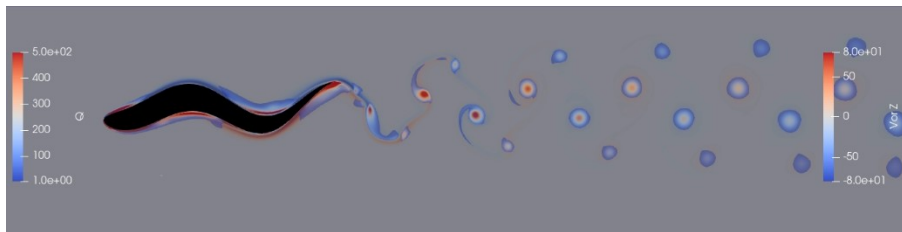


Figura 45: Reynolds pari a 4000 – Cinematismo anguilliforme – Naca0012 – Threshold della variabile Q e Campo di vorticità.

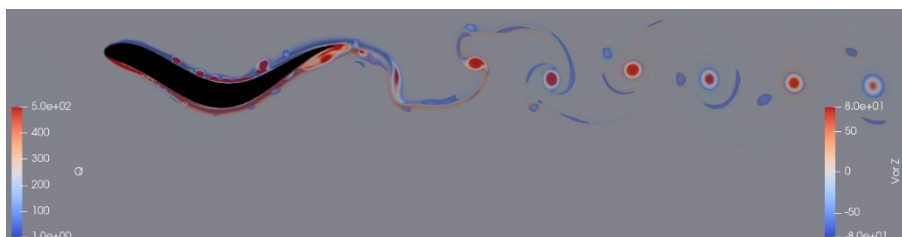


Figura 46: Reynolds pari a 4000 – Cinematismo sintetico – Naca0012 – Threshold della variabile Q e Campo di vorticità.

Lo stile anguilliforme, a questo numero di Reynolds, genera ancora una scia doppia. Si possono osservare meglio l'intensità dei vortici generati dal corpo grazie alla visualizzazione della variabile Q attraverso dei treshold. All'interno della scia, sempre per lo stile anguilliforme, abbiamo delle vorticità più intense al centro e meno intense all'estremità. Altro aspetto interessante da notare risulta quello che lo stile carangiforme genera l'intero vortice lungo la parte finale del suo corpo, mentre, lo stile anguilliforme, ed in maniera ancora maggiore, lo stile sintetico, generano delle vorticità altrettanto intense anche a partire dalla testa del profilo.

Scia di Von Karman inversa

Dagli studi effettuati risulta chiaro che un grande contributo alla velocità di nuotata è dovuto dal rilascio di vorticità, il quale gioca un ruolo fondamentale per la velocità di crociera. Nel momento in cui la vorticità viene rilasciata, il corpo sperimenta una forza lungo la direzione di avanzamento, la cui natura può essere compresa guardando la struttura della scia (vedi Von Kármán [64]). La famosa Karman vortex street, che caratterizza una forza resistente su un corpo smussato, è una scia di vortici, costituita da coppie di vortici di segno opposto. Nel caso di un corpo ondulante a forma di pesce, si può verificare un fenomeno molto simile, causato dallo spostamento laterale della punta della coda. Questo spostamento della coda porta ad uno spargimento di vortici e ad un modello di scia noto come reverse Karman street, generalmente associata ad una capacità propulsiva del nuotatore. Da un punto di vista qualitativo, l'osservazione del modello di scia può dare una valutazione a prima vista delle forze che agiscono sul corpo. Se inizialmente facciamo in modo che il pesce acceleri vedremo la tipologia di scia inversa. Una volta raggiunta la velocità di crociera si può diminuire la frequenza di oscillazione della coda e notare che il corpo inizierà a rallentare, rilasciando vortici attraverso una scia simile alla scia classica di Von Karman. Si può affermare che la scia di Von Karman inversa si nota in accelerazione, rappresentando la spinta. Al contrario, la scia di Von Karman classica si nota in decelerazione, la quale rappresenta la resistenza all'avanzamento. Possiamo vedere la differenza tra le due scie prendendo il campo di vorticità in accelerazione ed in decelerazione. Di seguito rappresento prima i grafici ottenuti dallo studio di Panniccia [62] e successivamente quelli ottenuti con l'uso del modello sviluppato in questo studio di tesi.

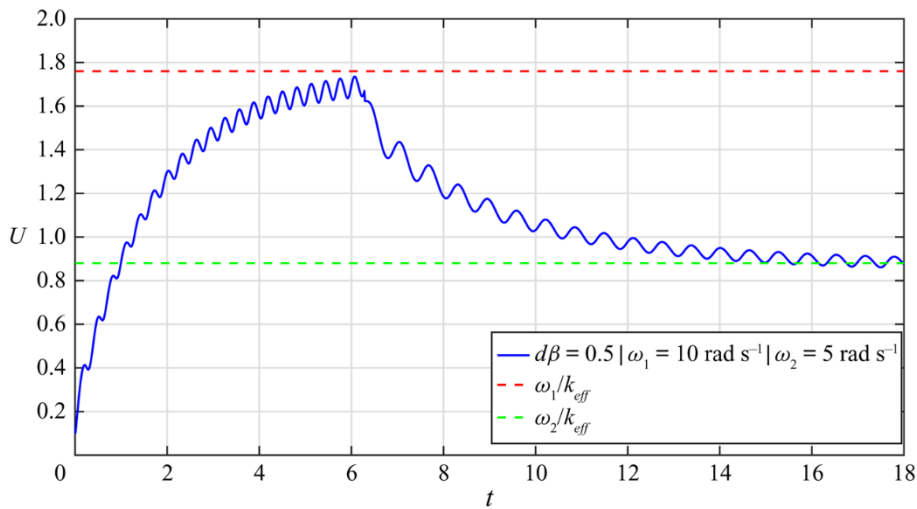


Figura 47: Velocità lungo x nel tempo con la pulsazione che cambia da $\omega_1 = 10 \text{ rad s}^{-1}$ a $\omega_2 = 5 \text{ rad s}^{-1}$. Grafico preso da Panniccia [62].

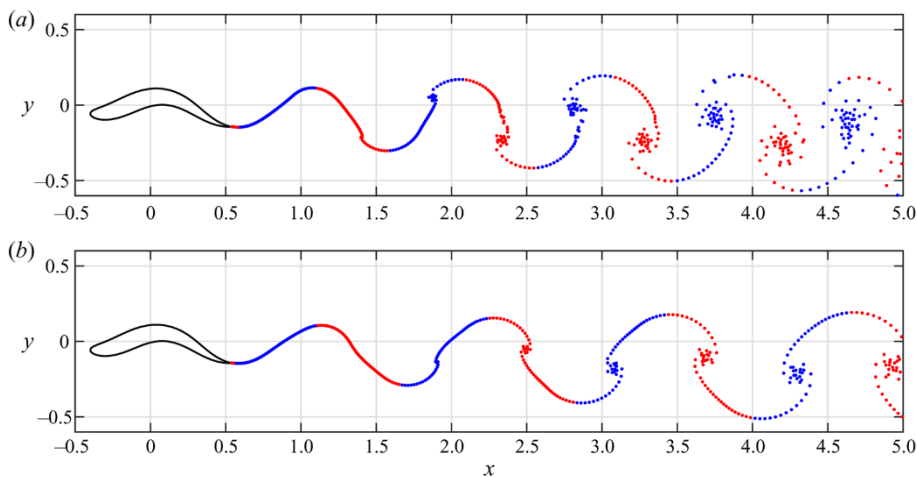


Figura 48: (a) Fase di accelerazione con la struttura della scia del tipo “reverse Karman street”; (b) Fase di decelerazione con la struttura della scia del tipo “Karman street”.

Immagine presa da Panniccia [62].

Dai grafici qui sopra, presi dallo studio di Panniccia [62], possiamo osservare una netta differenza tra la scia generata in accelerazione e quella generata in decelerazione. Si riesce ad osservare la diversa orientazione dei funghi prodotti dalla coda (chiamati così da Zhang [46]). Lo stesso test è stato realizzato attraverso il nostro modello per valutare qualitativamente se i risultati potevano essere confrontabili. Lo stile di nuotata utilizzato è stato quello del carangiforme, come possiamo vedere dal grafico seguente che rappresenta la velocità assoluta rispetto al tempo, abbiamo lo stesso

comportamento osservato da Panniccia. Come ormai può risultare ovvio, una volta che andiamo a diminuire la frequenza di oscillazione della coda il pesce è portato a perdere velocità, andando a correggerla asintoticamente.

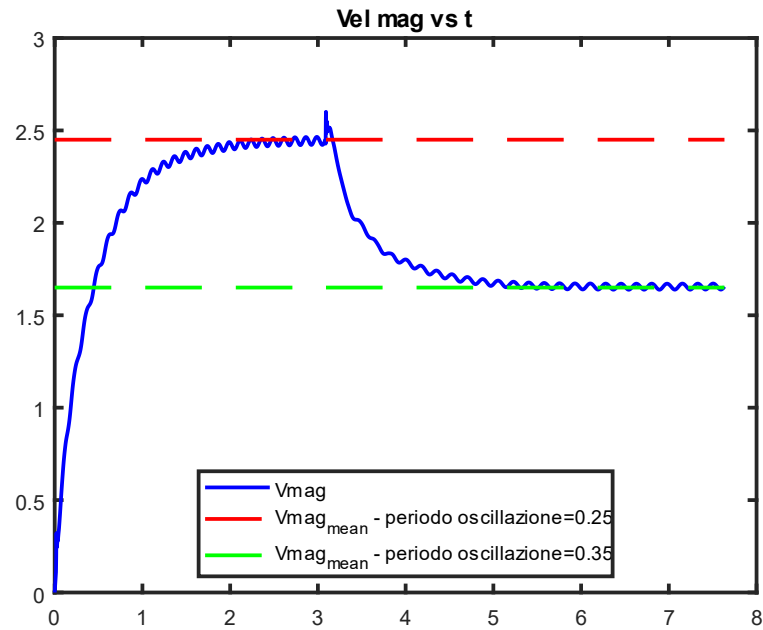


Figura 49: Grafico che rappresenta la velocità assoluta del pesce rispetto al tempo. Nella prima fase di accelerazione, il periodo di oscillazione della coda è pari a 0.25, arrivati poi a velocità di crociera viene aumentato il periodo di oscillazione a 0.35 facendo sì che il pesce subisca una decelerazione fino ad arrivare ad una nuova velocità di crociera.

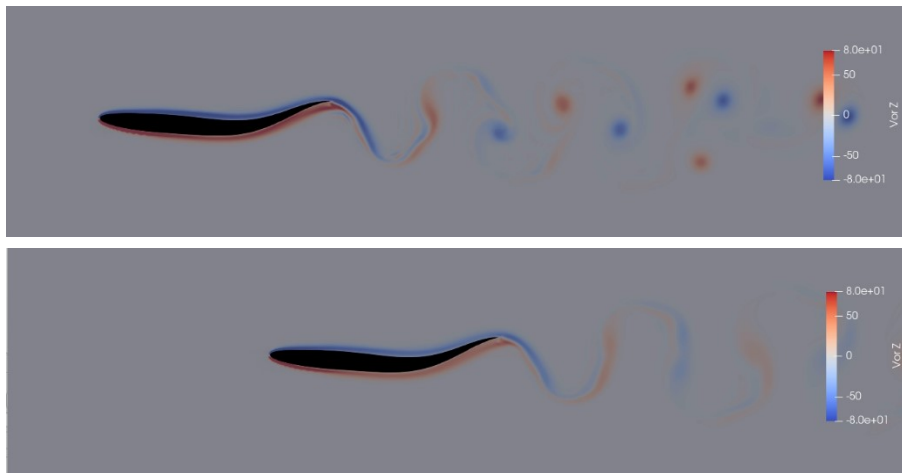


Figura 50: Figura che rappresentano il campo di vorticità lungo l'asse uscente dal foglio. La figura in alto è un'istantanea del campo durante la fase di accelerazione del profilo. La figura in basso, invece, è un'istantanea del campo durante la fase di decelerazione.

La figura 50, come si può notare anche in figura 48, mostra una netta differenza tra la scia generata in fase di accelerazione rispetto a quella generata in fase di decelerazione. Non risulta, però, così facilmente distinguibile il differente orientamento dei funghi prodotti (chiamati così da Zhang [46]). Durante la fase di accelerazione abbiamo che le vorticità sono più concentrate, invece, nella fase di decelerazione si osservano delle strutture più sparse.

Capitolo 4 Considerazioni finali

In questo lavoro abbiamo realizzato dei nuotatori virtuali aventi la possibilità di traslare e ruotare su sé stessi all'interno di un dominio fluido. Essi sono caratterizzati da una deformazione prescritta lungo la linea media del profilo che permette loro di avanzare. Questi corpi sono poi stati sfruttati per esplorare diverse casistiche rispetto al nuoto semovente all'interno di un fluido. Si è deciso di valutare l'efficacia e l'efficienza di questi corpi al variare dello spessore del profilo, confrontando tre diversi stili di nuotata in due diverse condizioni di fluido ($Re0$). Bisogna tenere in considerazione che studi di questo tipo sono molto complessi a livello sperimentale perché risulta difficile osservare il nuoto dei pesci e come si comporta il fluido circostante. Solo delle simulazioni numeriche dirette ci permettono di ottenere così tante informazioni e di avere tutto il dominio fluido risolto istante per istante. La teoria e la modellazione rimangono centrali per sviluppare la nostra comprensione del nuoto e lo studio portato avanti in questo lavoro, basato sulla dinamica di semplici profili bidimensionali, è in grado di illustrare i concetti base della fisica sottostante. Attraverso il modello utilizzato siamo quindi stati in grado di effettuare svariate simulazioni, confrontando tre diversi stili di nuotata e sei geometrie diverse del corpo. In un primo momento si è potuto verificare la solidità del modello realizzato, attraverso un confronto con i principali articoli scientifici, successivamente siamo riusciti ad ottenere degli interessanti risultati per quanto riguarda le performance di nuotata.

Le osservazioni più rilevanti ottenute dal nostro studio vengono riassunte di seguito.

Dal capitolo precedente possiamo vedere che non vi è una correlazione diretta tra le prestazioni dei singoli nuotatori e la struttura della loro scia. Questo perché non è certo che diversi stili di nuotata, con lo stesso rendimento, generino tutti la stessa scia.

Andando poi ad osservare le performance al variare dello spessore del corpo, si è subito visto che la velocità di crociera cala quando lo spessore del profilo aumenta. Questo risultato è stato il più veloce e facile da osservare, per il fatto che non richiede una simulazione molto precisa a livello di discretizzazione del dominio fluido. Infatti, andando ad aumentare la precisione della mesh le velocità di crociera ottenute non differivano significativamente. Invece, per poter valutare le potenze in gioco, è stato necessario utilizzare delle mesh più fini.

Il cinematisimo di tipo carangiforme risulta essere il più sensibile dei tre all'aumentare dello spessore, sia per quanto riguarda l'efficacia della nuotata che per quanto riguarda la sua efficienza. La velocità di crociera cala di circa 40 punti percentuali passando da un profilo Naca0004 ad un Naca0024, per entrambe le condizioni fluidodinamiche. Per quanto riguarda l'efficienza, invece, il carangiforme soffre particolarmente l'aumento dello spessore con entrambi i numeri di Reynolds, passando da un rendimento nettamente più alto ad un rendimento al livello degli altri due stili di nuotata. Sempre il carangiforme, però, ha un guadagno sulla velocità di crociera e sull'efficienza in percentuale maggiore degli altri due cinematismi una volta che aumentiamo il numero di Reynolds. Questo grazie al suo stile di nuotata, che sfrutta una deformazione del corpo concentrata solo sulla coda. È ragionevole pensare che ciò sia dovuto alla piccola ampiezza di oscillazione media lungo la corda, rispetto ad esempio allo stile sintetico, il quale ha un'ampiezza di oscillazione media pari all'ampiezza massima. Quindi il carangiforme, in media, risulta soffrire maggiormente la resistenza di tipo viscoso rispetto a quella di forma, traendo perciò vantaggio dalla riduzione della viscosità del fluido. Attraverso lo stesso ragionamento possiamo osservare che l'anguilliforme si trova in una via di mezzo. All'aumentare del numero di Reynolds abbiamo un aumento in percentuale della velocità che sta tra il

cinematismo carangiforme e quello sintetico. Al contrario, invece, con lo stile anguilliforme il rapporto tra la potenza P_0 e P_+ cala andando ad aumentare il numero di Reynolds. Come affermato nel capitolo precedente, uno sviluppo futuro di questo lavoro sarà quello di svolgere ulteriori simulazioni per capire i vari andamenti rispetto al numero di Reynolds.

Prendendo in considerazione lo stile sintetico esso risulta lo stile più efficace per entrambi i numeri di Reynolds studiati. Grazie all'ampiezza di oscillazione costante e massima lungo tutto il suo corpo, riesce a trasferire maggior energia al fluido ed a raggiungere velocità di crociera maggiori. A suo discapito però ha il rendimento più basso dei tre stili osservati, proprio perché deve consumare molta energia per potersi permettere di avere un'ampiezza di oscillazione così grande. Nel caso di Reynolds pari a 4000 si può notare, però, che il rendimento dello stile sintetico è al livello di quello anguilliforme. Non è detto, quindi, che per numeri di Reynolds più grandi di 4000 lo stile sintetico possa essere più efficiente rispetto all'anguilliforme.

Durante gli studi, come affermato anche da Panniccia [62], si è notato che la nuotata dei pesci deve essere valutata con una procedura adeguata per permettere al corpo ondulante di essere completamente libero di nuotare. Questo perché qualsiasi tipo di vincolo imposto va a sporcare i risultati finali. Durante la fase di taratura del modello è emerso che, svolgendo delle simulazioni con il pesce vincolato angolarmente, le velocità di crociera risultavano più elevate rispetto al caso di nuotata libera. Lo studio di Panniccia, riguardante l'importanza del contraccolpo [54], ci conferma la necessità di avere un corpo libero di traslare e ruotare per evitare di alterare i risultati.

Bisogna tenere presente che i risultati ottenuti si riferiscono a simulazioni bidimensionali; perciò, non possiamo avere la completa certezza che esse possano essere riferite con precisione ad una realtà che invece è tridimensionale. Quello che manca alle simulazioni bidimensionali è la

possibilità di sviluppare tutte le dinamiche legate alla turbolenza che è completamente tridimensionale. Anche per questo si è deciso di utilizzare numeri di Reynolds non elevati.

Nel nostro lavoro non è stata valutata una diversa massa all'aumentare dello spessore. Questo perché essa influisce durante la fase di accelerazione ma una volta arrivati a velocità di crociera, in media, può non essere considerata. Un futuro approfondimento potrà essere quello di osservare le fluttuazioni di velocità, una volta arrivati a velocità di crociera, variando la massa del pesce con l'aumentare dello spessore.

Questo lavoro è solo un primo approccio nell'ambito di analisi e calcolo numerico del nuoto dei pesci. Diverse sfide sono ancora aperte, ad esempio mettere a punto simulazioni 3D utilizzando il modello fino ad ora sviluppato, oppure indagare l'effetto delle pareti sull'efficienza del nuoto o le interazioni tra più pesci che nuotano uno accanto all'altro, come studiato da Maertens [12] o Gazzola [23].

Nonostante i limiti emersi, i vantaggi dell'utilizzo di un modello matematico e computazionale in questo tipo di studi sono molteplici. Tra i più importanti abbiamo l'economicità dello studio e la facile parametrizzazione che rende un modello particolarmente utile per osservare diverse casistiche.

La natura è sempre stata fonte di ispirazione per l'uomo che cerca di prendere spunto dalla perfezione della vita per migliorare ciò che realizza dal punto di vista ingegneristico. Un settore di studio molto ampio è quello che si occupa della fauna marina con lo scopo di trarre nuovi espedienti per muoversi all'interno di fluidi come l'acqua ma anche come la stessa aria. Infatti, simulare un problema di interazione tra un fluido ed un solido ha molteplici applicazioni, dall'ottimizzazione e dal controllo della produzione di forze idrodinamiche su mezzi ingegneristici marini, come barche e sottomarini, ed anche aeronautici. Le ricerche hanno ancora ampi margini di sviluppo, perché la scienza progredisce di pari passo con le

innovazioni tecnologiche. Infiniti, quindi, sono i miglioramenti di cui potrà godere la società.

Capitolo 5 Bibliografia

- [1] M. Marcin, «Fish-like shaped robot for underwater surveillance and reconnaissance – Hull design and study of drag and noise,» *Ocean Engineering*, 2020.

- [2] J. GRAY, Studies in animal locomotion: ii. the relationship between waves of muscular contraction and the propulsive mechanism of the eel, 1933.

- [3] G. I. Taylor, «Analysis of the swimming of long and narrow animals,» *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1952.

- [4] M. Lighthill, «Note on the swimming of slender fish.,» *Journal of Fluid Mechanics*, 1960.

- [5] T. Wu, «Swimming of a waving plate,» *Journal of Fluid Mechanics*, 1961.

- [6] T. Lauder, «Hydrodynamics of Undulatory Propulsion,» *Fish Physiology*, 2005.

- [7] E. D. Tytell, «The hydrodynamics of eel swimming II. Effect of swimming speed,» 2004.

- [8] A. G. Y. T. Wolfgang, «Near-body flow dynamics in swimming fish,» 1999.
- [9] L. Dong, «Characteristics of flow over traveling wavy foils in a side-by-side arrangement,» 2007.
- [10] F. S. Iman Borazjani, «Numerical investigation of the hydrodynamics of anguilliform swimming in the transitional and inertial flow regimes,» 2009.
- [11] D. A. P. a. H. H. a. P. J. T. a. H. C. K. Reid, «Fluid dynamics of moving fish in a two-dimensional multiparticle collision dynamics model,» 2012.
- [12] A. G. A. & T. M. Maertens, «Maertens, A.,Optimal undulatory swimming for a single fish-like body and for a pair of interacting swimmers,» 2017.
- [13] P. Saffman, «The self-propulsion of a deformable body in a perfect fluid,» 1967.
- [14] T. L. W. G. B. J. Carling, «Self-propelled anguilliform swimming: simultaneous solution of the two-dimensional navier-stokes equations and Newton's laws of motion,» 1998.
- [15] P. K. Stefan Kern, «Simulations of optimized anguilliform swimming,» 2006.

- [16] E. KANSO, «Swimming due to transverse shape deformations,» 2009.
- [17] J. Eldredge, «A reconciliation of viscous and inviscid approaches to computing locomotion of deforming bodies,» 2010.
- [18] T. & G. G. von Kármán, «What price speed? Specific power required for propulsion,» 1950.
- [19] T. a. Y. Maertens, «Efficiency of fish propulsion,» 2015.
- [20] I. & S. F. Borazjani, «On the role of form and kinematics on the hydrodynamics of self-propelled body/caudal fin swimming,» 2010.
- [21] Y. & T. Wang, «An energetics analysis of fish self-propelled swimming,» 2018.
- [22] W. G.-H. Y. Y.-L. a. T. B.-G. Yang Yan, «Two-Dimensional Self-Propelled Fish Motion in Medium: An Integrated Method for Deforming Body Dynamics and Unsteady Fluid Dynamics,» 2008.
- [23] P. C. W. M. v. R. P. K. Mattia Gazzola, «Simulations of single and multiple swimmers with non-divergence free deforming geometries,» 2011.
- [24] R. B. B. E. G. N. A. P. Bhalla, «A unified mathematical framework and an adaptive numerical method for fluid–structure interaction with rigid, deforming, and elastic bodies,» 2013.

- [25] P. Webb, «Hydrodynamics and energetics of fish propulsion.» 1975.
- [26] J. Videler, *Fish Swimming.*, 1993.
- [27] Lighthill, «Hydromechanics of aquatic animal propulsion.» 1969.
- [28] T. Wu, «Fish swimming and bird/insect flight.» *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2011.
- [29] G. Lauder, «Fish locomotion: recent advances and new directions.» *Annu. Rev. Mar. Sci.* , 2015.
- [30] A. Smits, «Undulatory and oscillatory swimming.» *J. Fluid Mech.* , 2019.
- [31] Fish e Rohr, «Review of dolphin hydrodynamics and swimming performance.» 1999.
- [32] Triantafyllou, Hover, Techet e Yue, «Review of hydrodynamic scaling laws in aquatic locomotion and fishlike swimming.» 2005.
- [33] F. E. Fish, «Kinematics and power output of jet propulsion by the frogfish genus *Antennarius*» 1987.
- [34] J. O. Dabiri, «Optimal vortex formation as a unifying principle in biological propulsion. *Annu. Rev. Fluid Mech.*» 2009.

- [35] F. E. Fish, «Transitions from drag-based to lift-based propulsion in mammalian swimming.» 1996 .
- [36] Lindsey, «Form, function and locomotory habits in fish.» *Fish Physiology Vol. VII Locomotion*, 1978.
- [37] Sfakiotakis, Lane e Davies, «Review of fish swimming modes for aquatic locomotion.» 1999.
- [38] G. S. T. M. S. & G. Triantafyllou, «Optimal thrust development in oscillating foils with application to fish propulsion.» *J. Fluids Struct.* 7, 1993.
- [39] R. Bainbridge, «The speed of swimming of fish as related to size and to the frequency and amplitude of the tail beat.» *J. Expl Biol.*, 1958.
- [40] F. E. F. Jim J. Rohr, «Strouhal numbers and optimization of swimming by odontocete cetaceans.» *J Exp Biol*, 2004.
- [41] D. V. B. T. R. C. & S. A. Floryan, «Scaling the propulsive performance of heaving and pitching foils.» *Journal of Fluid Mechanics*, 2017a.
- [42] D. Weihs, «Semi-infinite vortex trails, and their relation to oscillating airfoils.» *J. Fluid Mech.*, 1972.
- [43] V. d. H. S. V. Müller, «Fish foot prints: morphology and energetics of the wake behind a continuously swimming mullet.» *J Exp Biol*, 1997.

- [44] G. V. L. Eliot G. Drucker, «Locomotor function of the dorsal fin in teleost fishes: experimental analysis of wake forces in sunfish.» *J Exp Biol*, 2001.
- [45] E. D. T. George V. Lauder, «Hydrodynamics of Undulatory Propulsion,» 2005.
- [46] J. Zhang, «Footprints of a flapping wing.» *Journal of Fluid Mechanics*, 2017.
- [47] Taylor, «Simple scaling law predicts peak efficiency in oscillatory propulsion.» 2018.
- [48] Eloy, «Optimal Strouhal number for swimming animals.» *J. Fluids Struct.*, 2012.
- [49] Floryan, V. Buren e Smits, «Swimmers' wakes are not reliable indicators of swimming performance,» 2019.
- [50] Lindsey, «Form, function and locomotory habits in fish.» *In Fish Physiology Vol. VII*, 1978.
- [51] Sfakiotakis, Lane e Davies, «Review of fish swimming modes for aquatic locomotion.» 1999.
- [52] Wilga e Lauder, «Biomechanics of locomotion in sharks, rays, and chimeras.» *In Biology of Sharks and Their Relatives.*, 2004.

- [53] Flammang, Lauder, Troolin e Strand, «Volumetric imaging of shark tail hydrodynamics reveals a three-dimensional dual-ring vortex wake structure.» 2011.
- [54] D. Paniccia, G. Graziani, C. Lugni e R. Piva, «The relevance of recoil and free swimming in aquatic locomotion,» *Journal of Fluids and Structures*, 2021.
- [55] V. Kármán e Gabrielli, «What price speed? Specific power required for propulsion of vehicles.» *Mech. Engng*, 1950.
- [56] J. Blazek, «Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications,» 2001.
- [57] F. Picano, «Cenni di simulazione numerica di flussi turbolenti,» 2017.
- [58] Khare, Singh e Nokam, «Best practices in grid generation for CFD applications usin HyperMesh.» 2015.
- [59] D. B. F., P. Campagnari, M. Zaccariotto, U. Galvanetto e F. Picano, «A fluid-structure interaction model based on peridynamics and Navier–Stokes equations for hydraulic fracture problems,» 2018.
- [60] Hultmark, Leftwich e Smits, «Flowfield measurements in the wake of a robotic lamprey.» 2007.
- [61] Hess e Videler, «Fast Continuous Swimming of Saithe (*Pollachius Virens*): a Dynamic Analysis of Bending Moments and Muscle Power.» 1984.

- [62] Paniccia, Graziani, Lugni e Piva, «On the role of added mass and vorticity release for self-propelled aquatic locomotion.» *Journal of Fluid Mechanics*, 2021.
- [63] Hunt, Wray e Moin, «Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows.» *Studying Turbulence Using Numerical Simulation Databases*, 2., 1988.
- [64] v. Kármán e Burgers, «General aerodynamic theory. Perfect fluids.» 1935.
- [65] M. H. A. P. S. B. N. A. P. Rahul Bale, «Energy efficiency and allometry of movement.» 2014.
- [66] G. M., C. P., R. W. e K. P., «Simulations of single and multiple swimmers with non-divergence.» *Journal of Computational Physics*, 2011.