POLITECNICO DI TORINO



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile Classe di Laurea LM-23

Tesi di Laurea Magistrale

Scaling della performance natatoria dei pesci riferita alla velocità relativa in regime di nuoto anaerobico

Relatore: Prof. Manes Costantino Correlatore: Ashraf Muhammad Usama Candidato: Demitri Stefano Pier Guglielmo

Anno Accademico 2021-2022

Ringraziamenti

Un sentito ringraziamento va al Prof. Manes Costantino e a Ashraf Muhammad Usama per il costante e prezioso supporto nella realizzazione del presente lavoro, la pazienza mostrata e la bontà dei consigli dati. Si ringrazia anche Mozzi Gloria per aver elaborato i dati video utilizzati nel presente studio.

Indice

	Lista dei simboli	1
	Lista delle figure	3
	Lista delle tabelle	5
1	Introduzione	7
2	Stato dell'arte	14
	2.1 Turbolenza	14
	2.1.1 Decomposizione di Reynolds e moto medio	14
	2.1.2 Descrizione fenomenologica	15
	2.1.3 Turbolenza di parete	17
	2.1.4 Strategie di modellazione della turbolenza	19
	2.2 Performance natatoria	22
	2.2.1 Aspetti fisiologici e regimi di moto	22
	2.2.2 Metodologie di misurazione	23
	2.2.3 Considerazioni teoriche	26
3	Metodi	28
	3.1 Metodi sperimentali	28
	3.1.1 Setup, strumenti e condizioni sperimentali	29
	3.1.2 Protocollo d'esecuzione degli esperimenti	30
	3.2 Metodi computazionali	31
	3.2.1 Creazione della geometria	32
	3.2.2 Definizione della mesh	34
	3.2.3 Scelta dell'algoritmo di soluzione	40
	3.2.4 Discretizzazione spaziale	41
	3.2.5 Assegnazione delle condizioni interne e al contorno	42
	3.2.6 Relaxation e pseudo-time method	44
	3.2.7 Monitoraggio delle iterazioni e valutazione della convergenza	45
	3.2.8 Mesh independence study	47
	3.2.9 Selezione e confronto tra modelli	52
	3.2.10 Analisi di sensibilità ai parametri turbolenti	56

	3.3 Analisi video	58
	3.3.1 Taglio dei video	58
	3.3.2 Analisi preliminare e correzione	59
4	Risultati	61
	4.1 Campi di moto	61
	4.2 Traiettorie	63
	4.3 Serie temporali di velocità relativa	69
	4.4 Confronto tra velocità relativa, dell'acqua e sezionale	72
	4.5 Valutazione dell'indipendenza dell'energia dalla velocità relativa media	76
	4.6 Curve di fatica	80
5	Discussione	86
	Bibliografia e sitografia	92

Lista dei simboli

$ ilde{\phi}$	variabile generica istantanea
ϕ	variabile generica media
ϕ'	fluttuazione della variabile generica
\widetilde{U}_{ι}	velocità istantanea nella direzione i
U _i	velocità media nella direzione i
u'_i	fluttuazione di velocità nella direzione i
\widetilde{p}	pressione istantanea
p	pressione media
p'	fluttuazione di pressione
x _i	coordinata nella direzione i
t	tempo
ρ	densità
δ_{ij}	delta di Kronecker
μ	viscosità dinamica
g	accelerazione di gravità
$ au_{Re,ij}$	componente i-j degli sforzi di Reynolds
k	energia cinetica turbolenta
υ	viscosità cinematica
Е	tasso di dissipazione dell'energia cinetica turbolenta
l	scala di lunghezza turbolenta
η	microscala turbolenta
$u_{ au}$	velocità d'attrito
$ au_0$	sforzo alla parete
U	velocità
U^+	velocità adimensionalizzata secondo $u_{ au}$ legata a $ au_0$
<i>y</i> ⁺	distanza dalla parete adimensionalizzata secondo $u_{ au}$ legata a $ au_0$
у	distanza dalla parete
ξ	distanza dalla parete adimensionalizzata secondo δ
δ	scala di lunghezza globale del problema
κ	costante di von Karman
Α	costante della legge logaritmica di velocità

v_T	viscosità turbolenta cinematica
C_{μ}	coefficiente dei modelli turbolenti
u	scala di velocità turbolenta
ω	tasso di dissipazione specifico
\mathcal{Y}^*	distanza dalla parete adimensionalizzata secondo $u_{ au}$ legata a k
<i>U_{crit}</i>	velocità critica dei test incrementali
β	esponente della velocità nell'espressione della forza resistente
Ε	energia
T_f	tempo di fatica
\overline{U}	velocità media sezionale
h	altezza del flusso
b	larghezza della canaletta
C _f	coefficiente d'attrito
Re	numero di Reynolds
L	scala di lunghezza
Ν	numero di inflation layers
G	fattore di crescita
y_{tot}	altezza totale degli inflation layers
<i>Y</i> 1strato	altezza del primo inflation layer
$y_{G,10strato}$	distanza dalla parete del baricentro del decimo inflation layer
δ_{99}	altezza dello strato limite di parete
т	flusso di massa
d_{nom}	dimensione nominale delle celle interne
W	velocità nella direzione longitudinale
Re_y	numero di Reynolds turbolento
$\lambda_{arepsilon}$	funzione di blending di Jongen
$\overline{U}_{0,45}$	velocità media dell'acqua sul piano ad altezza y = 0,0045 m
Δt	distanza temporale tra fotogrammi consecutivi
W_p	velocità assoluta del pesce nella direzione longitudinale
Wa	velocità dell'acqua nella direzione longitudinale
W _{rel}	velocità relativa del pesce nella direzione longitudinale
а	coefficiente angolare
r	coefficiente di correlazione di Pearson

Lista delle figure

Figura 1.1 Passaggio tecnico per ittiofauna del tipo a fenditure verticali, sito sul fiume *Gave de Pau* (Francia) – Pini Prato

Figura 1.2 Esemplare di vairone (*Telestes muticellus*) prelavato dal bacino del Po – ittiofauna.org (da GRAIA s.r.l.)

Figura 1.3 Curve di idoneità ambientale (HSC) in funzione della velocità dell'acqua, per la trota fario (*Salmo trutta*) in ambiente appenninico, relative alla fase adulta (sinistra) e novellame (destra) – Pini Prato (da Maio)

Figura 2.1 Profilo di velocità rispetto alla distanza dalla parete all'interno del *boundary layer*, in termini di *wall variables* su piano semilogaritmico, con sovrapposizione di dati sperimentali – simteqenginerring.co.za

Figura 2.2 Esempio di swim tunnel – Katopodis e Gervais

Figura 2.3 Curve di *endurance* per diverse specie (lampreda, trota iridea, pesce ventosa, *wallaye*) e temperature, su piano semilogaritmico - Matica (da Katopodis)

Figura 3.1 Individuazione luogo di cattura degli esemplari di vairone testati - earth.google.com

Figura 3.2 Schema del circuito chiuso utilizzato per l'alimentazione della canaletta d'analisi – manuale MOVINGFLUME

Figura 3.3 Sistema di riferimento del problema e geometria del dominio relativa alla condizione C (h = 7,5 cm) – DesignModeler ANSYS Workbench R2 2022 student version

Figura 3.4 Contours relativi a $y^+ e y^*$ sulle pareti del dominio per la simulazione 1 – ANSYS Workbench R2 2022 student version

Figura 3.5 Visualizzazione della *mesh*, con evidenza degli *inflation layers*, per la simulazione 2 – ANSYS Workbench R2 2022 student version

Figura 3.6 Fattori di *relaxation* esplicita utilizzati per le diverse variabili – ANSYS Fluent da Workbench R2 2022 student version

Figura 3.7 Andamento dei *residuals* per la simulazione 1 – ANSYS Fluent da Workbench R2 2022 student version **Figura 3.8** Andamento della velocità media all'*outlet* per la simulazione 1 – ANSYS Fluent da Workbench R2 2022 student version

Figura 3.9 Andamento della velocità W con il numero di celle nelle sezioni indicate, in x = 5 mm; y = 1,1 mm

Figura 3.10 Andamento della velocità W con il numero di celle nelle sezioni indicate, in x = 5 mm; y = 5,3 mm

Figura 3.11 Andamento della velocità W con il numero di celle nelle sezioni indicate, in x = 5 mm; y = 10,5 mm

Figura 3.12 Andamento della velocità W con il numero di celle nelle sezioni indicate, in x = 5 mm; y = 20,0 mm

Figura 3.13 Profilo verticale della velocità W nella zona F al centro della sezione z = 0,1 m

Figura 3.14 Profilo verticale della velocità W nella zona F al centro della sezione z = 0,265 m

Figura 3.15 Profilo verticale della velocità W nella zona F al centro della sezione z = 0,43 m

Figura 3.16 Individuazione dei punti di taglio, con precisione del fotogramma, per il video 14 (condizione D) – SONY PlayMemories Home

Figura 3.17 Correzione di falso positivo tramite spostamento e modifica del rettangolo identificativo dal rumore di bordo (sopra) al capo dell'individuo (sotto) – labelImg

Figura 4.1 *Contours* della velocità *W* nelle sezioni z = 0,1 m (sopra), z = 0,265 m (al centro) e z = 0,43 m (sotto) per la simulazione 9 (condizione D) – ANSYS Workbench R2 2022 student version

Figura 4.2 Legame grafico tra il sistema di riferimento dell'immagine (rosso) e quello del dominio (verde)

Figura 4.3 Traiettoria nel piano seguita dal pesce 33 (condizione A) suddivisa nelle diverse fasi di nuoto concorrenti a determinare il tempo di fatica

Figura 4.4 *Density plot* delle posizioni occupate dai 10 individui testati sotto la condizione A durante le fasi di nuoto (risoluzione 0,5 cm)

Figura 4.5 *Density plot* delle posizioni occupate dai 10 individui testati sotto la condizione B durante le fasi di nuoto (risoluzione 0,5 cm)

Figura 4.6 Density plot delle posizioni occupate dai 10 individui testati sotto la condizione C durante le fasi di nuoto (risoluzione 0,5 cm)

Figura 4.7 *Density plot* delle posizioni occupate dai 10 individui testati sotto la condizione D durante le fasi di nuoto (risoluzione 0,5 cm)

Figura 4.8 Serie temporale della velocità assoluta W_p (asse sinistro) dell'individuo 35, per i tre passi temporali assunti, rispetto alla posizione occupata z_p (asse destro)

Figura 4.9 Serie temporale della velocità relativa W_{rel} dell'individuo 14, per i tre passi temporali assunti, rispetto alla velocità dell'acqua nelle posizioni occupate W_a

Figura 4.10 Confronto tra $\overline{U} \in \langle W_{rel} \rangle$, per un passo temporale nella derivazione di 1/50 s (sopra), 1/25 s (al centro) e 1/5 s (sotto), con rappresentazione, rispetto all'andamento di uguaglianza Y=X, dei dati ottenuti e della loro retta interpolante nel senso dei minimi quadrati

Figura 4.11 Confronto tra $\langle W_a \rangle$ e $\langle W_{rel} \rangle$, per un passo temporale nella derivazione di 1/50 s (sopra), 1/25 s (al centro) e 1/5 s (sotto), con rappresentazione, rispetto all'andamento di uguaglianza Y=X, dei dati ottenuti e della loro retta interpolante nel senso dei minimi quadrati

Figura 4.12 Legame tra *Int* calcolato tramite $\beta_1 = 1,73$ e $\langle W_{rel} \rangle$ con dati suddivisi per condizione sperimentale, per un passo temporale nella derivazione di 1/50 s (sopra), 1/25 s (al centro) e 1/5 s (sotto)

Figura 4.13 Legame tra *Int* calcolato tramite $\beta_2 = 2 \text{ e} \langle W_{rel} \rangle$ con dati suddivisi per condizione sperimentale, per un passo temporale nella derivazione di 1/50 s (sopra), 1/25 s (al centro) e 1/5 s (sotto)

Figura 4.14 Curve di fatica $T_f - \langle W_{rel} \rangle$ come rette su piano bilogaritmico, con rappresentazione dei dati in base alla condizione e confronto tra interpolazione e andamento teorico ($\beta = 1,87$), per un passo temporale nella derivazione di 1/50 s (sopra), 1/25 s (al centro) e 1/5 s (sotto)

Figura 4.15 Curva di fatica $T_f - \overline{U}$ come retta su piano bilogaritmico, con rappresentazione dei dati in base alla condizione e confronto tra interpolazione e andamento teorico ($\beta = 1,87$)

Figura 4.16 Curva di fatica $T_f - \langle W_a \rangle$ come retta su piano bilogaritmico, con rappresentazione dei dati in base alla condizione e confronto tra interpolazione e andamento teorico ($\beta = 1,87$)

Lista delle tabelle

Tabella 3.1 Riepilogo delle condizioni sperimentali in termini di velocità media sezionale e altezza del flusso

Tabella 3.2 Elenco delle simulazioni svolte con indicazione dei settaggi principali ovvero: caso sperimentale (Tabella 3.1), parametri della *mesh* (paragrafi 3.2.2, 3.2.8 e 4.1.1), modello turbolento (paragrafo 3.2.9) e valori delle condizioni turbolente all'ingresso (paragrafo 3.2.5 e 3.2.10)

 Tabella 3.3 Risultati della procedura approssimata per la determinazione dell'altezza del primo strato, riferiti alle diverse condizioni sperimentali

Tabella 3.4 Valori estremi assunti da $y^+e y^*$ nelle varie simulazioni eseguite

Tabella 3.5 Altezza dello strato limite per le varie condizioni

Tabella 3.6 Valori all'*inlet* in termini di m, k ed ε per le diverse condizioni sperimentali

 Tabella 3.7 Valori dei parametri di creazione e delle proprietà delle mesh generate per il mesh independence study

 relativo alla condizione A

Tabella 3.8 Risultati del *mesh independence study* in termini di scarti medi in percentuale, riferiti alla velocità longitudinale, nelle porzioni F e S per le tre coordinate trasversali indicate, nella sezione z = 0,1 m

Tabella 3.9 Risultati del *mesh independence study* in termini di scarti medi in percentuale, riferiti alla velocità longitudinale, nelle porzioni F e S per le tre coordinate trasversali indicate, nella sezione z = 0,265 m

Tabella 3.10 Risultati del *mesh independence study* in termini di scarti medi in percentuale, riferiti alla velocità longitudinale, nelle porzioni F e S per le tre coordinate trasversali indicate, nella sezione z = 0.43 m

Tabella 3.11 Risultati del confronto tra modelli in termini di scarti medi in percentuale, riferiti alla velocità longitudinale, nelle porzioni F e S per le tre coordinate trasversali indicate, nella sezione z = 0,1 m

Tabella 3.12 Risultati del confronto tra modelli in termini di scarti medi in percentuale, riferiti alla velocità longitudinale, nelle porzioni F e S per le tre coordinate trasversali indicate, nella sezione z = 0,265 m

Tabella 3.13 Risultati del confronto tra modelli in termini di scarti medi in percentuale, riferiti alla velocità longitudinale, nelle porzioni F e S per le tre coordinate trasversali indicate, nella sezione z = 0,43 m

Tabella 3.14 Valori dei parametri turbolenti all'inlet per il caso con aumento de 100% di k per la condizione A

Tabella 3.15 Risultati dell'analisi di sensibilità ai parametri turbolenti in termini di scarti medi in percentuale della

velocità longitudinale, nelle porzioni F e S per le tre coordinate trasversali indicate, nella sezione z = 0,02 m

Tabella 4.1 Valori dei parametri di creazione e delle proprietà delle mesh relative alle simulazioni 7, 8 e 9

Tabella 4.2 Confronto, per le diverse condizioni, tra velocità media sezionale e velocità media sul piano orizzontale con y = 0,0045 m

Tabella 4.3 Valori dei limiti della porzione d'interesse delle immagini in relazione alle diverse sessioni d'indagine **Tabella 4.4** Valori dei parametri di correlazione lineare a, r, p-value relativi al legame $\overline{U} - \langle W_{rel} \rangle$, per i tre passi temporali di calcolo della derivata

Tabella 4.5 Valori dei parametri di correlazione lineare *a*, *r*, *p*-value relativi al legame $\langle W_a \rangle - \langle W_{rel} \rangle$, per i tre passi temporali di calcolo della derivata

Tabella 4.6 Valori dei parametri di correlazione lineare r, *p-value* relativi al legame tra *Int* calcolato tramite $\beta_1 = 1,73$ e $\langle W_{rel} \rangle$, per i tre passi temporali di calcolo della derivata

Tabella 4.7 Valori dei parametri di correlazione lineare r, *p-value* relativi al legame tra *Int* calcolato tramite $\beta_2 = 2$ e $\langle W_{rel} \rangle$, per i tre passi temporali di calcolo della derivata

Tabella 4.8 Medie e deviazioni standard dei valori del coefficiente di ragguaglio C ottenuti in riferimento a $\beta_1 =$ 1,73, per i tre passi temporali di calcolo della derivata

Tabella 4.9 Medie e deviazioni standard dei valori del coefficiente di ragguaglio C ottenuti in riferimento a $\beta_2 = 2$, per i tre passi temporali di calcolo della derivata

Tabella 4.10 Valori dei parametri di correlazione lineare *a*, *r*, *p*-value e dell'esponente β relativi al legame $T_f - \langle W_{rel} \rangle$ in scala bilogaritmica, per i tre passi temporali di calcolo della derivata

Tabella 4.11 Valori dei parametri di correlazione lineare a, r, p-value e dell'esponente β relativi al legame $T_f - \overline{U}$ in scala bilogaritmica

Tabella 4.12 Valori dei parametri di correlazione lineare a, r, p-value e dell'esponente β relativi al legame $T_f - \langle W_a \rangle$ in scala bilogaritmica

1 Introduzione

I fiumi contribuiscono a diverse funzioni sociali, economiche e soprattutto ecosistemiche ma lo sviluppo recente di molte infrastrutture pone a serio rischio l'efficacia dei processi fluviali (Grill *et al.*, 2019). Tra di esse si possono citare dighe di importanti dimensioni per lo stoccaggio di acqua a fini agricoli o idroelettrici ma anche traverse per l'adduzione di più modeste dimensioni, così come briglie e soglie per la protezione di opere di attraversamento o la mitigazione di comportamenti idrogeologici di rischio. Uno studio condotto a scala globale ha identificato come la quasi totalità dei fiumi non frammentati si trovi in aree remote come le regioni artiche o i bacini dei grandi fiumi equatoriali (Grill *et al.*, 2019). A livello continentale, è stata osservata una densità elevatissima di opere in particolar modo nelle aree fortemente urbanizzate dell'Europa centrale (Belletti *et al.*, 2020). Tale situazione contrasta in maniera evidente con l'idea di continuità fluviale, in particolar modo longitudinale, emersa negli ultimi anni per evidenziare il ruolo, all'interno di diversi processi, dei corsi d'acqua.

Tramite questi, infatti, si realizzano flussi idrici ma anche di sedimenti e detriti legnosi che se alterati possono causare forti scompensi ecosistemici in grado di modificare le condizioni ecologiche e minacciare la fauna locale. Inoltre, la presenza di barriere rappresenta un ostacolo diretto al moto delle specie ittiche dotate di maggior vagilità. Si osserva quindi una collocazione del tutto peculiare delle acque interne all'interno della panoramica degli ecosistemi, vista anche la funzione di transito per diverse specie. Da questo punto di vista il *Code of Conduct for Responsible Fisheries*, stilato dalla FAO nel 1995, indica come essenziale la libera circolazione della fauna ittica lungo le aste fluviali. Essa, infatti, consente a popolazioni tendenti a compiere spostamenti durante il proprio ciclo vitale di avere un adeguato *home range* e, di conseguenza, maggiori possibilità di compiere le varie fasi biologiche in maniera ideale e una più alta resistenza ad eventi catastrofici localizzati.

Da queste considerazioni deriva l'importanza dei passaggi per pesci, rappresentanti dei veri e propri corridoi ecologici (Pini Prato *et al.*, 2006). Si tratta di opere d'ingegneria idraulica il cui scopo è consentire la rimonta della fauna ittica rispetto ad ostacoli insormontabili, essenzialmente artificiali. Nel passato, soprattutto in Italia, la loro importanza era limitata e la classificazione confusa e poco incentrata sull'effettiva funzionalità. Attualmente si distinguono passaggi tecnici, di cui si riporta un esempio in Figura 1.1, passaggi naturalistici e strutture speciali.



Figura 1.1 Passaggio tecnico per ittiofauna del tipo a fenditure verticali, sito sul fiume Gave de Pau (Francia)

Vista l'onerosità della realizzazione, la scelta del posizionamento di tali strutture deve essere svolta sulla base di considerazioni a scala di bacino, identificando i siti dove esse possano apportare i maggiori benefici. La scelta della tipologia e la conseguente progettazione si pongono all'interno di un ambito in forte evoluzione, noto come Ecoidraulica, all'interno del quale si interfacciano discipline diverse con l'obiettivo di conciliare l'uso della risorsa con il rispetto delle esigenze ecologiche (Pini Prato *et al.*, 2006). L'approccio progettuale a opere di questo tipo è quindi legato a due filoni principali rappresentati dall'individuazione delle specie d'interesse e delle loro capacità natatorie.

Di primaria importanza è quindi un'analisi ambientale dell'area di studio che punti a definire una conoscenza esaustiva delle specie ittiche presenti con individuazione di quelle *target*, ovvero da privilegiare nella definizione delle caratteristiche della scala di risalita. Anche se si mira, in maniera ideale, a garantire a tutti i pesci la continuità longitudinale, è evidente che l'interesse debba concentrarsi su specie migratorie, autoctone ed eventualmente protette. I passaggi per ittiofauna sono, infatti, uno strumento volto primariamente alla conservazione della biodiversità, la quale non è legata semplicemente alla numerosità delle specie ma anche al diverso peso che esse esercitano nell'ecosistema (Pini Prato *et al.*, 2006).

Relativamente alle tendenze migratorie, rappresentanti il cardine delle valutazioni legate alle opere di risalita, la necessità di compiere spostamenti più o meno marcati può essere ricondotta principalmente ad aspetti trofici o riproduttivi. Tra i casi più noti vi sono i grandi migratori diadromi, come anguille e salmoni che percorrono lunghissime distanze tra la zona di accrescimento e quella di frega. All'opposto si hanno invece i piccoli pesci bentonici dei corsi d'acqua di pianura, poco mobili e in grado di formare popolazioni stabili anche in presenza di

sbarramenti. Piuttosto stanziali sono anche le specie ciprinicole fitofile come tinca e scardola. Al contrario i ciprinidi reofili sono importanti nuotatori che si spostano in maniera marcata lungo le aste fluviali, dai tratti pedemontani verso quote maggiori caratterizzate da acque con parametri più idonei alla riproduzione. Esse si trovano quindi ad attraversare tipicamente zone caratterizzate da elevata frammentazione, la quale presenta quindi un effetto rilevante sul loro ciclo biologico. Questa classificazione della fauna ittica sulla base della propensione ad effettuare spostamenti e delle capacità natatorie permette quindi di osservare una diversa sensibilità alla frammentazione dei corsi d'acqua.

Per i criteri di selezione delle specie *target* espressi in precedenza, il vairone italiano (*Telestes muticellus*, Bonaparte 1837) riportato in Figura 1.2 e oggetto degli esperimenti usati nel presente studio, rappresenta una specie di grande importanza relativamente alla progettazione di opere di risalita, in gran parte del territorio nazionale.



Figura 1.2 Esemplare di vairone (Telestes muticellus) prelavato dal bacino del Po

Si tratta, infatti, di un pesce di dimensioni abbastanza ridotte appartenente all'ordine dei *Cypriniformes* e, in particolare, ad una delle famiglie più rappresentative dell'ittiofauna italiana ovvero quella dei *Cyprinidae*. Anche se spesso è considerato una sottospecie del vairone europeo (*Telestes souffia*, Risso 1827), sembra filogeneticamente diviso da esso e viene suggerito che tale isolamento sia avvenuto a seguito del clade alpino e sia proseguito con lo sviluppo di caratteri leggermente differenti sul territorio nazionale (Marchetto *et al.*, 2010) dove occupa il bacino del Po e la fascia adriatica sia a nord che a sud dello stesso, nonché il versante tirrenico dalla Liguria al confine campano-laziale. Dal punto di vista delle condizioni ambientali, pur presentando una notevole adattabilità, predilige le acque fresche e ben ossigenate, il che lo rende una delle specie reofile più caratteristiche (Forneris, 1989). I tratti

ideali sono quindi quelli con fondi ghiaiosi ricchi di ostacoli e rifugi ma si riscontra spesso anche in rogge e fontanili. Tipicamente vive in branchi che raramente, nonostante l'indole gregaria, presentano più di un centinaio d'individui. La dieta è onnivora e si fonda su alghe e soprattutto piccoli crostacei, insetti acquatici, vermi e molluschi, mentre gli avannotti si nutrono di plancton.

La riproduzione avviene tramite incontro e stazionamento nelle zone idonee dove si ha la deposizione delle numerose piccolissime uova. Queste aderiscono al fondo fino alla schiusa che avviene solitamente dopo meno di una settimana, mentre lo stadio adulto viene raggiunto dopo circa 3 anni. Il periodo riproduttivo varia tra fine della primavera ed il mese di luglio a seconda delle condizioni dell'ambiente circostante e prevede una risalita verso acque a carattere maggiormente torrentizio. Oltre all'introduzione di specie competitrici o predatrici e al deterioramento delle acque, la frammentazione delle aste fluviali che impedisce lo spostamento verso le aree di frega, rappresenta il principale motivo del declino della sua popolazione osservato negli ultimi anni. Tale sensibilità evidenzia la rilevanza del vairone in questo ambito e la bontà di una sua scelta come oggetto di uno studio sulle *performance* natatorie.

La definizione delle specie d'interesse permette di valutare il secondo aspetto cardine nella progettazione idraulica ovvero le capacità natatorie delle stesse, le quali dipendono innanzitutto dalle loro caratteristiche morfologiche e comportamentali (Pini Prato *et al.*, 2006). I pesci portati a compiere spostamenti rilevanti presentano normalmente forme slanciate e la loro velocità natatoria è legata alle dimensioni degli individui, che devono quindi essere fissate per determinare le caratteristiche del passaggio. L'altro fattore che concorre a determinare l'andatura sostenibile è la frequenza dei colpi di coda che dipende essenzialmente dalle capacità contrattive del muscolo, legate alla temperatura. Attraverso studi empirici basati su tali considerazioni negli anni sono stati prodotti strumenti di valutazione della massima velocità sostenibile, la cui affidabilità è però limitata vista la complessità notevolmente maggiore dei processi in gioco (Pini Prato *et al.*, 2006). Inoltre, essi sono disponibili per un numero limitato di specie mentre per altre ci si può rifare esclusivamente alle curve di idoneità ambientale, di cui si fornisce un esempio in Figura 1.3, che relazionano la velocità dell'acqua in un *habitat* con la sua idoneità, variabile tra 0 e 1, a supportare una determinata specie (Pini Prato *et al.*, 2006).



Figura 1.3 Curve di idoneità ambientale (HSC) in funzione della velocità dell'acqua, per la trota fario (*Salmo trutta*) in ambiente appenninico, relative alla fase adulta (sinistra) e novellame (destra)

Entrambi questi strumenti sono superati da studi specifici sulle performance natatorie dei pesci d'interesse, per i quali i dati disponibili sono in aumento nonostante, per alcune specie, essi risultino limitati o del tutto assenti (Katopodis e Gervais, 2016). Le sempre maggiori conoscenze relative agli aspetti fisiologici del moto dei pesci e alle loro implicazioni sulle andature sostenibili, hanno portato all'evoluzione delle metodologie e delle attrezzature sperimentali (Katopodis e Gervais, 2016). Diverse tipologie di test sono state sviluppate, tra cui le due principali, ovvero la procedura incrementale e quella a velocità fissata usata per ricavare i dati sfruttati in questa analisi. Tuttavia, la mancata standardizzazione dei protocolli risulta in una diffusa ambiguità relativa alla definizione di alcuni particolari quali la velocità d'esecuzione delle prove. In diverse analisi, infatti, manca una descrizione del campo di moto all'interno del quale sono testati gli individui e questo può causare errate interpretazioni (Katopodis e Gervais, 2016). Entrambi i metodi assumono, esplicitamente o implicitamente, che la velocità tenuta dal pesce sia pari a quella media del flusso (Nikora et al., 2003), ma questo non è sempre verosimile. Infatti, pur se l'indagine di specie di grosse dimensioni all'interno di swim tunnels relativamente piccoli pone problemi relativamente all'effettiva capacità degli individui di esprimere le proprie caratteristiche fisiche, al contempo assicura che questi si trovino sostanzialmente al centro del flusso e facciano esperienza di una velocità prossima a quella media, facilmente valutabile. Al contrario, l'esecuzione di esperimenti su pesci notevolmente più piccoli delle attrezzature utilizzate, consente loro di muoversi con più libertà e senza difficoltà nella realizzazione della nuotata ma, al contempo, porta gli stessi ad esplorare diverse zone del dominio relazionate a differenti condizioni di flusso. Infatti, è noto che i pesci abbiano la capacità di individuare zone a bassa velocità e che quelli di ridotte dimensioni possano prendere vantaggio da questo aspetto per fronteggiare una corrente meno intensa (Katopodis e Gervais, 2016).

Trovandosi con lo studio qui descritto in quest'ultima situazione l'aspetto primario del presente studio è stato lo sviluppo di analisi di *performance* riferite alla velocità relativa e il confronto tra questa e quella media solitamente adottata. Inoltre, connesse all'utilizzo della velocità relativa come variabile d'interesse, vi sono nuove indicazioni teoriche in corso di sviluppo che mirano a dare una forma più organica alle analisi delle capacità natatorie, tipicamente rappresentate attraverso curve di fatica ottenute su base empirica. Tramite considerazioni di dinamica dei corpi sommersi vengono fornite delle relazioni legate alla velocità relativa mantenute dal pesce che sono state quindi assunte come elemento di paragone dei risultati ottenuti.

L'entità della velocità relativa effettivamente tenuta dal pesce durante l'esecuzione delle prove può essere valutata attraverso la combinazione dei risultati relativi al campo di moto presente e alla traiettoria seguita dal pesce durante gli esperimenti. Riguardo quest'ultima, l'analisi mediante una rete neurale artificiale dei video registrati consente di ottenere per ogni fotogramma la posizione dell'individuo. Tali sistemi consentono tramite l'addestramento con esempi e la conseguente elaborazione di un modello d'analisi, di processare le immagini in modo da identificare la posizione delle porzioni desiderate.

L'analisi del moto di fluidi, qui legata alla descrizione del campo di velocità presente durante i test relativi ai dati utilizzati, è basata sulle equazioni di Navier-Stokes e risulta solitamente possibile solamente mediante l'approccio numerico adottato dalla dinamica computazionale dei fluidi (CFD). In questo ambito le considerazioni di base sono relative all'identificazione del dominio in termini di geometria e discretizzazione della stessa, nonché delle peculiarità del fluido in esame relativamente al numero di fasi presenti, alla dipendenza dal tempo e alla presenza di turbolenza (Andersson et al., 2012). Quest'ultima, elemento tipico della maggior parte dei flussi d'interesse ingegneristico necessita di una modellazione che miri a ottenere un'accuratezza e un onere computazionale equilibrati con le necessità del caso. La definizione dei modelli di chiusura e del trattamento delle zone prossime alle pareti, aventi caratteristiche particolari, influenza anche la suddivisione spaziale del dominio in esame. Al contempo devono essere scelti gli schemi di interpolazione che permettano di passare dalle equazioni differenziali ad un sistemo algebrico per il quale, una volta assegnate le condizioni al contorno, deve essere scelto l'algoritmo matematico di soluzione. Vista l'arbitrarietà delle scelte e lo scarso controllo che tali strumenti offrono agli utenti l'ottenimento dei risultati desiderati si pone alla fine di un percorso di confronti e indagini preliminari volte a stabilire l'affidabilità delle soluzioni ottenute.

Considerando gli aspetti ora evidenziati gli obiettivi del presente studio sono stati:

- Realizzare delle simulazioni CFD per lo svolgimento di analisi preliminari volte a
 valutare l'affidabilità delle strategie di modellazione adottate e definire i parametri
 modellistici più adeguati alla situazione in esame e di altre con cui ricavare i campi di
 moto relativi alle condizioni sperimentali, in virtù di quanto precedentemente osservato
- Unire tali risultati con quelli relativi al tracciamento dell'individuo svolto mediante rete neurale artificiale per ottenere la sequenza delle velocità relative di cui ha fatto esperienza il pesce durante le fasi di nuoto
- Valutare la velocità relativa media lungo la traiettoria e confrontarla con quella dell'acqua valutata allo stesso modo e con la velocità media sezionale per identificare le eventuali differenze e le relative motivazioni
- Utilizzare le sequenze di velocità relativa a disposizione per ricavare un parametro legato all'energia spesa da ogni individuo da comparare con le indicazioni teoriche
- Valutare le curve di fatica ottenute in funzione della velocità relativa e confrontarle con gli andamenti teorici ipotizzati e con quelle riferite alle altre definizioni della velocità

Pe rispondere a tali tematiche il presente lavoro di tesi risulta organizzato, di seguito alla presente introduzione (Capitolo 1), secondo quanto ora descritto. Al Capitolo 2 viene riportato lo stato dell'arte relativo alla modellazione della turbolenza, illustrando le peculiarità e le modalità di descrizione di tali comportamenti all'interno di programmi numerici, e alla valutazione delle capacità natatorie, rispetto alla quale vengono presentati i possibili regimi di nuoto, i metodi empirici di valutazione e le considerazioni teoriche oggetto di confronto. Nel Capitolo 3, vengono descritti gli esperimenti relativi ai dati utilizzati. Si prosegue con l'illustrazione della creazione delle simulazioni CFD e dei risultati preliminari utilizzati per la definizione dei parametri finali. Infine, viene descritta in breve la procedura di analisi video sfruttati per ricavare le traiettorie. Al Capitolo 4 sono riportati i risultati relativi ai campi di moto definitivi e alle traiettorie ottenute. Di seguito viene presentata l'unione di queste due informazioni per ricavare la velocità relativa, cardine del presente studio, confrontata con la velocità media della sezione e con quella dell'acqua lungo la traiettoria seguita. In seguito, si valuta dalle serie di velocità relativa un parametro connesso all'energia spesa degli individui per valutare la rispondenza a considerazioni teoriche. Rispetto a queste viene anche eseguito un confronto con le curve di fatica riscontrate, valutando ulteriormente le differenze connesse all'uso di differenti definizioni della velocità. Infine, al Capitolo 5 vengono discussi gli aspetti salienti dell'intera procedura ed espresse idee relative a futuri sviluppi dell'ambito affrontato.

2 Stato dell'arte

2.1 Turbolenza

La turbolenza è probabilmente l'aspetto più peculiare della dinamica dei fluidi. I moti turbolenti sono i più frequenti sia in contesti naturali che artificiali e nello studio di tali processi non si può non tenere conto dell'effetto della turbolenza sul trasporto delle variabili (Andersson *et al.*, 2012).

Essa si presenta come un fenomeno casuale e non deterministico. La transizione dal mondo laminare avviene a causa di instabilità che si generano ad alti valori del numero di Reynolds, ovvero quando la scala temporale di azione delle forze viscose, che smorzano queste fluttuazioni, è molto maggiore di quella del trasporto convettivo ed esse riescono a sopravvivere ed evolvere. La forma primaria del moto turbolento è la presenza di vortici di varie dimensioni che interagiscono tra di loro. Questo porta all'evidenza che moti turbolenti si possano sviluppare solo in ambiente 3D. Sempre legata alla vorticosità vi è la natura fortemente diffusiva del fenomeno che ha un impatto enorme sul mescolamento di specie diverse o sulla diffusione di altre variabili. Infine, la turbolenza ha un comportamento fortemente dissipativo. Al suo interno, vi è un flusso di energia attraverso le differenti scale di vortici noto come *energy cascade* (Andersson *et al.*, 2012). Esso avviene poiché i grandi vortici, che prendono la loro energia dal moto medio, diventano instabili e si trasformano in altri di dimensioni inferiori, fino a raggiungere quelle più piccole dove l'energia viene dissipata per viscosità.

2.1.1 Decomposizione di Reynolds e moto medio

Per l'analisi dei flussi turbolenti, Reynolds propose una visione della variabile istantanea ϕ divisa in un valore medio ϕ e una fluttuazione ϕ' . Per anni si rimase fermi rispetto all'identificazione di un metodo matematico per la descrizione del valore medio che fu poi trovato nella media d'insieme di Kolmogorov che, secondo il teorema ergodico, equivale alla media temporale, se la scala del fenomeno è finita come avviene per la turbolenza. Tale idea fu suggerita di fronte all'evidenza che in molte circostanze l'aspetto d'interesse era la sola descrizione dell'andamento medio del moto. La base di partenza per ricavare le equazioni del moto medio sono le classiche equazioni di Navier-Stokes, considerate qui per un fluido incomprimibile all'interno del campo gravitazionale. Si vanno a inserire all'interno di queste le variabili decomposte secondo le equazioni (2.1) e (2.2) e si considera la media delle equazioni.

$$\widetilde{U}_i = U_i + u'_i \quad \forall i = 1,2,3$$

$$\widetilde{p} = p + p'$$
(2.1)
(2.2)

Grazie alle proprietà di linearità di questo operatore sembra che le fluttuazioni, che per definizione hanno media nulla, spariscano. Tuttavia, il termine convettivo dell'equazione della quantità di moto è non lineare e quindi compare la media del prodotto delle fluttuazioni di velocità in direzioni diverse che non è nulla in quanto esse sono correlate. Le equazioni che si ottengono sono note come *Reynolds Avereged Navier-Stokes equations* e, adottando la convenzione di Einstein degli indici ripetuti, presentano la forma espressa in (2.3) e (2.4).

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{2.3}$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[p \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \langle u'_i u'_j \rangle \right] - g \delta_{i3} \quad \forall i = 1, 2, 3$$
(2.4)

Come detto, compaiono termini del tipo $-\rho \langle u'_i u'_j \rangle = \tau_{Re,ij}$ chiamati sforzi di Reynolds e rappresentativi di un legame tra le componenti fluttuanti e il moto medio che impedisce la completa separazione di quest'ultimo. Bisogna evidenziare che si tratta di *stress* apparenti non legati alle caratteristiche del fluido ma rappresentanti il flusso di quantità di moto media generato dalla turbolenza (Andersson *et al.*, 2012). Il tensore che li esprime è legato al secondo ordine delle fluttuazioni di velocità e simmetrico per cui le componenti indipendenti sono solo sei.

2.1.2 Descrizione fenomenologica

Come introdotto, la turbolenza presenta un flusso di energia alimentato dal moto medio. Applicando la decomposizione di Reynolds all'energia cinetica istantanea del fluido si osserva che la sua media è data dalla somma dell'energia cinetica del moto medio e di quella turbolenta, la quale è definita dall'espressione (2.5).

$$k = \frac{1}{2} \langle u'_i u'_i \rangle \tag{2.5}$$

Dall'analisi del bilancio (2.6) di questa energia k legata alle fluttuazioni di velocità e riferita all'unità di massa, si possono evincere alcuni comportamenti caratteristici della turbolenza.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\frac{\langle u'_j p \rangle}{\rho} + v \frac{\partial k}{\partial x_j} - \frac{\langle u'_i u'_i u'_j \rangle}{2} \right] - \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \langle u'_i u'_i \rangle - v \left\langle \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right\rangle$$
(2.6)

All'interno dell'equazione (2.6), infatti, compare il termine espresso dalla (2.7).

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_j} \langle u_i' u_i' \rangle \tag{2.7}$$

Esso viene ritrovato anche all'interno del bilancio dell'energia cinetica del moto medio ma con segno opposto, ad indicare che una componente di energia del moto medio viene estratta dalla turbolenza tramite il fenomeno del *vortex-stretching* e costituisce la sua fonte di energia. Si osserva, infatti, che il moto medio, tramite i propri gradienti di velocità tende a stirare i vortici all'interno dei quali per conservazione del momento della quantità di moto le particelle si avvicinano all'asse e aumentano la loro velocità di rotazione, la quale non è altro che la componente fluttuante del campo totale. Questo meccanismo va focalizzato sui vortici più grandi, che riescono ad apprezzare i gradienti del moto medio e ad estrarre così energia. Via via il meccanismo di stiramento viene visto da vortici sempre più piccoli che colgono le variazioni di velocità dovute alle fluttuazioni di dimensione maggiore, la cui orientazione dettata dal contorno viene progressivamente persa. In tal modo l'energia cinetica turbolenta si trasferisce a vortici di dimensioni inferiori.

Kolmogorov osserva alcune peculiarità delle diverse scale di vortici. Egli individua un *range* di scale piccole universali per le quali le variazioni temporali avvengono su intervalli molto inferiori a quelli propri dei grandi vortici. Per questo, esse sono in grado di adattarsi rapidamente per mantenere un equilibrio dinamico con il tasso di trasferimento di energia imposto da questi ultimi (Andersson *et al.*, 2012). Il trasferimento di energia, noto anche come *energy cascade*, viene riferito proprio a tali vortici in virtù della proprietà appena descritta. Questo implica che l'energia trasferita sia sempre la stessa e quindi coincida con quella dissipata dalle scale più piccole. Essa corrisponde al termine riportato nell'equazione (2.8) che compare come componente distruttiva nel bilancio (2.6).

$$\varepsilon = \nu \left\langle \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \right\rangle \tag{2.8}$$

Dato che l'energia cinetica turbolenta nasce in corrispondenza delle grandi scale l, esse dipendono da questa variabile e dal suo tasso di dissipazione ε , secondo l'equazione (2.9).

$$l = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon}$$
(2.9)

Avendo le scale universali delle dimensioni contenute, esse non sono legate alle condizioni al contorno come le precedenti bensì isotropiche (Andersson *et al.*, 2012). Il limite inferiore di questo *range*, detto microscala η , è legato alla dissipazione viscosa di k e risulta quindi dipendente dal tasso di questa e dalla viscosità, come espresso dall'equazione (2.10).

$$\eta = \left(\frac{v^3}{\varepsilon}\right)^{1/4} \tag{2.10}$$

2.1.3 Turbolenza di parete

Rispetto alla turbolenza libera è più difficile da studiare in quanto si combinano il carattere casuale e dei vincoli deterministici rappresentati dalla *no-slip condition*. Lo studio del profilo di velocità realizzato da Millikan per un flusso tangenziale ad una parete piana e liscia evidenzia alcuni aspetti interessanti di cui tenere conto nella modellazione.

A causa del trasferimento di quantità di moto dal fluido alla parete una porzione del primo, nota come *boundary layer*, viene rallentata. Quest'ultimo viene identificato da Prandtl come lo strato dove la velocità differisce di più dell'1% da quella della porzione esterna. Qui si determina, tramite analisi dimensionale, la dipendenza della velocità da un parametro detto velocità d'attrito e definito tramite l'equazione (2.11).

$$u_{\tau} = \sqrt{\tau_0/\rho} \tag{2.11}$$

Volendo ragionare in termini delle *wall variables* adimensionali si usa tale parametro anche come scala della stessa velocità secondo l'espressione (2.12).

$$U^+ = \frac{U}{u_\tau} \tag{2.12}$$

Millikan osserva anche che il *boundary layer*, può essere diviso in uno strato interno e in uno esterno. Nel primo non si ha influenza della scala globale del problema e si può rendere adimensionale la distanza normale alla parete secondo l'espressione (2.13).

$$y^+ = \frac{yu_\tau}{v} \tag{2.13}$$

Le due grandezze di parete risultano legate secondo l'espressione generica (2.14).

$$U^{+} = f(y^{+}) \tag{2.14}$$

All'interno dell'*inner layer*, inoltre, si può identificare un sottostrato viscoso dove il legame diventa lineare secondo l'equazione (2.15).

$$U^+ = y^+$$
 (2.15)

Nell'*outer layer*, invece si ha un'influenza della scala globale del sistema δ che rappresenta anche il fattore con cui rendere adimensionale la distanza qui, come espresso dalla (2.16).

$$\xi = \frac{y}{\delta} \tag{2.16}$$

Anche in questa porzione, dall'analisi dimensionale, risulta un legame univoco, dato dalla (2.17), tra essa e la velocità.

$$U^+ = g(\xi) \tag{2.17}$$

Si intuisce anche che vi debba essere una zona di transizione dove sia la (2.14) che la (2.17) siano valide. Qui il profilo di velocità deve avere un'unica forma per cui si uguagliano le derivate delle due espressioni giungendo al legame, dato dalla (2.18) in termini delle grandezze dello strato interno.

$$U^{+} = \frac{1}{\kappa} \ln(y^{+}) + A \tag{2.18}$$

Questa regione viene detta logaritmica, per la forma del profilo, oppure strato di *overlap*. Si può diagrammare il profilo di velocità U^+ con la distanza y^+ espressa in scala logaritmica, come riportato in Figura 2.1.



Figura 2.1 Profilo di velocità rispetto alla distanza dalla parete all'interno del *boundary layer*, in termini di *wall variables* su piano semilogaritmico, con sovrapposizione di dati sperimentali

Si osserva dai dati sperimentali che la zona viscosa (legame lineare) permane fino a $y^+ = 5$ mentre dopo inizia una regione transitoria nota come *buffer layer* dove la legge vira da quella lineare a quella logaritmica ($y^+ < 30$) (Andersson *et al.*, 2012). Allontanandosi ulteriormente si entra nello strato di *overlap* con legge logaritmica, il quale permane fino ad un limite variabile anche con le condizioni sperimentali, da cui la velocità diventa una nuova funzione di ξ .

2.1.4 Strategie di modellazione della turbolenza

Come detto nei flussi turbolenti si ha la coesistenza di fenomeni a diversa scala. In particolare, si hanno piccoli vortici che creano fluttuazioni ad altissima frequenza e di dimensioni contenute ma al contempo l'estensione del dominio risulta molto elevata. Ciò rende complessa l'analisi della turbolenza con metodi numerici i quali richiedono discretizzazione. Infatti, se siamo interessati a descrivere i piccoli vortici dovremo divider il volume in modo che questi siano colti da almeno qualche cella ma se il dominio è ampio il numero di suddivisioni salirà molto rendendo l'onere computazionale dell'operazione decisamente elevato. Questo è ciò che

avviene con le *direct numerical simulations* che però, ad oggi, risultano impossibili da usare per applicazioni ingegneristiche e restano limitate ad ambiti di ricerca (Andersson *et al.*, 2012). Visto che il problema è dato dalla necessità di discretizzare le piccole scale si è sviluppata l'idea di *large eddy simulations*, dove solo le scale maggiori sono indagate nel dettaglio mentre quelle più piccole vengono modellate come un pozzo di energia per riprodurre la dissipazione.

Anche questa tecnica è onerosa per problemi ordinari, dove spesso basta la descrizione del campo di moto medio e dei suoi effetti, per i quali risultano sufficienti i modelli RANS. Essi si basano sulle equazioni (2.3) e (2.4), dove si è già fatta notare la presenza degli sforzi di Reynolds. Questi vanno modellati in maniera adeguata in modo da poter procedere alla risoluzione del sistema. La prima idea che potrebbe venire in mente sarebbe quella di esprimere tali sforzi tramite delle equazioni di trasporto degli stessi ma andrebbero ad emergere momenti del III ordine delle fluttuazioni di velocità e così via. L'approccio di fissare una chiusura direttamente sugli sforzi è quello seguito dai *Reynolds stress models*, dove si aggiungono sei equazioni per la descrizione del tensore degli sforzi di Reynolds e una legata alla dissipazione. Questo metodo riesce a cogliere alcuni aspetti più complessi del moto ma è sconsigliato per casi semplici come quello in esame per via degli effetti negativi sulla stabilità e l'onere di calcolo (ANSYS, 2022a).

La descrizione degli sforzi turbolenti, può avvenire anche secondo un approccio più semplice ma robusto. Esso si basa sull'ipotesi di Boussinesq che considera un moto browniano, ovvero con scambio di quantità di moto e calore tra le particelle tramite urti casuali. Se ad esso si sovrappone un moto medio, tale trasporto avviene nella direzione dei gradienti di velocità media che vengono quindi associati mediante proporzionalità agli sforzi di Reynolds. Si introduce anche una correzione che permette di rispettare la definizione di energia cinetica turbolenta portando all'espressione generale (2.19).

$$\frac{\tau_{Re,ij}}{\rho} = -\langle u'_i u'_j \rangle = v_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}$$
(2.19)

Lo scalare che esprime la proporzionalità prende il nome di viscosità turbolenta v_T ma non rappresenta una proprietà del fluido bensì dipende dalle caratteristiche del moto. Il fatto che si assuma un campo scalare e non tensoriale porta ad approssimare il fenomeno turbolento come isotropo anche se è evidente che non sia così. La sua definizione è ciò che manca ora per chiudere il sistema. La viscosità turbolenta cinematica può essere vista come legata al prodotto della scala turbolenta di velocità u e di quella di distanza l secondo la (2.20).

Questi sono i parametri da determinare tramite un *set* chiuso di equazioni che possono essere algebriche o differenziali, con il numero di quest'ultime che determina la classe del modello.

Vi sono quindi modelli a zero equazioni, privi della possibilità di tenere conto della storia dei vortici che a causa della convezione influenzano regioni diverse da quelle di origine (Andersson *et al.*, 2012). Più elaborati sono quelli a un'equazione, tra cui Spalart-Allmaras, ma in essi solo la scala di velocità è ottenuta da trasporto mentre quella di lunghezza viene espressa algebricamente (Andersson *et al.*, 2012). Attualmente i più usati sono i modelli a due equazioni che permettono di determinare la scala di velocità da k e quella di lunghezza da grandezze come il tasso di dissipazione ε o il tasso specifico ω (Andersson *et al.*, 2012).

Grande attenzione va posta alla modellazione della porzione vicina alle pareti, in quanto esse influenzano molto anche le variabili turbolente ed è qui che si hanno i gradienti maggiori (ANSYS, 2022a). Per questo motivo devono essere messi in atto accorgimenti relativi alla *mesh* e ai trattamenti di parete dei modelli. A questo proposito molti *software*, tra cui quello usato nel presente studio, per motivi computazionali utilizzano un'altra distanza adimensionale dalla parete y^* , rispetto a quella presentata al paragrafo 2.1.3. Essa risulta di analoga definizione ma basata su una velocità d'attrito valutata rispetto a k, secondo l'espressione (2.21).

$$u_{\tau} = \sqrt{C_{\mu}^{1/2}k} \tag{2.21}$$

Gli approcci per tenere conto della parete sono due. Secondo il primo non si risolve la porzione influenzata da viscosità ma si usano delle *wall functions*, ovvero delle equazioni empiriche che si basano sulla legge logaritmica e servono per stimare quantità del moto medio o della turbolenza nella prima cella della *mesh*. La condizione al contorno viene spostata dalla parete al baricentro di questa, il quale deve quindi trovarsi nel *range* di validità delle funzioni. Di queste ne esistono molteplici varianti tra cui standard, *scalable, enhanced* e di non-equilibrio. L'altra idea è quella del *near wall modelling*, con il quale si estende l'uso del modello turbolento fino alla parete. Solo quelli con formulazione *low-Reynolds*, come il modello Spalart-Allmaras o quello $k - \omega$, possono essere usati in questa regione senza accorgimenti. Per gli altri, invece, bisogna implementare uno schema a due strati che permetta di definire una formulazione valida anche nella zona influenzata da viscosità.

2.2 Performance natatoria

Come anticipato, le capacità natatorie delle specie d'interesse governano la progettazione idraulica dei passaggi per ittiofauna (Pini Prato *et al.*, 2006) ma allo stesso tempo anche di opere sempre connesse alla protezione dei pesci e al miglioramento delle loro condizioni di vita come barriere e schermi protettivi per evitare l'ingresso in ambienti pericolosi o escludere specie aliene (Katopodis e Gervais, 2016). In un senso più ampio, esse risultano tra gli aspetti aventi le maggiori implicazioni sulle attività di ricerca di cibo, elusione dei predatori, migrazione e competizione interna (Videler, 1993).

Le *performance* natatorie dei pesci sono rappresentate, in senso generale, da vari aspetti interconnessi, quali accelerazione e facilità di manovra. Tuttavia, quello decisamente predominante in relazione alla creazione di opere di passaggio è il legame tra velocità sostenibile e resistenza (Santos *et al.*, 2008). Queste sono influenzate da moltissimi fattori sia ambientali, come la temperatura, che dettati dalle caratteristiche morfologiche dell'individuo (Katopodis e Gervais, 2016).

2.2.1 Aspetti fisiologici e regimi di moto

Tranne rare eccezioni, i pesci d'acqua dolce sono dotati di uno scheletro osseo che svolge una funzione di sostegno e protezione ma influenza anche le caratteristiche del movimento. Da questo punto di vista risulta fondamentale la colonna vertebrale composta da un numero variabile di vertebre divisibili in caudali e addominali (Forneris, 1989). Oltre ad essa, altre ossa che governano il movimento sono quelle costituenti le pinne, organi stabilizzatori e locomotori che possono presentarsi in numero pari o meno. Tra le prime si hanno le pinne pettorali e ventrali, paragonabili agli arti di altri animali, aventi essenzialmente la funzione di conferire stabilità e frenare. Le pinne impari comprendono, invece, quella caudale, quella anale ed una o più dorsali presenti lungo la parte superiore. Queste ultime fungono da timoni, consentendo quindi cambi di direzione, mentre la prima assicura la propulsione, insieme ad un contributo variabile del corpo (Forneris, 1989).

I movimenti, governati dalle pinne, sono però eseguiti grazie all'azione della muscolatura. Per quanto riguarda le caratteristiche di resistenza e velocità, i muscoli più importanti sono quelli assiali posti lungo i lati del tronco. Essi sono formati da segmenti dalla forma molto caratteristica detti miomeri, divisi in dorsali e ventrali, che si uniscono lungo il setto orizzontale. Nei pesci ossei, questi si presentano in numero uguale a quello delle vertebre, partendo dal capo con le dimensioni massime e tendendo progressivamente a rimpicciolirsi. Essi possono mostrare una colorazione rossa o bianca. Nel primo caso si presentano molto vascolarizzati in quanto costituiti dalle fibre *slow*, ricche di mioglobina, che determina il colore scuro, e grassi. Queste sono dotate di un gran numero di mitocondri e funzionano quindi con un metabolismo aerobico, risultando adatte ad un moto prolungato ma moderatamente intenso. Nel secondo caso, invece, i muscoli sono adatti a scatti brevi e rapidi, più importanti in pesci caratterizzati da minore vagilità. Queste caratteristiche sono dettate dalla presenza delle fibre *fast*, le quali sono povere di riserve lipidiche e prive di mioglobina ma in grado di contrarsi più velocemente per via del funzionamento anaerobico. Questo processo utilizza il glicogeno contenuto nei muscoli, il quale viene trasformato in acido lattico. Al fine di eliminare i metaboliti accumulati è quindi necessario, dopo scatti intensi, un periodo di recupero e ossigenazione.

Le differenti velocità sostenibili dai pesci in relazione al tipo di moto sono connesse alle varie possibilità di esplicazione dell'azione muscolare ora descritte (Beamish, 1978). Le velocità di *burst*, ovvero le massime raggiungibili, sono infatti legate all'uso delle fibre bianche. Esse possono essere mantenute soltanto per brevi periodi di tempo, stimati intorno ai 20 secondi (Beamish, 1978). Questo regime di moto viene usato in natura per scatti e partenze improvvise impiegate per evitare i predatori, cacciare le prede o passare zone caratterizzate da alta velocità (Katopodis e Gervais, 2016). L'altro estremo è rappresentato dall'andatura di crociera o *sustained*, tipica nelle situazioni ordinarie di movimento, che può essere mantenuta per almeno 200 minuti senza giungere a fatica (Beamish, 1978). Ciò risulta possibile grazie alla bassa intensità mantenuta che permette l'esplicazione dei processi aerobici in grado di produrre energia consumando le riserve più abbondanti nell'organismo e senza la creazione di metaboliti deterrenti. Infine, il *range* intermedio viene denominato *prolonged* e al suo interno vengono sfruttate fibre bianche e rosse insieme (Beamish, 1978). Esso include le *critical speed* rappresentanti il risultato di uno dei possibili *test* sperimentali (Brett, 1964).

2.2.2 Metodologie di misurazione

Non esiste un approccio fissato per la valutazione delle capacità natatorie dei pesci e storicamente è stata utilizzata una grande varietà di metodi in grado di esprimere una misura delle stesse tramite velocità, tempo e distanza (Katopodis e Gervais, 2016). Una grande distinzione è eseguibile tra approcci *volitional* e *forced*.

Nei primi si permette al pesce di scegliere di entrare all'interno di un canale aperto o chiuso, lungo il quale esso tende a risalire muovendosi a velocità maggiori di quelle create nella corrente. Le durate tipiche degli esperimenti sono intorno al minuto e oltre a ciò e alla velocità si misura anche la distanza percorsa (Katopodis e Gervais, 2016). Tuttavia, la maggior parte dei dati disponibili sono relativi all'approccio forzato, con esperimenti eseguiti in appositi *swim tunnels*, come quello in Figura 2.2, che permettono grande flessibilità su tempi e luoghi di esecuzione. Essi sono così chiamati perché il pesce deve nuotare alla velocità imposta e viene stimolato a continuare nel caso si lasci andare contro la griglia di valle (Katopodis e Gervais, 2016).



Figura 2.2 Esempio di swim tunnel

All'interno di questa grande categoria, inoltre, si distingue tra esperimenti a velocità fissata e incrementali. In quest'ultimi il pesce viene sottoposto a velocità crescenti, ciascuna delle quali mantenuta per un tempo fissato, originariamente pari a 75 minuti (Brett, 1964). Tramite la velocità dell'ultimo *step* completato prima di giungere a fatica e la durata del tentativo dopo l'incremento si perviene al parametro noto come velocità critica U_{crit} . Durante un *test* a velocità fissata, invece, viene misurato solamente il tempo di fatica raggiunto dal pesce. Questo può essere relazionato con la velocità tenuta dal pesce e la ripetizione di esperimenti in condizioni diverse consente di rappresentare le curve di fatica o *endurance*, di cui fornisce un esempio la Figura 2.3. L'andamento di questo legame è solitamente quello di una curva di potenza simile ad un decadimento esponenziale (Katopodis e Gervais, 2016).



Figura 2.3 Curve di *endurance* per diverse specie (lampreda, trota iridea, pesce ventosa, *wallaye*) e temperature, su piano semilogaritmico

La determinazione del raggiungimento della condizione di affaticamento, cardine dei due metodi illustrati, può essere svolta secondo criteri differenti, causando difficoltà nell'interpretazione uniforme dei risultati (Katopodis e Gervais, 2016). Inoltre, anche decisioni comportamentali non legate all'effettiva capacità fisica dell'individuo possono portare lo stesso a mostrare tale stato. Ad esempio, gli individui possono sentirsi costretti all'interno dell'attrezzatura e mostrare un esaurimento delle energie solo apparente, secondo i parametri fisiologici rilevati a posteriori. Tale criticità risulta particolarmente evidente per *test* incrementali, ovvero legati alla determinazione di U_{crit} (Katopodis e Gervais, 2016).

Anche l'assegnazione di un tempo di fatica corrispondente a tale velocità risulta difficoltosa, visto che nell'esecuzione dell'esperimento il pesce è sottoposto a diversi *step* i quali, per altro, possono avere durate e aumenti di velocità differenti (Katopodis e Gervais, 2016). L'esecuzione di prove con variazione di tali parametri ha evidenziato come U_{crit} non fosse un valore fissato ma piuttosto una funzione degli stessi. Inoltre, l'evoluzione mostrata dalla velocità critica rispetto alla durata degli *step* ha mostrato un andamento simile a quello delle curve di fatica. Questo, nonostante alcune limitazioni, ha permesso di concludere che la durata dei gradini all'interno del *test* incrementale potesse essere usata come valore del tempo di fatica da associare alla U_{crit} ottenuta (Katopodis e Gervais, 2016).

2.2.3 Considerazioni teoriche

La maggior parte delle campagne d'indagine delle *performance* natatorie si fonda sulle tecniche fondamentali ora illustrate ma i dettagli specifici relativi all'esecuzione delle stesse sono molto variabili e questo può avere un'influenza notevole sui risultati raccolti e su come questi vadano interpretati (Katopodis e Gervais, 2016). Inoltre, per le limitazioni descritte al paragrafo 2.2.2 i *test* incrementali si mostrano più adatti a valutare l'effetto di alcuni parametri sulle capacità di moto piuttosto che a valutare queste in un senso complessivo. Tuttavia, anche le curve di *endurance*, che possono includere i vari regimi tramite l'esecuzione di diversi esperimenti a velocità fissata, sono di natura empirica. Queste, che riferite a specie e dimensioni *target*, rappresentano lo strumento principale di dimensionamento dei passaggi per pesci (Pini Prato *et al.*, 2006), derivano infatti da regressione di dati sperimentali. Essi mostrano alta variabilità, tanto che spesso ci si riferisce a determinati percentili della distribuzione (Katopodis e Gervais, 2016), e inoltre vi sono evidenti differenze tra le varie specie che rendono molto difficile poter eseguire delle considerazioni di carattere generale. Per questi motivi sono emerse nuove analisi maggiormente incentrate su aspetti teorici.

Si può ricavare l'andamento delle curve di fatica nel regime di *burst*, coinvolto prioritariamente nelle attività di maggior importanza come il superamento di ostacoli, a partire da considerazioni sulla dinamica del moto. Queste sono relative alla forza d'attrito subita da un corpo sommerso che è legata al quadrato della velocità relativa rispetto al fluido ma anche ad un coefficiente di *drag*, per il quale si possono considerare legami con *U* diversi a seconda della condizione di moto del pesce. Tale formulazione risulta valida assumendo di osservare un moto relativo stazionario. In caso di oscillazioni, infatti, secondo la legge di Morison, subentrerebbe un termine non legato al quadrato della velocità relativa ma alla sua derivata in grado di esprimere l'inerzia del fluido attraverso il coefficiente di massa aggiunta.

Mantenendo la formulazione stazionaria, se si considera dominante la resistenza d'attrito e si trascura il moto traversale del pesce assumendo uno strato limite turbolento, come avviene di solito alle velocità indagate, si ottiene una forza legata alla velocità con esponente 1,8. Quando si assume la resistenza di forma come predominante, il coefficiente d'attrito non risulta legato alla velocità e la reazione subita dal corpo dipende solo dal quadrato di questa. Se, invece, si ipotizza la condizione di corpo oscillante si ottiene una forza funzione della velocità elevata alla 26/15 = 1,73. Si può quindi osservare come nell'espressione della resistenza l'esponente β della velocità sia limitato tra questo valore e 2. Tali limiti aumentano dell'unità se si considera la potenza, il cui integrale nel tempo restituisce l'energia relazionabile, nell'ambito di processi anaerobici come quelli propri del regime di *burst*, al raggiungimento della fatica. Se si trascura

il coefficiente di proporzionalità presente nella definizione della potenza e legato a fattori ambientali e morfologici, si ottiene che l'energia è legata all'integrale della velocità elevata alla β +1 nel tempo, secondo la (2.22).

$$E \sim \int_0^{T_f} U^{(\beta+1)} dt \qquad \beta_1 = 1,73 < \beta < \beta_2 = 2$$
(2.22)

Ovviamente, il limite energetico corrispondente all'affaticamento varia all'interno di una popolazione ma, se si considera un andamento medio, questo dovrebbe risultare indipendente dalla velocità relativa U.

Nell'ipotesi di velocità costante, l'integrale della (2.22) si risolve in un semplice prodotto tra la velocità elevata alla β +1 e il tempo di fatica che, considerando l'energia fissata, risultano legati secondo la (2.23).

$$T_f \sim U^{-(\beta+1)}$$
 $\beta_1 = 1,73 < \beta < \beta_2 = 2$ (2.23)

(Informazioni confidenziali in fase di pubblicazione, Politecnico di Torino)

3. Metodi

3.1 Metodi sperimentali

I dati utilizzati nel presente lavoro sono stati ricavati tramite una campagna sperimentale che ha riguardato l'esecuzione di *test* di fatica condotti a velocità fissata su diversi esemplari di vairone (*Telestes muticellus*). Questi sono stati prelevati dal torrente Noce nei pressi di Frossasco (TO), nel punto indicato in Figura 3.1.



Figura 3.1 Individuazione luogo di cattura degli esemplari di vairone testati

La cattura è avvenuta tramite *electrofishing* il 20/5/2022 e gli individui sono stati trasportati nello stesso momento all'incubatoio sito nel comune di Porte vicino a Pinerolo (TO), dove è stata anche installata l'attrezzatura per l'esecuzione delle prove. Qui essi sono stati divisi in diverse vasche e compartimenti e lasciati recuperare dallo *stress* e ambientare per un periodo di *habituation* di 4 giorni prima di iniziare con l'esecuzione dei *test*. Durante tutto il periodo i vari esemplari sono stati nutriti con cadenza giornaliera tranne che nella giornata precedente l'esecuzione dei rispettivi esperimenti.

3.1.1 Setup, strumenti e condizioni sperimentali

I *test* sono stati condotti all'interno di una canaletta percorsa da un flusso d'acqua ricircolante ottenuto tramite la creazione di un circuito chiuso come rappresentato in Figura 3.2.



Figura 3.2 Schema del circuito chiuso utilizzato per l'alimentazione della canaletta d'analisi

L'acqua all'interno di un serbatoio viene forzata tramite una pompa attraverso un tubo il cui sbocco si trova all'inizio della canaletta stessa. L'acqua in uscita, smorzata in modo da evitare l'effetto locale dell'immissione, inizia a fluire lungo la stessa fino a ricadere all'interno del serbatoio iniziale. A causa della movimentazione dell'acqua da parte della pompa si ha la tendenza ad un certo riscaldamento, il quale viene contrastato tramite un dispositivo refrigerante posto nella vasca. Grazie a questo è possibile mantenere la temperatura, misurata tramite un apposito termometro, attorno al valore desiderato. Per gli esperimenti considerati essa è risultata attorno al valore desiderato di 13°C con una variabilità assolutamente limitata. Al contempo, la pompa va regolata secondo le informazioni provenienti da un misuratore di flusso ultrasonico in modo da instaurare le condizioni idrauliche desiderate. Nel caso presentato, le condizioni di esecuzione degli esperimenti in termini di velocità media \overline{U} nonché la profondità h con cui il flusso a superficie libera si instaurava, misurata tramite apposito *depth sensor*, sono riportate nella Tabella 3.1.

condizione	\overline{U} [m/s]	<i>h</i> [m]
А	0,4	0,08
В	0,45	0,07
С	0,5	0,075
D	0,55	0,085

Tabella 3.1 Riepilogo delle condizioni sperimentali in termini di velocità media sezionale e altezza del flusso

La canaletta, posizionata senza alcuna pendenza, presenta la zona di *test* effettiva delimitata da due griglie metalliche con maglia di 6 mm atte a confinare l'individuo. La realizzazione delle pareti in materiale plastico trasparente consente di realizzare riprese della porzione di *test* utili per analisi successive. Per gli esperimenti in esame sono state posizionate due fotocamere SONY FDR-AX43 con le quali, per ogni individuo, sono state realizzate riprese laterali e dal basso in formato 1080p, ad una frequenza di 50 fps.

Infine, per ricavare le dimensioni degli individui testati sono stati usati una bilancia per piccole portate, un righello e un calibro Vernier.

3.1.2 Protocollo d'esecuzione degli esperimenti

L'esecuzione degli esperimenti e delle misurazioni è avvenuta per ogni individuo secondo la seguente procedura.

Si preleva il pesce dalla vasca, scelta casualmente, tramite un becher in plastica e lo si pone all'interno della zona di *test* della canaletta in condizioni di velocità ridotta (0,2 m/s). Tale situazione viene mantenuta per 5 minuti, in modo da consentire l'ambientamento del pesce, prima di procedere all'interno dei successivi 30 secondi alla transizione verso la condizione sperimentale desiderata. Anche questa viene selezionata casualmente fino ad ottenere lo stesso numero di campioni per ognuna. Nel presente studio sono stati considerati 10 esperimenti per ogni condizione per un totale di 40 individui analizzati.

Durante la fase di *test* vera e propria viene monitorato il pesce per cogliere il raggiungimento dello stato di fatica, il quale viene fissato a seguito della stimolazione manuale eseguita per 3 volte dopo l'abbandono del pesce contro la griglia di valle. In seguito a una fase di nuoto iniziale, infatti, l'individuo si lascia andare con la corrente e dopo 5 secondi appoggiato alla barriera viene sollecitato con un colpetto. Se non torna a nuotare si procede dopo ulteriori 5 secondi per un totale di 3 volte prima di rimuovere il pesce. Se invece, esso torna a nuotare si attende che esso si abbandoni nuovamente procedendo poi con i *tap* restanti.

Raggiunto l'affaticamento l'individuo viene estratto e inserito all'interno di una miscela di acqua e anestetizzante, fino a renderlo praticamente inerme. Esso viene poi prelevato per

misurare con il righello la lunghezza totale e quella alla forca e con il calibro l'altezza e la larghezza del corpo. Infine, esso viene pesato e poi posto in acqua per ripulirlo dall'anestetico. L'indagine di riferimento aveva l'obiettivo di valutare le *performance* di individui di 5 cm di lunghezza e infatti si è ottenuta una lunghezza alla forca media di 4,8 cm e una totale di 5,2 cm. Altezza e larghezza media sono risultate invece, rispettivamente, di 0,9 cm e 0,6 cm mentre la massa in condizioni bagnate di 1,4 g.

Per valutare il valore del tempo di fatica T_f , è stata svolta un'analisi dei video identificando tutte le fasi in cui il pesce nuotava e sommando la loro durata. Dai valori ottenuti si è potuta stabilire la bontà delle condizioni sperimentali utilizzate vista la presenza di valori massimi vicini ai 50 s, indicati in letteratura come limite massimo della regione di *burst*, oggetto delle considerazioni teoriche riportate al paragrafo 2.2.3.

3.2 Metodi computazionali

Per ricavare le informazioni sul campo di moto nelle quattro condizioni sperimentali testate si è utilizzato il *software* di fluidodinamica computazionale ANSYS Fluent tramite Workbench, versione studente R2 2022. All'interno di questo ambiente si è provveduto alla realizzazione dei modelli numerici relativi a ciascun caso, ma anche di altri necessari per valutazioni preliminari. Nella creazione delle simulazioni si è partiti dalla schematizzazione della geometria e dalla sua discretizzazione. A seguito dell'assegnazione delle condizioni di flusso e del settaggio dei vari parametri di risoluzione è stata avviato il calcolo monitorando la bontà della soluzione ottenuta, visto il processo iterativo usato da questi *software*. Come anticipato, non si è semplicemente provveduto ad analizzare le quattro diverse condizioni di flusso ma sono state anche svolte delle analisi preliminari, focalizzate sulla prima per i motivi descritti nel seguito e necessarie per conferire adeguata robustezza ai risultati ricavati.

In particolare, è fondamentale valutare l'indipendenza dei risultati ottenuti dalle caratteristiche della *mesh* usata, in modo da assicurarsi che essi non siano influenzati da come è stato deciso di discretizzare il dominio. Per garantire la generalità della soluzione ottenuta e poterla considerare effettivamente come il risultato della risoluzione del sistema di equazioni differenziali reale, pur tenendo a mente la sua natura approssimata, è stato quindi eseguito un *mesh independence study*.

Inoltre, nella definizione del problema e dei metodi che il *software* deve seguire vanno effettuate tante scelte con carattere più o meno arbitrario. Tra di esse grande importanza riveste,

come già anticipato, la scelta del modello di chiusura della turbolenza, tanto che viene sempre consigliato di testare modelli differenti (Andersson *et al.*, 2012). Ciò è stato fatto per la *mesh* emersa come adatta dall'analisi precedente, mantenendo la quale sono state effettuate due simulazioni con chiusure diverse.

Al contempo, bisogna tenere presente che il fissaggio del valore di alcuni parametri può essere accompagnato da pesanti incertezze. Nel caso in esame, le caratteristiche turbolente all'ingresso del dominio sono state ottenute a partire da dati poco affidabili per cui è stata valutata la sensibilità della soluzione rispetto a una loro variazione.

Come detto, queste analisi sono state effettuate per la sola condizione A (Tabella 3.1) ma si è sempre provveduto a valutare la loro affidabilità anche rispetto alle altre, in modo da poter estendere le considerazioni svolte senza problemi. Le scelte effettuate sulla base di queste indagini introduttive sono poi servite per realizzare le simulazioni definitive delle diverse condizioni da cui estrarre i campi di moto, rappresentanti l'obiettivo di questa fase.

L'elenco di tutte le simulazioni svolte, con l'indicazione sintetica dei criteri seguiti, è presentato in Tabella 3.2.

Tabella 3.2 Elenco delle simulazioni svolte con indicazione dei settaggi principali ovvero: caso sperimentale (Tabella 3.1), parametri della *mesh* (paragrafi 3.2.2, 3.2.8 e 4.1.1), modello turbolento (paragrafo 3.2.9) e valori delle condizioni turbolente all'ingresso (paragrafo 3.2.5 e 3.2.10)

simulazione	condizione	mesh	modello	parametri turbolenti
1	А	1	$k - \varepsilon$	normali
2	А	2	$k - \varepsilon$	normali
3	А	3	$k - \varepsilon$	normali
4	А	4	$k - \varepsilon$	normali
5	А	3	$k-\omega$	normali
6	А	3	$k - \varepsilon$	+100%
7	В	3	$k-\varepsilon$	normali
8	С	3	$k-\varepsilon$	normali
9	D	3	$k-\varepsilon$	normali

3.2.1 Creazione della geometria

La modellazione del flusso sviluppato durante gli esperimenti è stata svolta considerando la sola porzione della canaletta posta tra le griglie atte a impedire la fuga dei pesci avente dimensioni pari a 53 cm di lunghezza e 30 cm di larghezza.

A livello temporale poi, l'interesse è stato posto sulla sola fase di *test* a velocità fissata che seguiva il periodo di transizione che si instaurava tra questa e le condizioni idrauliche
d'ambientamento e sul solo moto medio, portando a considerare un problema di tipo stazionario. Da tale idea è derivata anche la possibilità di considerare la superficie libera come un piano perfetto senza dover valutare la presenza di increspature che avrebbero richiesto anche la modellazione dell'aria al di sopra. Il dominio modellato è stato quindi solo quello corrispondente all'acqua trascurando l'interazione con l'aria presa in conto da modelli a due fasi (VOF). Questi sono in grado di tracciare la posizione della superficie libera ma risultano onerosi dal punto di vista del calcolo e soggetti a frequenti errori (Knight *et al.*, 2005). Non essendo interessati alle interazioni tra aria e acqua in condizioni transitorie si è quindi scartata questa opzione focalizzandosi su modelli a singola fase.

Tuttavia, poiché per ogni condizione sperimentale il flusso si instaurava con profondità differenti, la geometria da analizzare è risultata variabile. Il dominio ricreato non è stato quindi altro che un parallelepipedo di larghezza pari a 30 cm (b), lunghezza di 53 cm e altezza (h) diversa a seconda della condizione testata. Per ottenere questo elemento, all'interno dello strumento "*DesignModeler*" della Workbench si è disegnato inizialmente un rettangolo nel piano x-y, rappresentante la sezione trasversale della porzione d'acqua considerata, che è stato poi estruso della lunghezza indicata. Questo ha portato alla definizione di un sistema di riferimento con asse x nella direzione trasversale (positivo verso sinistra guardando verso z positive), y nella direzione verticale (positivo verso l'alto) e z in quella longitudinale (positivo nella direzione del flusso).

Un esempio della geometria ottenuta all'interno del programma e del suo rapporto con il sistema di riferimento descritto è riportato in Figura 3.3.



Figura 3.3 Sistema di riferimento del problema e geometria del dominio relativa alla condizione C (h = 7,5 cm)

3.2.2 Definizione della mesh

La maggior parte dei programmi CFD, tra cui quello utilizzato, si basano sul metodo del volume finito, tramite il quale si vanno a tradurre in forma discreta le equazioni differenziali teoriche. Per questo motivo, la corretta discretizzazione del dominio è un requisito fondamentale per l'esecuzione di simulazioni attendibili (Andersson *et al.*, 2012). Nel caso illustrato la *mesh* è stata creata tramite l'omonimo strumento presente nella Workbench.

Vista la geometria semplice che ci si è trovati a fronteggiare, si è puntato a descrivere la stessa tramite *mesh* semplici e robuste, in grado di dare risultati migliori ma non implementabili per domini complessi. Si è quindi scelto di usare una *structured grid*, ovvero con soli elementi tridimensionali esaedrici in cui i legami tra le varie celle sono molto semplici. Questo consente ai programmi CFD di essere solitamente più veloci e richiedere meno memoria rispetto ai casi con *unstructured grids* (Andersson *et al.*, 2012). Inoltre, è stato possibile allineare la griglia alla direzione del flusso evitando quindi problemi di diffusione numerica.

L'uso di *mesh* uniformi costituite da celle identiche non risulta ottimale per la differente variabilità che i campi d'interesse presentano nelle varie porzioni del dominio. In particolare, si sa che i gradienti delle diverse grandezze, e in particolare della velocità, sono molto alti in prossimità delle pareti e molto piccoli lontano da esse. Per avere una descrizione efficace, pur con i profili lineari tra i baricentri delle celle adottati dai *software*, si devono avere questi più vicini e quindi celle più piccole nelle zone dove l'evoluzione delle variabili è spazialmente rapida, mentre nel resto del dominio è sufficiente una discretizzazione più grossolana.

Per raggiungere questo scopo e quindi coniugare una buona capacità descrittiva ad un adeguato onere computazionale, sono stati utilizzati gli *inflation layers*. Si tratta di strati di celle ad altezza via via crescente fino al raccordo con la *mesh* restante. In questo caso, si è selezionato il loro utilizzo per le zone a contatto con le due pareti laterali e il fondo mentre non li si è posti vicino alla superficie libera in quanto non avrebbero dato beneficio. Dato che, una volta assegnata tale impostazione il *software* riconverte la zona centrale della *mesh* in una non strutturata, si è reso necessario assegnare ad essa un *"Method"* del tipo *"multizone"* con scelta di elementi a sei facce.

Il criterio scelto per creare gli *inflation layers* è stato quello dell'altezza del primo strato la quale, come introdotto al paragrafo 2.1.4, rappresenta un parametro importante nella scelta della strategia di modellazione della turbolenza. Anche se sono stati utilizzati modelli e trattamenti caratterizzati da indipendenza dal valore della distanza adimensionale, si è scelto come obiettivo dello stesso un valore pari a 1 ovvero legato all'approccio del *near-wall modelling*. Si

è ragionato sulla grandezza y^+ anche se Fluent usa y^* nei suoi calcoli poiché solitamente le differenze sono piccole e ciò è anche stato verificato a posteriori.

Per ricavare la *first layer thickness* è stata seguita una procedura approssimata che permettesse di svolgere una previsione tramite alcune formule empiriche. Dalla definizione (2.13) di y^+ si osserva che, avendo fissato il valore desiderato della stessa, per ottener l'altezza dimensionale del primo strato manca solo la velocità d'attrito espressa dalla (2.11). Essa, infatti, è legata allo sforzo tangenziale alla parete e quindi alla soluzione del problema. Per poter lavorare in maniera previsionale si è ricavata la tensione tramite un coefficiente d'attrito ottenuto dalla formula empirica (3.1), valevole per le condizioni considerate.

$$c_f = \frac{0.0742}{Re^{0.2}} \tag{3.1}$$

Si è poi passati allo sforzo tangenziale attraverso la definizione classica (3.2).

$$\tau_0 = \frac{1}{2} c_f \rho \overline{U}^2 \tag{3.2}$$

Nella (3.1) si nota la presenza del numero di Reynolds, dipendente dalla velocità media secondo la relazione (3.3), nella quale è stata considerata una scala delle lunghezze pari alla larghezza della canaletta (L = b = 0,3 m) per tutte le condizioni.

$$Re = \frac{\overline{U}L}{v}$$
(3.3)

La velocità, invece, è variabile e rientra anche nella (3.2), per cui sono state considerate tutte e quattro le condizioni di flusso. Per ognuna è stata quindi ottenuta la velocità d'attrito. Avendo fissato a 1 il valore desiderato della y^+ del baricentro del primo strato si è ottenuta la distanza dimensionale dello stesso che raddoppiata esprime l'altezza da indicare al programma, come espresso dalla (3.4).

$$y_{1strato} = 2\frac{u_{\tau}}{v} \tag{3.4}$$

In Tabella 3.3 vengono riassunti i valori ottenuti per i parametri ora descritti.

condizione	\overline{U} [m/s]	Re	c _f	$ au_0$ [Pa]	u_{τ} [m/s]	y _{1strato} [m]
А	0,4	120000	0,007154	0,571	0,0239	8,36E-05
В	0,45	135000	0,006988	0,706	0,0266	7,52E-05
С	0,5	150000	0,006842	0,854	0,0292	6,84E-05
D	0,55	165000	0,006713	1,013	0,0319	6,28E-05

 Tabella 3.3 Risultati della procedura approssimata per la determinazione dell'altezza del primo strato, riferiti alle diverse condizioni sperimentali

Vista la vicinanza dei risultati ottenuti in termini di spessore del primo strato si è scelto di adottare un unico valore (3.5), intermedio rispetto a quelli teorici ottenuti, fissato per tutte le simulazioni eseguite.

$$y_{1strato} = 7,07 \cdot 10^{-5} m \tag{3.5}$$

Ovviamente, vista la variabilità della tensione e la dipendenza di y^+ da questa, lungo le pareti del dominio non si è osservato un risultato uniforme. In particolare, vicino all'*inlet* le tensioni sono sempre risultate maggiori e quindi allo stesso modo si sono comportate le distanze adimensionali per via del legame con la velocità d'attrito. Infine Fluent, pur permettendo di visualizzare i valori di y^+ si rifà dal punto di vista computazionale a y^* , per cui si è provveduto anche a verificare la similitudine, comunque attesa, tra questi parametri. Questo è stato possibile tramite la visualizzazione dei relativi *contours* sulle pareti laterali e sul fondo come riportato dalla Figura 3.4.

Oltre all'assoluta similitudine degli andamenti dei due parametri, da essi si evince che nella maggior parte di queste superfici i valori ottenuti per entrambi sono molto vicini a 1 mentre le porzioni con valori maggiori sono decisamente ridotte. Inoltre, i valori estremi assunti sono comunque limitati, come riportato in Tabella 3.4, dalla quale si nota anche un aumento atteso al crescere della velocità e quindi delle tensioni.



Figura 3.4 *Contours* relativi a $y^+ e y^*$ sulle pareti del dominio per la simulazione 1

simulazione	min y^+	min y^*	$\max y^+$	max y*
1	0,633	0,634	2,457	2,479
2	0,636	0,638	2,491	2,515
3	0,635	0,637	2,530	2,555
4	0,638	0,640	2,578	2,604
5	0,596	0,597	2,563	2,587
6	0,634	0,636	2,550	2,604
7	0,714	0,717	2,772	2,808
8	0,783	0,786	3,007	3,057
9	0,852	0,856	3,244	3,314

Tabella 3.4 Valori estremi assunti da $y^+e y^*$ nelle varie simulazioni eseguite

Gli altri fattori atti a descrivere la geometria degli *inflation layers* generati sono il numero di strati N e il fattore di crescita G. Essi concorrono a determinare l'altezza totale della porzione elaborata secondo la formula di crescita geometrica (3.6).

$$y_{tot} = y_{1strato} \frac{1 - G^N}{1 - G}$$
 (3.6)

Allo stesso modo si può ricavare la distanza dalla parete del baricentro di un certo strato, come ad esempio il decimo, tramite somma dell'altezza degli strati precedenti e di metà di quello corrente, come espresso dall'equazione (3.7).

$$y_{G,10strato} = y_{1strato} \frac{1 - G^9}{1 - G} + \frac{y_{1strato}G^9}{2}$$
(3.7)

Questo parametro è d'interesse poiché, se si usano trattamenti di parete indipendenti da y^+ , l'interesse principale non va posto tanto sull'altezza del primo baricentro ma sul fatto di descrivere il *boundary layer* con un buon numero di strati, ovvero almeno una decina (ANSYS, 2022a). Similmente viene consigliato in letteratura che lo stesso strato limite sia interamente contenuto all'interno degli *inflation layers*. Come anticipato, l'altezza dello stesso può essere espressa tramite la distanza dalla parete a cui si ha una velocità pari al 99% di quella di flusso libero. Questo valore δ_{99} può essere ricavato secondo la formula (3.8), elaborata da Cengel & Cimbala nel 2006, e confrontato con gli aspetti geometrici citati.

$$\delta_{99} = \frac{4,91L}{\sqrt{Re}} \tag{3.8}$$

Esso varia a seconda del caso e il massimo si ha con la velocità media e quindi il numero di Reynolds più bassi, ovvero proprio con la condizione A scelta per il *mesh independence* study, come si evince dalla Tabella 3.5.

condizione	\overline{U} [m/s]	Re	δ ₉₉ [m]	
А	0,4	120000	0,00425	
В	0,45	135000	0,00401	
С	0,5	150000	0,00380	
D	0,55	165000	0,00363	

Tabella 3.5 Altezza dello strato limite per le varie condizioni

Infatti, i criteri ora definiti, rappresentati dalle disequazioni (3.9) e (3.10), risultano tanto più stringenti quanto più il *boundary layer* è spesso. A differenza dell'altezza del primo strato, i valori di N e G sono sati aumentati al procedere dell'affinamento nel *mesh independence study* e poi fissati per le simulazioni restanti.

$$y_{G,10strato} < \delta_{99} \tag{3.9}$$

$$\delta_{99} < y_{tot} \tag{3.10}$$

Dopo aver generato la mesh desiderata per ogni caso, si è sempre proceduto al controllo della stessa. Come primi criteri di valutazione sono stati osservati il minimo volume delle celle, per il quale valori negativi avrebbero significato una connettività non ideale, e la superficie minima delle facce che, se troppo vicina a 0 avrebbe evidenziato la degenerazione di alcune di esse (ANSYS, 2022b). Per entrambi i parametri non ci sono mai stati problemi. Altre indagini sono state svolte sulla qualità in termini di aspect ratio, skeweness e ortogonalità delle celle. Per quanto riguarda il primo esso è sempre risultato abbastanza elevato negli elementi prossimi alle pareti per via della forte anisotropia del flusso che ha portato a una divisione meno fitta nella direzione longitudinale tipica di tali situazioni (ANSYS, 2022b). L'applicazione degli inflation *layers* sulla parete e sul fondo ha portato allo sviluppo di una linea inclinata rispetto ad entrambi che ha causato, nelle celle circostanti, un abbassamento della qualità in termini di ortogonalità e obliquità. I valori riscontrati, comunque, non sono mai stati al di sotto dei limiti consigliati dal programma e a livello di media su tutto il dominio sono sempre risultati buoni. Terminato il processo di creazione delle mesh, per le quali si propone un esempio in Figura 3.5, sono stati assegnati dei nomi alle superfici esterne del dominio in modo da legare le celle a loro adiacenti alle condizioni poi specificate nella relativa sezione.



Figura 3.5 Visualizzazione della mesh, con evidenza degli inflation layers, per la simulazione 2

3.2.3 Scelta dell'algoritmo di soluzione

I programmi CFD propongono la scelta tra solutori *pressure-based* e *density-based*. Il primo approccio è solitamente usato per fluidi incomprimibili a bassa velocità (ANSYS, 2022a) ed è quindi stato scelto per il caso in esame. Esso fa parte di una classe di metodi detti di proiezione in quanto si utilizza un'equazione ricavata per la pressione per correggere il campo di velocità, ricavato dalle equazioni relative alla quantità di moto, in modo che soddisfi anche l'equazione di continuità. Essa è detta equazione di Poisson e presenta la forma (3.11), ottenuta combinando quantità di moto e continuità, e va a sostituire quest'ultima nel sistema.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x_i \partial x_i} = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \left(\rho U_i U_j \right) \tag{3.11}$$

Per la soluzione numerica di questo, si possono usare algoritmi accoppiati o segregati. Questi ultimi sono basati sul concetto di predizione e correzione dove la prima avviene a partire dalle equazioni sulla quantità di moto e la seconda sulla base di quella di pressione. Tra di essi si possono citare SIMPLE, SIMPLEC e PISO. Mentre questi risolvono le equazioni di quantità di

moto e di pressione in modo separato l'algoritmo *coupled* le tratta unitamente tramite una discretizzazione implicita di alcuni termini. In entrambi i casi, invece, le altre equazioni, come quelle riguardanti le quantità turbolente dipendenti dal modello, sono risolte di seguito al sistema principale per ogni iterazione.

Per il caso analizzato è stato selezionato un algoritmo del tipo *coupled*, già indicato dal *software* come scelta standard. Questo infatti consente di ottenere un'implementazione robusta ed efficiente di flussi a singola fase in condizioni stazionarie, con *performance* superiori ai solutori segregati (ANSYS, 2022a).

3.2.4 Discretizzazione spaziale

In un programma di calcolo basato sulle celle, come quello utilizzato, i valori memorizzati sono proprio quelli relativi al baricentro delle stesse. Tramite la discretizzazione delle equazioni differenziali operata nel metodo del volume finito vanno però a comparire i valori delle variabili al centro delle facce e, inoltre, bisogna esprimere i gradienti.

Per quanto riguarda la discretizzazione delle variabili si cerca di avere uno schema che unisca la limitazione del valore calcolato tra quelli usati per farlo (*boundedness*), la capacità di tenere conto della direzione in cui l'informazione viene trasportata (*transportiveness*) ma anche una sufficiente accuratezza, rappresentabile tramite l'ordine dell'errore di troncamento. Molte tra le strategie più comuni sono basate sul concetto di *upwind* ovvero sull'utilizzo solo di informazioni a monte del valore da ottenere, una volta compresa la direzione del flusso.

Per la quantità di moto si è optato per l'approccio *upwind* del II ordine, che considera un andamento lineare tra il centro della faccia e quello della cella a monte della stessa tramite l'uso del gradiente in tale posizione. In caso di flussi allineati alla griglia, come quello illustrato, l'uso dell'approccio del I ordine avrebbe dovuto garantire comunque sufficiente accuratezza ma anche per *mesh* regolari si ottengono risultati migliori passando ad un ordine maggiore (ANSYS, 2022b). Lo stesso schema è stato usato anche per le quantità turbolente, indipendentemente dal modello scelto.

Anche per la pressione si è ricercata un'elevata accuratezza mantenendo lo schema del II ordine proposto di *default* da Fluent, poiché ritenuto idoneo per la maggior parte dei flussi monofasici (ANSYS, 2022b). A differenza di quanto detto in precedenza, però, esso non si basa sulle sole informazioni a monte ma segue un approccio di *central differencing*.

Per il calcolo dei gradienti si è mantenuto lo schema *least squares* proposto dal programma che, a differenza delle alternative basate sul teorema di Gauss, si fonda su un sistema di equazioni che legano il valore di una variabile nella cella d'interesse a quello presente nelle celle adiacenti attraverso il gradiente calcolato nella stessa.

Trasformando in forma matriciale il sistema con incognite le tre componenti del gradiente si osserva, in generale, un problema rettangolare per il quale si va a ricercare la soluzione ai minimi quadrati, da cui deriva il nome. Questo schema viene preferito dato che presenta un'accuratezza analoga a quella dell'approccio secondo Gauss con valori ai nodi, senza alcun problema anche su *mesh* storte o irregolari, ma risulta meno oneroso dal punto di vista computazionale (ANSYS, 2022a).

3.2.5 Assegnazione delle condizioni interne e al contorno

All'intero dominio è sato assegnato il materiale "acqua allo stato liquido", selezionato dal database del programma, per il quale sono previsti valori di densità ρ e viscosità μ costanti. In seguito, sono state fissate le condizioni al contorno sulle sei facce del parallelepipedo rappresentante la porzione d'acqua analizzata.

All'ingresso è stata data una condizione in termini di flusso di massa m che corrispondesse alla velocità media desiderata. Per calcolare questo valore sono state usate la profondità e la velocità delle diverse condizioni, combinate secondo la formula (3.12).

$$m = \overline{U}hb\rho \tag{3.12}$$

In presenza di densità costante, come nel caso in esame, la condizione sulla massa è del tutto equivalente ad una sulla velocità media che viene imposta uniformemente sulla sezione tranne che vicino alle pareti per il rispetto delle condizioni ivi poste.

Sempre all'*inlet* vanno specificati i valori dei parametri turbolenti. Avendo usato modelli RANS a due equazioni, come descritto nel seguito, devono essere assegnati due parametri. Il s*oftware* propone di poter inserire i valori di intensità turbolenta e uno tra scala delle lunghezze, rapporto viscoso e diametro idraulico oppure, l'energia cinetica turbolenta e, a seconda del modello, ε o ω . Si è optato per questa opzione ricavando i valori con le seguenti assunzioni.

Si è partiti determinando la scala di lunghezza della turbolenza l, ovvero la dimensione dei grandi vortici, che può essere relazionata, secondo una formula empirica che assicura buona approssimazione, con una scala di lunghezza del problema L tramite il coefficiente correttivo $C_{\mu} = 0,09$, secondo quanto definito alla (3.13). Viene anche indicato che se la turbolenza deriva la sua lunghezza caratteristica da un ostacolo nel flusso, come una griglia, è più appropriato

basare la scala delle lunghezze turbolenta sulla dimensione caratteristica dello stesso (ANSYS, 2022b). Essendo in questa situazione si è adottata come scala di lunghezza del problema la dimensione del lato delle maglie della griglia ponendo L = 6 mm.

$$l = \frac{0,07L}{C_{\mu}^{3/4}} = 2,55 mm \tag{3.13}$$

Al contempo è stata ricavato il valore dell'energia cinetica turbolenta nelle diverse situazioni testate. Per ottenerlo si è partiti dai risultati di misurazioni di velocità istantanea eseguite precedentemente tramite sensori LDA, per la stessa canaletta ma in condizioni diverse da quelle qui considerate. Dai dati nella sezione prossima alla griglia di monte sono state ricavate le fluttuazioni di velocità e quindi l'entità di k. Osservando il rapporto tra la sua radice quadrata e la velocità media del caso si è notato come esso risultasse sostanzialmente indipendente da quest'ultima. Avendo utilizzato negli esperimenti qui considerati la stessa attrezzatura si è mantenuto il valore di questo rapporto per calcolare, dalle \overline{U} in esame, l'energia cinetica turbolenta all'ingresso secondo la (3.14).

$$\sqrt{k} = 0,126726\,\overline{U}\tag{3.14}$$

Noti questi due parametri si è risaliti all'entità del tasso di dissipazione tramite la (3.15) legata alla definizione della scala delle lunghezze.

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{l} \tag{3.15}$$

Nella Tabella 3.6 sono riepilogati i valori utilizzati, relativi a tutte le condizioni dato che queste sono poi state analizzate col solo modello $k - \varepsilon$.

 $k \,[m^2/s^2]$ $\varepsilon [m^2/s^3]$ condizione \overline{U} [m/s] *h* [m] m [kg/s]0,00257 0,4 0,08 9,583 0,0510 А В 0,45 0,07 9,433 0,00325 0,0726 0,0995 С 0,5 0,075 11,230 0,00401 D 0,55 0,085 0,00486 0,1325 14,000

Tabella 3.6 Valori all'*inlet* in termini di m, k ed ε per le diverse condizioni sperimentali

In precedenza, si è infatti eseguito un confronto per la condizione A con il modello $k - \omega$, per la quale si è quindi dovuta ricavare l'entità di tale valore tramite l'espressione (3.16), che ha evidenziato la possibilità di proseguire in tal modo.

$$\omega = \frac{k^{1/2}}{C_{\mu}l} = \frac{\varepsilon}{C_{\mu}k} = 220,35 \, s^{-1} \tag{3.16}$$

La sezione di uscita è stata definita come "*outflow*" in quanto questa condizione è usata per modellare uscite di flussi dove non si conoscono a priori i dettagli (ANSYS, 2022b). In pratica non si fissa alcun valore delle grandezze ma si applicano due vincoli matematici relativi ad un flusso diffusivo nullo e ad una correzione del bilancio di massa (ANSYS, 2022b). Per il fondo e le due sponde laterali si è usata una condizione di parete del tipo "*no slip*" ovvero con velocità del flusso vincolata a valori nulli, trascurando la scabrezza in virtù delle caratteristiche del materiale. La superficie libera è stata invece modellata tramite la condizione "*symmetry*", che può anche essere usata per modellare pareti con sforzo tangenziale nullo in flussi viscosi (ANSYS, 2022b). Essa impone che attraverso la superficie selezionata vi sia un flusso nullo di tutte le quantità. Ciò comporta di avere velocità normale nulla come espresso dalla condizione cinematica per una superficie fissa quale quella in esame, che è relativa al flusso medio e quindi stazionaria. Inoltre, tale condizione impone derivate in direzione normale delle velocità e quindi anche sforzi tangenziali nulli, come desiderato per una superficie libera, visto il contatto con l'aria di cui si trascura la viscosità.

3.2.6 Relaxation e pseudo-time method

All'interno dei metodi di soluzione è stata attivata anche l'opzione relativa all'uso dell'approccio di *relaxation* implicita detto *pseudo-time method*, che permette sulla base dell'analogia con una formulazione transitoria, di smorzare l'entità delle oscillazioni. Avendo selezionato l'algoritmo accoppiato, è stato seguito l'approccio globale con scelta automatica dell'intervallo temporale da parte del programma secondo una scala delle lunghezze conservativa avente l'obiettivo di conferire un compromesso tra stabilità e velocità di convergenza. Per aumentare ulteriormente la stabilità viene offerta anche la possibilità di applicare dei fattori espliciti per le diverse variabili per i quali sono stati mantenuti i valori proposti raccolti in Figura 3.6.

Pseudo Time Explicit Relaxation Factors
Pressure
0.5
Momentum
0.5
Density
1
Body Forces
[1]
Turbulent Kinetic Energy
0.75
Turbulent Dissipation Rate
0.75
Turbulent Viscosity
1

Figura 3.6 Fattori di *relaxation* esplicita utilizzati per le diverse variabili

3.2.7 Monitoraggio delle iterazioni e valutazione della convergenza

A partire dai valori inizializzati con riferimento alla sezione d'ingresso, si è deciso di procedere all'esecuzione di 500 iterazioni al termine delle quali valutare il soddisfacimento dei criteri di convergenza, con la riserva di proseguire in caso di mancato raggiungimento degli stessi. Questo non è mai stato necessario in quanto in ogni caso simulato il comportamento dei parametri di controllo ora descritti non ha destato problemi.

Tra i vari fattori considerati il comportamento dei *residuals* ha rappresentato il cardine delle valutazioni. Per quanto riguarda questi parametri, che esprimono a livello dell'intero dominio l'errore presente in ogni equazione, si è deciso di esprimerli scalati secondo un criterio globale come proposto in maniera predefinita dal programma. Per quanto riguarda il valore associato all'equazione di continuità, bisogna prestare attenzione al fatto che, a differenza degli altri, esso subisce un processo di normalizzazione piuttosto che uno *scaling*. Le due operazioni sono concettualmente molto diverse in quanto con la seconda si rapporta un errore nella stima del flusso alla magnitudo del flusso stesso mentre, con la prima, il valore dell'errore alla generica iterazione viene confrontato con il massimo che esso ha assunto nelle prime iterazioni, per cui l'ordine di grandezza sarà necessariamente diverso.

Il criterio di convergenza standard del *software* è rappresentato dal raggiungimento di un valore di 10⁻³ per le equazioni del tipo presente nel caso in esame. Viene anche indicato che nel caso di utilizzo di solutori *double-precision* la caduta di questi valori possa essere di molti ordini di grandezza prima della stabilizzazione (ANSYS, 2022b).

Il comportamento di queste quantità è stato analizzato per le varie simulazioni effettuate trovando comportamenti sostanzialmente analoghi di cui si fornisce una rappresentazione, relativa alla simulazione 1, in Figura 3.7.



Figura 3.7 Andamento dei residuals per la simulazione 1

Si può osservare che gli ordini di grandezza raggiunti sono molto bassi probabilmente a causa della semplicità del caso. Il valore relativo all'equazione di continuità si presenta costantemente più alto rispetto agli altri proprio per le peculiarità appena descritte.

Pur avendo ottenuto risultati soddisfacenti non si è conclusa la valutazione sulla convergenza delle soluzioni con l'analisi di queste quantità in quanto, potendo perdere di significatività a seconda della classe del problema (ANSYS, 2022b), esse non possono costituire l'unico canone di valutazione. Sono stati quindi usati anche dei report di alcune quantità, come la velocità media all'uscita mostrata in Figura 3.8 che, per garantire il raggiungimento di una soluzione stabile avrebbe dovuto, come effettivamente avvenuto, raggiungere il valore di velocità media della condizione testata e rimanervi per parecchie iterazioni. Al contempo, sono anche stati osservati i bilanci globali su tutto il dominio delle grandezze caratteristiche, per i quali non sono state rilevate incongruenze.



Figura 3.8 Andamento della velocità media all'outlet per la simulazione 1

3.2.8 Mesh independence study

Come anticipato questa valutazione è stata svolta per la condizione A pur tenendo conto delle differenze tra i vari esperimenti. Si tratta di una procedura necessaria per valutare l'indipendenza dei risultati ottenuti dalla *mesh* usata e poter quindi assumere che gli stessi descrivano correttamente le variabili d'interesse senza influenza della discretizzazione del dominio (Sadrehaghighi, 2021). Essendo concentrati sul campo di moto la velocità è stata usata per le valutazioni descritte.

La procedura prevede di ottenere una prima soluzione convergente su una griglia abbastanza grezza. Questa viene poi affinata e si analizza la differenza tra la nuova soluzione ottenuta e la precedente. Se questa è ritenuta troppo grande si ripete l'operazione creando una nuova *mesh* ancora più fine, altrimenti ci si può arrestare e usare la penultima soluzione come definitiva in quanto la differenza tra questa e quella ottenuta con una discretizzazione più densa non è più significativa ed essa richiede minor sforzo computazionale (Sadrehaghighi, 2021). Ad un certo punto, infatti, la maggior parte delle risorse computazionali sono impiegate per effetti di affinamento dei risultati trascurabili (Zhao *et al.*, 2019).

La crescita di densità della griglia eseguita ai vari passi del presente studio, visto l'utilizzo degli *inflation layers*, ha riguardato sia la porzione adiacente alle pareti che il cuore della *mesh*. Per quanto riguarda i primi, al procedere dell'affinamento si è mantenuta, come detto, l'altezza del primo strato, mentre è cresciuto il numero e calato il fattore di crescita degli stessi. Questo ha comportato un aumento della dimensione totale della porzione descritta in dettaglio ma un calo dell'altezza del baricentro del decimo strato e quindi un maggior numero di essi presente nel

boundary layer. I vincoli espressi dalle disequazioni (3.9) e (3.10), pur soddisfatti anche dalla *mesh* iniziale, sono quindi risultati rispettati con maggior margine via via che l'affinamento proseguiva. In relazione alla porzione centrale del dominio, pur sapendo che in essa le variazioni spaziali sono piccole e lente, è stata comunque ridotta progressivamente la dimensione nominale della cella d_{nom} . Ovviamente tali scelte hanno portato, come desiderato, all'aumento del numero di elementi e nodi e quindi del carico computazionale. I valori dei parametri assegnati e di quelli risultanti, per le per le quattro griglie create, sono riportati nella Tabella 3.7.

Tabella 3.7 Valori dei parametri di creazione e delle proprietà delle *mesh* generate per il *mesh independence study* relativo alla condizione A

mesh	N	G	y _{tot} [m]	y _{G,10strato} [m]	<i>d_{nom}</i> [m]	nodi	elementi
1	15	1,3	0,011827	0,002638	0,0075	103464	97270
2	20	1,2	0,013199	0,001653	0,0070	148764	141056
3	25	1,15	0,015044	0,001311	0,0065	209326	199752
4	35	1,1	0,019161	0,001043	0,0060	317700	305270

Nella scelta dei parametri di creazione si è cercato di seguire il criterio, indicato in letteratura, di mantenere un tasso di affinamento pari a 1,5. Esso può essere espresso come rapporto tra il numero di celle in due *mesh* successive e i valori ottenuti sono illustrati nella (3.17).

$$1 \to 2 = 1,45$$
 $2 \to 3 = 1,42$ $3 \to 4 = 1,53$ (3.17)

Per stabilire l'indipendenza dei risultati è stata analizzata la velocità longitudinale W, la quale risulta del tutto simile alla magnitudo.

Dalle soluzioni delle simulazioni dalla 1 alla 4 (Tabella 3.2), sono stati estratti i profili verticali di tale componente in varie posizioni del dominio, addensando il numero di punti vicino alla parete per avere una migliore descrizione. Sono quindi state analizzate le medie degli scarti in percentuale tra i valori ottenuti con due *mesh* successive, distinguendo la porzione vicino al fondo (F: y < 2 cm) da quella al di sopra (S: y > 2 cm). Le posizioni indagate sono state le sezioni in prossimità dell'*inlet* (z = 0,1 m), di metà (z = 0,265 m) e poco prima dell'*outlet* (z = 0,43 m) e per ognuna di esse, trasversalmente, il bordo (x = 0,005 m), la zona laterale (x = 0,02 m) e la mezzeria (x = 0,15 m), la quale rappresenta anche un piano di simmetria della soluzione.

I risultati di questa analisi per le varie posizioni citate sono mostrati nelle Tabelle 3.8, 3.9 e 3.10.

x=0,005 m x=0,02 m scarto [%] x=0,15 m 1>2 2>3 3>4 1>2 2>3 3>4 1>2 2>3 3>4 affinamento 0,378 0,208 0,180 0,115 0,067 0,072 0,115 0,073 0,074

F S

0,172

0,095

0,092

Tabella 3.8 Risultati del *mesh independence study* in termini di scarti medi in percentuale, riferiti alla velocità longitudinale, nelle porzioni $F \in S$ per le tre coordinate trasversali indicate, nella sezione z = 0,1 m

Tabella 3.9	9 Risultati	del mesh	independence	study in	termini d	i scarti	medi ir	n percentuale,	riferiti all	a velocità
longitudina	lle, nelle po	orzioni F e	e S per le tre c	oordinate	e trasversa	ıli indic	ate, nel	la sezione z =	0,265 m	

0,030

0,038

0,047

0,009

0,008

0,010

scarto [%]	x=0,005 m		x=0,02 m			x=0,15 m			
affinamento	1>2	2>3	3>4	1>2	2>3	3>4	1>2	2>3	3>4
F	0,466	0,221	0,229	0,206	0,128	0,100	0,179	0,111	0,089
S	0,213	0,103	0,102	0,031	0,029	0,022	0,008	0,007	0,009

Tabella 3.10 Risultati del *mesh independence study* in termini di scarti medi in percentuale, riferiti alla velocità longitudinale, nelle porzioni F e S per le tre coordinate trasversali indicate, nella sezione z = 0.43 m

scarto [%]	x=0,005 m		x=0,02 m			x=0,15 m			
affinamento	1>2	2>3	3>4	1>2	2>3	3>4	1>2	2>3	3>4
F	0,605	0,258	0,303	0,288	0,206	0,162	0,234	0,142	0,132
S	0,250	0,120	0,119	0,058	0,076	0,088	0,010	0,008	0,011

Dalla loro osservazione si è notato che lo scarto tra due *mesh* successive si riduce al proseguire dell'affinamento fino a stabilizzarsi. Inoltre, esso è risultato sempre maggiore nella porzione di fondo F rispetto a quella superiore S. Ciò è probabilmente dovuto al fatto che questa è la zona con i gradienti di velocità maggiori e che nel processo di affinamento è quella dove sono state generate le maggiori variazioni tra le diverse griglie. Per lo stesso motivo, si è potuto notare che sono più alte le differenze vicino alle pareti verticali e verso il centro esse si riducono in maniera molto rapida, tanto che i risultati in mezzeria e sul lato sono molto simili. Infine, si è osservato un aumento costante delle differenze andando dall'ingresso verso l'uscita del dominio probabilmente a causa dell'effetto che i valori a monte hanno sul resto dello stesso.

Un'altra indagine svolta per valutare l'indipendenza dei risultati dalla *mesh* ha riguardato l'evoluzione della velocità longitudinale a 5 mm dalla parete laterale per i punti di ordinata 1,1 mm (Figura 3.9), 5,3 mm (Figura 3.10), 10,5 mm (Figura 3.11) e 20,0 mm (Figura 3.12) nelle tre sezioni trasversali già citate, all'aumentare del numero di celle.



Figura 3.9 Andamento della velocità W con il numero di celle nelle sezioni indicate, in x = 5 mm; y = 1,1 mm



Figura 3.10 Andamento della velocità W con il numero di celle nelle sezioni indicate, in x = 5 mm; y = 5,3 mm



Figura 3.11 Andamento della velocità W con il numero di celle nelle sezioni indicate, in x = 5 mm; y = 10,5 mm



Figura 3.12 Andamento della velocità W con il numero di celle nelle sezioni indicate, in x = 5 mm; y = 20,0 mm

Si è osservato, in generale, che i valori tendono a stabilizzarsi e le variazioni sono tanto più significative quanto più ci si trova vicino al fondo, sempre per la presenza degli *inflation layers*. Le analisi condotte hanno mostrato una tendenza alla stabilizzazione dei valori della soluzione e una diminuzione degli scarti via via più rapide al procedere dell'affinamento. Per questo motivo la *mesh* 3 è stata selezionata per eseguire le successive analisi preliminari, relative solo alla condizione A, e i suoi parametri sono stati usati nella definizione delle griglie per le simulazioni relative agli altri casi testati.

3.2.9 Selezione e confronto tra modelli

Come spiegato al paragrafo 2.1.4 le possibilità di modellazione numerica della turbolenza sono varie e dotate di caratteristiche molto diverse per cui è sempre bene eseguire un paragone tra soluzioni differenti (Andersson *et al.*, 2012). Visti gli obiettivi dell'analisi effettuata sono stati utilizzati dei modelli RANS a due equazioni. Il $k - \varepsilon$ realizable, con enhanced wall treatment, è stato usato nel corso dell'analisi descritta al paragrafo 3.2.8 ma dopo aver selezionato la mesh definitiva si è andati a valutare una nuova soluzione relativa al modello $k - \omega$ SST.

Il primo rappresenta una delle versioni migliorate del modello originalmente proposto da Launder e Spalding nel 1973. In questa famiglia di schemi la scelta di ε come grandezza da cui ricavare *l*, come espresso dalla (3.18), deriva anche dal fatto che essa compare direttamente nell'equazione di trasporto dell'energia cinetica turbolenta (2.6).

$$v_T = C_{\mu} u l = C_{\mu} k^{1/2} \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} = C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon}$$
(3.18)

La variante *realizable* utilizzata prende il nome dal vincolo di realizzabilità che viene posto sul tensore degli sforzi di Reynolds. Essendo lo *stress* normale legato a una somma di quadrati, per definizione deve essere positivo ma, secondo la (3.19), in caso di deformazione elevata esso potrebbe diventare negativo.

$$\langle u'_i u'_i \rangle = \frac{2}{3}k - 2v_T \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$$
(3.19)

Per evitare questo il modello in esame usa nella definizione (3.18) una C_{μ} che viene assunta variabile con le condizioni del flusso locali, come evidenziato anche in vari esperimenti (Andersson *et al.*, 2012).

La scelta di questo gruppo di modelli è stata dettata dal fatto che essi sono ritenuti i più robusti ed economici per simulazioni di flussi industriali, di cui hanno rappresentato lo standard per diversi anni (Andersson *et al.*, 2012). La selezione, in particolare, della versione *realizable* è stata invece effettuata in virtù del comportamento generalmente migliore rispetto alle altre (ANSYS, 2022a).

Tale modello è stato reso indipendente da y^+ , selezionando l'*enhanced wal treatment*. In esso si divide il dominio in una regione influenzata dalla viscosità e in una completamente turbolenta sulla base del numero di Reynolds turbolento definito dalla (3.20).

$$Re_{\nu} = yk^{1/2}v^{-1} \tag{3.20}$$

Nella zona *fully turbulent* ($Re_y > 200$) viene usato il modello $k - \varepsilon$ con la sua definizione di v_T . Nella regione viscosa, invece, si passa al modello a un'equazione di Wolfstein, che conserva l'equazione di trasporto della sola k mentre calcola il campo scalare di ε da una relazione algebrica e, inoltre, propone una formula specifica per la viscosità turbolenta. Le due definizioni di quest'ultima sono poi mescolate tramite una funzione di transizione proposta da Jongen che tende a 0 alla parete e a 1 lontano da essa, secondo quanto espresso dalla (3.21).

$$v_T = \lambda_{\varepsilon} v_{T,k-\varepsilon} + (1 - \lambda_{\varepsilon}) v_{T,Wolfstein}$$
(3.21)

Per eseguire il confronto ora illustrato, è stato scelto il modello $k - \omega$ SST, sviluppato più recentemente per risolvere alcune problematiche di modellazione di flussi più complessi tipiche della famiglia precedentemente descritta. Il tasso di dissipazione turbolenta ε , infatti, è significativo solo per vortici di piccole dimensioni ma se lo si normalizza proprio rispetto all'energia contenuta si avrà un termine più rappresentativo. In pratica si considera l'inverso della scala temporale su cui avviene la dissipazione che viene denominato ω o tasso specifico, espresso dalla (3.22). Se riferita a tale parametro, la definizione della viscosità turbolenta si trasforma quindi nella (3.23).

$$\omega = \frac{\varepsilon}{C_{\mu}k} \tag{3.22}$$

$$v_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} = \frac{k}{\omega} \tag{3.23}$$

L'uso di tale variabile permette una formulazione integrabile anche nella regione viscosa. Tuttavia, nella formulazione standard proposta da Wilcox, emerge il problema della forte sensibilità alle condizioni del flusso libero.

Per risolvere tale difficoltà, Menter sviluppa una variante denominata *baseline* che punta a mescolare l'ottimo comportamento vicino a parete di questo modello con l'insensibilità alle condizioni della corrente di quello relativo ad ε . Tramite il legame tra le due variabili di dissipazione si riscrive l'equazione di trasporto relativa ad ε aggiungendo anche un termine che, tramite una funzione di *blending* dipendente dalla distanza dalla parete, porta al comportamento di transizione desiderato. La versione SST (*shear-stress transport*) riprende il modello appena illustrato e integra la definizione di v_T per tenere conto del trasporto degli sforzi tangenziali turbolenti. Questo consente ottime prestazioni per diverse casistiche di problemi (ANSYS, 2022a) e ciò ha portato alla sua selezione come modello di paragone.

Anche in questo caso lo studio ha riguardato la velocità longitudinale alle coordinate già identificate per il *mesh independence study* e, in particolare, gli scarti in percentuale tra le due soluzioni ottenute con i modelli citati (simulazioni 3 e 5 della Tabella 3.2), distinguendo sempre le due porzioni della verticale F e S. I risultati sono riportati, distinti in riferimento alla coordinata longitudinale, nelle Tabelle 3.11, 3.12 e 3.13.

Tabella 3.11 Risultati del confronto tra modelli in termini di scarti medi in percentuale, riferiti alla velocità longitudinale, nelle porzioni F e S per le tre coordinate trasversali indicate, nella sezione z = 0,1 m

scarto [%]	x = 0,005 m	x = 0,02 m	x = 0,15 m
F	1,504	0,537	0,542
S	1,041	0,032	0,114

Tabella 3.12 Risultati del confronto tra modelli in termini di scarti medi in percentuale, riferiti alla velocità longitudinale, nelle porzioni F e S per le tre coordinate trasversali indicate, nella sezione z = 0,265 m

scarto [%]	x = 0,005 m	x = 0,02 m	x = 0,15 m
F	2,572	1,906	1,775
S	1,188	0,035	0,003

Tabella 3.13 Risultati del confronto tra modelli in termini di scarti medi in percentuale, riferiti alla velocità longitudinale, nelle porzioni F e S per le tre coordinate trasversali indicate, nella sezione z = 0,43 m

scarto [%]	x = 0,005 m	x = 0,02 m	x = 0,15 m
F	2,274	3,366	2,863
S	1,982	0,553	0,032

Si è osservato come gli scarti fossero piuttosto limitati in termini di massimo (< 4%), il quale è sempre stato riscontrato nella zona finale del dominio, per l'effetto di propagazione già descritto. Per ricavare un'idea più precisa delle differenze sono anche stati confrontati i profili di velocità al centro delle tre sezioni trasversali già identificate. Di questi viene riportato, nelle Figure 3.13, 3.14 e 3.15, l'andamento nella sola zona *F* in cui sono state evidenziate le maggiori differenze tra i profili, i quali si uniformavano, invece, al di sopra.



Figura 3.13 Profilo verticale della velocità W nella zona F al centro della sezione z = 0,1 m



Figura 3.14 Profilo verticale della velocità W nella zona F al centro della sezione z = 0,265 m



Figura 3.15 Profilo verticale della velocità W nella zona F al centro della sezione z = 0,43 m

In generale, si è potuto riscontrare che il modello $k - \omega$ porta a velocità minori nella zona molto vicina al fondo e maggiori nella parte appena sopra, con il punto d'incontro tra gli andamenti relativi alle due soluzioni che sale leggermente all'aumentare della coordinata longitudinale L'analisi condotta ha evidenziato delle differenze tra le due soluzioni ma vista l'entità ridotta e l'inversione nel segno si è potuto concludere che a livello globale vi fosse sufficiente similitudine nell'uso dei due modelli, in particolare in relazione al valore medio sulla porzione adiacente al fondo, usata come parametro d'interesse nelle analisi successive. La scarsa influenza dei modelli è stata anche dettata, probabilmente, dalla semplicità del flusso in esame che non ha fatto emergere le loro peculiarità. Per questo motivo è stato definitivamente selezionato il modello $k - \varepsilon$ per condurre le analisi successive.

3.2.10 Analisi di sensibilità ai parametri turbolenti

Come detto al paragrafo 3.2.5 il programma richiede le condizioni turbolente nella sezione d'ingresso. L'elevata incertezza nella loro determinazione ha portato alla realizzazione di un'analisi della sensibilità della soluzione, a livello di campo di moto, rispetto a una loro variazione. Anche questo studio iniziale è stato svolto per la sola condizione A e, per i risultati già espressi ha riguardato una discretizzazione con *mesh* 3 e l'uso del modello $k - \varepsilon$.

In particolare, è stato scelto di osservare l'effetto di un aumento del 100% dell'energia cinetica turbolenta rispetto al valore calcolato al paragrafo 3.2.5, il che ha portato ai valori riassunti in Tabella 3.14.

Tabella 3.14 Valori dei parametri turbolenti all'inlet per il caso con aumento de 100% di k per la condizione A

condizione	\overline{U} [m/s]	$k [{\rm m}^2/{\rm s}^2]$	$\varepsilon [m^2/s^3]$
А	0,4	0,00514	0,1441

Nella Tabella 3.15 sono riportati gli scarti in percentuale tra le due soluzioni relative alle simulazioni 3 e 6, suddivisi come già descritto al paragrafo 3.2.8 ma relativamente alla sezione con z = 0.02 m.

Tabella 3.15 Risultati dell'analisi di sensibilità ai parametri turbolenti in termini di scarti medi in percentuale della velocità longitudinale, nelle porzioni F e S per le tre coordinate trasversali indicate, nella sezione z = 0.02 m

scarto [%]	x = 0,005 m	x = 0,02 m	x = 0,15 m
F	0,068	0,048	0,044
S	0,005	0,000	0,000

Si è deciso di analizzare questa sezione poiché l'influenza che i parametri turbolenti specificati all'ingresso hanno sul resto del dominio varia in maniera drastica con la posizione. In particolare, l'espressione $k\overline{U}/\varepsilon$ da una stima dell'ordine di grandezza della distanza a cui i parametri assegnati all'*inlet* sopravvivono (Andersson *et al.*, 2012). Per tutte le condizioni in esame tale distanza è risultata di circa 2 cm e per il caso con k aumentata leggermente meno. Analizzando le differenze si è notato che l'influenza nella posizione indicata è risultata minima. Ciò ha rispettato le aspettative derivanti dalla considerazione precedente e ha portato a poter considerare per le varie condizioni i valori originari espressi dalla Tabella 3.5. Tale comportamento è dovuto al fatto che nel caso in esame, come nella maggior parte dei flussi turbolenti, sono generati all'interno degli strati di taglio livelli maggiori di turbolenza rispetto a quelli che entrano dal bordo, rendendo la soluzione relativamente insensibile agli stessi (ANSYS, 2022b).

3.3 Analisi video

Al fine di ricavare le traiettorie seguite da ciascun individuo durante il proprio *test* si è lavorato sui video registrati durante l'esecuzione degli esperimenti. L'osservazione preliminare delle sequenze ha evidenziato l'impossibilità di utilizzare le riprese laterali per le quali sarebbe servito un nuovo addestramento della rete neurale utilizzata la quale, invece, era già adatta a trattare le riprese dal fondo in quanto sviluppata su un caso simile. Si è comunque potuta osservare una certa tendenza comune degli esemplari a permanere nello strato prossimo al fondo per cui, per poter proseguire nello studio, si è scelto d'indagare solo tale zona a livello verticale, anche se questo aspetto rappresenta un limite della presente analisi. L'onerosa procedura utilizzata per ricavare le traiettorie è quindi stata limitata ai soli video con inquadratura dal basso, trasformandosi in un'analisi piana.

Essendo questi relativi all'intero trattamento in canaletta si è dovuto procedere a isolare per ognuno la sola porzione relativa alla condizione di velocità da testare. Le sequenze così ottenute sono state analizzate con una rete neurale artificiale per ottenere le traiettorie dei pesci. La presenza di molti errori di tracciamento in tale analisi preliminare ha portato a svolgere manualmente l'operazione di ricerca e identificazione degli individui per alcuni video aventi il maggiore livello di disturbo. I fotogrammi corretti sono poi stati passati alla rete per addestrarla in maniera da migliorarne le *performance*.

3.3.1 Taglio dei video

I video registrati comprendevano oltre all'esperimento vero e proprio anche la fase di ambientamento del pesce alla canaletta e la transizione al campo di moto prestabilito, oltre a tempi morti iniziali e finali. Essendo d'interesse le traiettorie nella sola fase di *test* le sequenze originali sono state tagliate tramite il *software* SONY PlayMemories Home versione 6.0.00. Il punto d'inizio è stato individuato 2 secondi prima del tempo d'inizio dell'esperimento registrato durante l'esecuzione dell'indagine. Questo è dovuto al fatto che la rete perde i primi frame passati e ci si deve quindi assicurare di conservare l'inizio della fase di *test*. Esso era normalmente il tempo a cui terminava la fase transitoria e si raggiungeva la velocità media desiderata. Tuttavia, in alcuni casi a tale istante l'individuo non era in movimento ma addossato alla griglia posteriore per ragioni comportamentali e quindi il tempo registrato è stato quello a cui esso si rimetteva in moto dopo stimolazione. Il punto in cui far terminare il nuovo video prodotto è stato invece fissato al momento della segnalazione di fine trattamento a seguito del terzo *tap*. Per referenziare i fotogrammi trattati si è provveduto a registrare non solo minuto e

secondo dei due punti di taglio ma anche il numero di fotogramma, riportato dal programma utilizzato come ultimo livello di risoluzione temporale. Un esempio delle operazioni descritte è fornito in Figura 3.16.



Figura 3.16 Individuazione dei punti di taglio, con precisione del fotogramma, per il video 14 (condizione D)

3.3.2 Analisi preliminare e correzione

Alcuni dei video così prodotti sono stati analizzati tramite la rete neurale con vecchio addestramento. Per ognuno di essi è stato prodotto un *file* .csv contenente l'elenco dei fotogrammi con associate le coordinate del centro e le dimensioni del rettangolo contente il capo dell'individuo, espresse in termini relativi rispetto alla dimensione dell'immagine. Dall'analisi di questi risultati sono emersi diversi vuoti, ovvero fotogrammi per i quali non era stato individuato il pesce, e falsi positivi ossia *frames* nei quali il punto segnalato non corrispondeva ad un individuo ma a del rumore. Quest'ultimo è stato evidenziato in maniera importante soprattutto lungo i bordi laterali dove i riflessi di luce causavano l'insorgere di *ripples* e altre forme confondibili con i pesci. Tale fenomeno è risultato particolarmente significativo nei video relativi alle condizioni C e D.

Per contrastare queste problematiche tre video tra quelli analizzati, relativi ai casi peggiori e presentanti le maggiori percentuali di errori, sono stati analizzati manualmente al fine di fornire alla rete neurale delle immagini di riferimento da cui apprendere regole di selezione più corrette. La procedura seguita è iniziata con la generazione, per ogni fotogramma del filmato considerato, di due tipologie di *file*. Questo passaggio è stato automatizzato tramite un codice, creato sul programma Matlab 2018, in grado di produrre un *file* .jpg rappresentante il fotogramma e un *file* .txt contente le coordinate e le dimensioni del rettangolo identificato. Queste sono state lette dal *file* .csv derivante dalla prima analisi e, se non presenti, sono stati assegnati loro dei valori di *default*. I *file* così prodotti per ognuno dei video, nominati in maniera

coerente, sono stati letti tramite il programma di *image labelling* labelIMg, attivato tramite Anaconda3 Prompt. All'interno di tale ambiente viene permesso di visualizzare tutte le immagini prodotte con il rettangolo d'identificazione avente le caratteristiche descritte dai *file* di testo associati. Si è provveduto a scorrere tutte le immagini analizzando la bontà dell'identificazione e provvedendo tramite trascinamento a riposizionare la zona identificata in corrispondenza del capo del pesce in caso di errori. Un esempio di correzione di un falso positivo causato da *ripples* è mostrato in Figura 3.17.

Il salvataggio di ogni *frame* modificato in formato .yolo ha comportato la correzione del *file* .txt associato in maniera automatica da parte del *software*.



Figura 3.17 Correzione di falso positivo tramite spostamento e modifica del rettangolo identificativo dal rumore di bordo (sopra) al capo dell'individuo (sotto)

4 Risultati

4.1 Campi di moto

Per quanto emerso dalle analisi preliminari illustrate ai paragrafi 3.2.8, 3.2.9 e 3.2.10 la simulazione 3, basata sulla *mesh* 3 e sul modello $k - \varepsilon$ con condizioni turbolente normali, presentava tutti i parametri selezionati per le analisi definitive dei campi di moto ed è stata quindi usata per ricavare quelli relativi alla condizione A. Per gli altri casi sperimentali si è proceduto alla creazione delle rispettive geometrie differenti in termini di *h*. A queste è stata applicata la discretizzazione del dominio desiderata, ovvero basata sugli stessi parametri di progetto della griglia 3 relativa al *mesh independence study*. Proprio per la differente altezza dell'acqua il numero di celle generato è risultato diverso, secondo quanto espresso dalla Tabella 4.1, mentre le dimensioni degli *inflation layers* sono rimaste invariate.

simulazione	condizione	N	G	<i>d_{nom}</i> [m]	nodi	elementi
7	В	25	1,15	0,0065	189987	180892
8	С	25	1,15	0,0065	198038	188764
9	D	25	1,15	0,0065	209326	199752

Tabella 4.1 Valori dei parametri di creazione e delle proprietà delle mesh relative alle simulazioni 7, 8 e 9

Come detto si è selezionato sempre il modello $k - \varepsilon$ in versione *realizable* e sono state attribuite le condizioni all'ingresso riportate in Tabella 3.6, ovvero con parametri turbolenti calcolati secondo quanto espresso al paragrafo 3.2.5. Tramite le simulazioni 3, 7, 8 e 9 (Tabella 3.2) sono quindi stati ricavati i campi di moto definitivi da usare per le analisi successive. A titolo di esempio, si riportano in Figura 4.1 gli andamenti della velocità longitudinale *W*, sulle tre sezioni trasversali già identificate, per il caso con velocità media 0,55 m/s.



Figura 4.1 *Contours* della velocità *W* nelle sezioni z = 0,1 m (sopra), z = 0,265 m (al centro) e z = 0,43 m (sotto) per la simulazione 9 (condizione D)

Vista la tendenza dei pesci a rimanere, in particolare durante le fasi di nuoto, il più possibile vicini al fondo si è anche svolto un confronto per ogni condizione, riportato in Tabella 4.2, tra \overline{U} e la media delle velocità su un piano posto ad un'altezza (y = 0,45 cm) pari alla metà di quella media degli individui.

Tabella 4.2 Confronto, per le diverse condizioni, tra velocità media sezionale e velocità media sul piano orizzontale con y = 0.0045 m

condizione	\overline{U} [m/s]	$\overline{U}_{0,45}$ [m/s]
А	0,4	0,377
В	0,45	0,426
С	0,5	0,475
D	0,55	0,525

Dai risultati ottenuti si osserva come, ovviamente, la velocità in prossimità del fondo sia decisamente più bassa di quella media, con una differenza prossima al 5%. Questa possibilità di confrontarsi con velocità inferiori spiega, considerata la possibilità dei pesci di individuare le zone con flusso meno intenso (Katopodis e Gervais, 2016), la scelta degli stessi di avvicinarsi il più possibile al fondo, intuita dall'analisi delle riprese laterali, e quella evidenziata al paragrafo 4.2 di mantenersi prevalentemente vicino alle pareti laterali.

4.2 Traiettorie

Dopo aver addestrato ulteriormente la rete neurale grazie ai fotogrammi corretti manualmente si è proceduto a rianalizzare le sequenze relative a ogni esperimento. A seguito dell'applicazione di un filtro di Kalmann, per ciascuna di esse sono state ottenute le traiettorie filtrate, espresse nel sistema di riferimento dei fotogrammi.

Inoltre, ciascun video è stato analizzato per andare a identificare le fasi di nuoto concorrenti a determinare il tempo di fatica. Solitamente, se ne è osservata una sola per esperimento, dopo la quale il pesce non era più in grado di nuotare ma, non troppo raramente, si sono trovati due o più spezzoni di attività. I limiti temporali di questi sono stati usati per selezionare dalle traiettorie filtrate le sole porzioni d'interesse. Questo è stato fatto all'interno di un codice Matlab attraverso il quale sono state lette, per ogni *file* riportante la traiettoria, le coordinate espresse in *pixels* e legate ad un sistema di riferimento relativo all'immagine con origine nell'angolo in alto a sinistra, asse x' orizzontale verso destra e asse y' verticale verso il basso.

Per passare alle coordinate metriche e riferite alla sola porzione d'acqua d'interesse, usate anche nell'analisi dei campi di moto, è stato analizzato il legame tra i due sistemi di riferimento. Dato che le riprese sono state effettuate dal basso verso l'alto tenendo la sezione di monte sulla sinistra delle immagini, i due sono risultati coerenti in termini di direzioni degli assi (x' - z, y' - x). Le espressioni di conversione (4.1) e (4.2) hanno quindi incluso solamente una traslazione dell'origine e un cambiamento di scala.

$$z = \frac{(x' - limsx)}{(limdx - limsx)}l$$
(4.1)

$$x = \frac{(y' - limsup)}{(liminf - limsup)}b$$
(4.2)

Per compiere tali operazioni è stato necessario identificare i limiti della porzione d'acqua d'interesse ed esprimerli in *pixels*. Ciò è stato possibile tramite il programma ADOBE Premiere Rush, che nella schermata di taglio permette di impostare dei confini espressi in percentuale. Essendo l'attrezzatura riposta alla fine di ogni giornata di esperimenti si è proceduto all'identificazione dei limiti per un video relativo ad ogni sessione, come riportato in Tabella 4.3. Si sono potute osservare differenze significative che, se trascurate, avrebbero portato a errori grossolani.

sessione	1	2	3
N° video	10	17	13
limsup	0,063	0,031	0,075
liminf	0,941	0,921	0,933
limsx	0,063	0,051	0,083
limdx	0,941	0,941	0,949

Tabella 4.3 Valori dei limiti della porzione d'interesse delle immagini in relazione alle diverse sessioni d'indagine

Questi valori relativi alle dimensioni dell'immagine sono poi stati convertiti in termini di *pixels* semplicemente considerando il formato 1080p (1920x1080) usato per le riprese e in seguito usati per il cambio di coordinate.

Per visualizzare i parametri ora identificati si riporta in Figura 4.2 una rappresentazione grafica del legame tra il sistema di riferimento dell'immagine e quello del dominio.



Figura 4.2 Legame grafico tra il sistema di riferimento dell'immagine (rosso) e quello del dominio (verde)

Convertite le coordinate, per ciascun individuo è stato possibile visualizzare la traiettoria piana seguita durante le fasi di nuoto. La conversione delle traiettorie nel sistema di riferimento del dominio ha portato inevitabilmente alla comparsa di alcuni *outliers*, evidenziando una certa sensibilità nella procedura di analisi dei video. A causa delle operazioni d'identificazione e filtraggio, infatti, in alcuni istanti l'individuo è stato identificato all'esterno dell'area d'indagine e si è quindi provveduto ad eliminare tali posizioni. A titolo di esempio, in Figura 4.3 si riporta la traiettoria relativa ad un caso con tre fasi di nuoto.



Figura 4.3 Traiettoria nel piano seguita dal pesce 33 (condizione A) suddivisa nelle diverse fasi di nuoto concorrenti a determinare il tempo di fatica

In analogia con quanto accaduto per il fondo si è potuta notare una decisa propensione degli individui a permanere in prossimità delle pareti laterali per sfruttare le velocità relativamente basse presenti in questa zona. Tale considerazione è ben rappresentata dai *density plot*, riportati nelle Figure 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7, dove si può visualizzare, per ogni condizione, la densità di occupazione di ogni punto del dominio piano.



Figura 4.4 *Density plot* delle posizioni occupate dai 10 individui testati sotto la condizione A durante le fasi di nuoto (risoluzione 0,5 cm)



Figura 4.5 *Density plot* delle posizioni occupate dai 10 individui testati sotto la condizione B durante le fasi di nuoto (risoluzione 0,5 cm)



Figura 4.6 Density plot delle posizioni occupate dai 10 individui testati sotto la condizione C durante le fasi di nuoto (risoluzione 0,5 cm)



Figura 4.7 *Density plot* delle posizioni occupate dai 10 individui testati sotto la condizione D durante le fasi di nuoto (risoluzione 0,5 cm)

Oltre a tale tendenza generale si può anche osservare l'effetto dell'aumento della velocità del *test* sul posizionamento degli individui. Per valori bassi di \overline{U} la zona centrale del piano viene decisamente evitata e si ha la concentrazione della densità lungo delle fasce laterali comunque piuttosto ampie. Al contrario, con il crescere della velocità media si osservano sempre più passaggi attraverso la zona centrale causati dalle difficoltà di nuotare, anche lungo le pareti, contro tali correnti e dalla conseguente tendenza ad esplorare zone differenti. Le porzioni laterali, comunque predominanti, si assottigliano sempre più verso i bordi dove le velocità sono inferiori. Nelle condizioni A e B, invece, gli esemplari riescono a trovare una posizione stabile a livello trasversale e a mantenerla con minore difficoltà. A livello longitudinale poi, si osserva il passaggio dall'occupazione predominante della zona adiacente alla griglia di monte (condizione A) alla permanenza quasi esclusiva in prossimità della griglia di valle (condizione D). Nei video relativi a questi ultimi esperimenti, infatti, si osserva spesso l'individuo che, dopo aver subito una stimolazione, riprende a nuotare senza però riuscire a risalire la canaletta.
4.3 Serie temporali di velocità relativa

Avendo la posizione del capo dell'individuo sul piano ad ogni *frame*, all'interno dello stesso codice Matlab, è stata calcolata la velocità del pesce, rispetto a un riferimento assoluto, tramite derivazione. In particolare, si è provveduto al calcolo della componente longitudinale W_p a partire dalla posizione longitudinale assunta dal pesce z_p ai diversi istanti temporali. Avendo osservato una forte oscillazione delle coordinate, probabilmente dovuta sia al filtraggio che al moto reale dell'individuo, si è scelto di compiere l'operazione di derivazione con approccio *central-differencing* considerando tre diversi passi temporali. Questa analisi di sensibilità, infatti, ha consentito di valutare una possibile dipendenza dei risultati ottenuti dalla frequenza dei dati utilizzati nel calcolo.

Avendo a disposizione video con frequenza di 50 fps le traiettorie filtrate presentavano dati intervallati di $\Delta t = 0,02 \text{ s}$. Il primo passo che si è scelto di utilizzare è stato quindi di 1/50 s, con il calcolo della derivata svolto tramite scorrimento lungo il vettore delle z secondo quanto espresso dalla (4.3).

$$W_{p,\frac{1}{50}}(t) = \frac{z_p(t + \Delta t/2) - z_p(t - \Delta t/2)}{\Delta t}$$
(4.3)

Avendo utilizzato due valori adiacenti nella sequenza per ricavare la velocità riferita all'istante centrale rispetto ad essi questa risulta sempre riferita a una scala dei tempi sfasata di $\Delta t/2$ rispetto a quella delle traiettorie. Gli altri passi individuati sono stati 1/25 s e 1/5 s. Le relazioni utilizzate nel codice Matlab per ricavare queste due sequenze di velocità che, a differenza della precedente sono in fase con gli istanti relativi alle posizioni note, sono riportate rispettivamente alla (4.4) e (4.5).

$$W_{p,\frac{1}{25}}(t) = \frac{z_p(t + \Delta t) - z_p(t - \Delta t)}{2\Delta t}$$
(4.4)

$$W_{p,\frac{1}{5}}(t) = \frac{z_p(t+5\Delta t) - z_p(t-5\Delta t)}{10\Delta t}$$
(4.5)

Gli andamenti di velocità assoluta dell'individuo così ricavati sono anche stati ripuliti da eventuali *outliers*. Per definire quest'ultimi la generica sequenza è stata suddivisa in porzioni di lunghezza pari alla scala temporale dei grandi vortici turbolenti, relazionabile al rapporto

 k/ε e uniformata per tutte le condizioni analizzate a un valore di 2 s. Per ognuna sono stati calcolati il valore medio μ e la deviazione standard σ , utilizzate per escludere i valori riscontrati al di fuori del fuso $\mu \pm 3\sigma$. Un esempio della serie temporale di velocità assoluta dell'individuo calcolata secondo i tre passi definiti, rispetto alla coordinata longitudinale occupata dallo stesso, è riportato in Figura 4.8. Vengono riportate sia le fasi di nuoto che i momenti di pausa compresi tra esse, dove gli andamenti non sono rappresentati. In generale, si osservano diverse oscillazioni con la presenza di tratti di segno negativo (nuoto controcorrente) e altri con segno positivo (trascinamento da parte del flusso). L'entità di queste è maggiore nel caso del passo di calcolo della derivata minimo, pari alla frequenza dei filmati. Viceversa, l'andamento risulta più liscio e regolare adottando una distanza maggiore tra i dati utilizzati nel calcolo.



Figura 4.8 Serie temporale della velocità assoluta W_p (asse sinistro) dell'individuo 35, per i tre passi temporali assunti, rispetto alla posizione occupata z_p (asse destro)

Il passo successivo è stato estrarre dai campi di moto, ricavati per l'intero dominio dalle simulazioni CFD, la velocità presente ad ogni istante nel punto occupato dal pesce. Anche per questa è stata valutata la sola componente longitudinale che comunque risultava ovviamente dominante. Le traiettorie sono state ricavate solo per il piano x-z ma come detto, in particolare nelle fasi di nuoto, i pesci si trovavano adiacenti al fondo della canaletta dove le velocità risultavano minori. Per questo motivo, a livello verticale, si è scelto di considerare la velocità

media su un tratto pari all'altezza media degli individui di 0,9 cm a partire dal fondo. Ad ogni istante di tempo, conoscendo dai dati CFD relativi al centro di ogni cella le velocità dell'acqua e dalle traiettorie la posizione sul piano orizzontale del capo del pesce, è stato possibile ricavare tramite interpolazione e media sulla verticale, la velocità dell'acqua W_a fronteggiata dal pesce. La velocità relativa dell'individuo rispetto al flusso, è stata quindi calcolata per ogni frame selezionato secondo la (4.6).

$$W_{rel} = W_a - W_p \tag{4.6}$$

Tramite la procedura ora descritta si è quindi pervenuti, per ogni individuo e passo temporale, ad una sequenza delle velocità relative da esso tenute durante le fasi di nuoto, di cui è fornita una rappresentazione in Figura 4.9, unitamente alla W_a compresente. Anche in queste serie sono incluse le pause eventualmente presenti tra le varie fasi di nuoto. Si può notare come anche la velocità relativa presenti delle oscillazioni marcate, le quali seguono quanto già detto per W_p relativamente alla dipendenza dal passo temporale. Infatti, l'influenza maggiore sembra essere dovuta a questa piuttosto che alla velocità dell'acqua nel punto, la quale è tipicamente più regolare.



Figura 4.9 Serie temporale della velocità relativa W_{rel} dell'individuo 14, per i tre passi temporali assunti, rispetto alla velocità dell'acqua nelle posizioni occupate W_a

4.4 Confronto tra velocità relativa, dell'acqua e sezionale

Della sequenza temporale di velocità relativa per ogni individuo e passo temporale di derivazione, è stata calcolata la media lungo l'intera traiettoria nuotata $\langle W_{rel} \rangle$. Questa è stata confrontata con la velocità media sulla sezione \overline{U} per valutare l'entità della differenza implicata dall'assunzione di quest'ultima come descrittore dello sforzo compiuto. I risultati, distinti sulla base della condizione sperimentale, sono riportati per ciascun passo temporale in Figura 4.10, insieme alla retta rappresentante l'uguaglianza tra le due variabili oggetto di confronto e a quella interpolante effettivamente riscontrata. Relativamente a questa vengono riportati in Tabella 4.4 il coefficiente angolare *a*, quello di correlazione di Pearson *r* e il *p*-value del test di significatività relativo all'ipotesi nulla di assenza di correlazione, eseguito con una soglia standard di 0,05.

Tabella 4.4 Valori dei parametri di correlazione lineare *a*, *r*, *p*-value relativi al legame $\overline{U} - \langle W_{rel} \rangle$, per i tre passi temporali di calcolo della derivata

passo temporale [s]	1/50	1/25	1/5
а	0,69	0,69	0,68
r	0,678	0,675	0,661
p-value	1,5E-06	1,8E-06	3,4E-06



Figura 4.10 Confronto tra \overline{U} e $\langle W_{rel} \rangle$, per un passo temporale nella derivazione di 1/50 s (sopra), 1/25 s (al centro) e 1/5 s (sotto), con rappresentazione, rispetto all'andamento di uguaglianza Y=X, dei dati ottenuti e della loro retta interpolante nel senso dei minimi quadrati

Osservando tali grafici si può notare come la forbice dei valori di velocità relativa media riscontrati tenda leggermente ad aumentare al crescere di \overline{U} . Questo può essere attribuito ad una maggior difficoltà degli individui a far fronte a flussi più intensi che provoca una maggiore variabilità nella risposta degli stessi. Inoltre, si osserva come i valori relativi alla condizione C siano maggiori, in proporzione, a quelli riscontrati per gli altri test, i quali mostrano un trend piuttosto regolare. Inoltre, solamente un punto appartenente a questo set si trova al di sopra della retta di corrispondenza tra ascisse e ordinate, ovvero identifica una velocità relativa media mantenuta maggiore della velocità media sezionale, rappresentativa della condizione sperimentale applicata. La pendenza dell'interpolazione risulta minore di 1 ad indicare una maggior corrispondenza tra le due variabili per valori più bassi delle stesse, probabilmente perché in tali situazioni i pesci riescono a mantenere velocità più simili al campo di moto presente nella posizione da essi occupata e, quindi, anche al valor medio dell'intera corrente. Il legame lineare indagato, inoltre, presenta una correlazione positiva abbastanza marcata e significativa. Come già notato, il principale aspetto osservato è la presenza di velocità relative minori, con un'unica eccezione, di quelle sezionali, attribuibile a un duplice effetto. Da un lato, gli individui sono stati considerati in prossimità del fondo e sono stati effettivamente osservati occupare le fasce vicino alle pareti, trovando quindi velocità del campo di moto inferiori a quella media del flusso. Dall'altro, l'analisi dei video ha mostrato una diffusa tendenza degli individui, durante le fasi di nuoto, a perdere progressivamente posizione rispetto alla griglia di monte, facendo quindi esperienza di una velocità relativa ancora inferiore a quella della zona occupata.

Per approfondire quest'ultimo aspetto si è anche eseguito un confronto tra $\langle W_{rel} \rangle$ e la velocità dell'acqua fronteggiata in media lungo la traiettoria $\langle W_a \rangle$, i cui risultati, secondo la logica già espressa, sono riportati in Tabella 4.5 e in Figura 4.11.

Tabella 4.5 Valori dei parametri di correlazione lineare a, r, p-value relativi al legame $\langle W_a \rangle - \langle W_{rel} \rangle$, per i tre passi temporali di calcolo della derivata

passo temporale [s]	1/50	1/25	1/5
а	0,76	0,76	0,75
r	0,749	0,746	0,724
p-value	2,8E-08	3,2E-08	1,2E-07



Figura 4.11 Confronto tra $\langle W_a \rangle$ e $\langle W_{rel} \rangle$, per un passo temporale nella derivazione di 1/50 s (sopra), 1/25 s (al centro) e 1/5 s (sotto), con rappresentazione, rispetto all'andamento di uguaglianza Y=X, dei dati ottenuti e della loro retta interpolante nel senso dei minimi quadrati

Anche questi grafici mostrano punti tendenzialmente al di sotto della retta Y=X. Essendo il confronto riferito alla velocità media dell'acqua lungo la traiettoria percorsa, una velocità relativa inferiore ad essa testimonia una complessiva perdita di posizione durante il nuoto tipica, come detto, della maggior parte dei test. Tuttavia, si osservano alcuni rappresentanti di una tendenza opposta, spesso riferiti alla condizione C. Tale situazione sembra ascrivibile ad una semplice variabilità statistica ma permette di spiegare la tendenza osservata in Figura 4.10, relativamente alla presenza di velocità relative in proporzione più alte rispetto alle altre condizioni. Infatti, esse risultano più alte anche delle velocità del campo di moto lungo le traiettorie considerate, per cui tale comportamento è da attribuire alla presenza di fasi di nuoto caratterizzate da una moderata risalita della canaletta, piuttosto che alla percorrenza di regioni caratterizzate da velocità più simili a quella sezionale, in accordo con quanto emerso al paragrafo 4.2 rispetto alla distribuzione delle posizioni occupate. L'andamento del legame $\langle W_a \rangle - \langle W_{rel} \rangle$ mostra una marcata corrispondenza tra le due alle basse velocità mentre per valori superiori si osserva una dispersione maggiore e una velocità relativa tendenzialmente inferiore all'altra. Questo sembra indicare una maggiore stabilità mantenuta dagli individui testati nelle condizioni di intensità minore rispetto ad una risposta più variabile, anche se tendente al trascinamento tipica degli esperimenti relativi alle condizioni C e D. Questo andamento si riflette nei valori di a riportati in Tabella 4.5, più vicini all'unità (uguaglianza) e superiori a quelli relativi al legame con la velocità sezionale (Tabella 4.4).

In entrambi i confronti proposti si osserva una variazione limitata dei risultati rispetto al passo temporale di derivazione. Tra i due più ridotti la corrispondenza è quasi totale mentre una certa differenza viene mostrata dall'uso di posizioni distanti 1/5 s nel calcolo della velocità assoluta.

4.5 Valutazione dell'indipendenza dell'energia dalla velocità relativa media

Dalle serie temporali di velocità relativa è stata poi valutato l'integrale *Int* relazionato all'energia spesa da ogni individuo durante il proprio *test*, secondo quanto espresso dalla (4.7), derivante dalla (2.22). Questa è legata all'ipotesi di moto stazionario mentre si è potuta osservare la presenza di numerose oscillazioni nella velocità relativa i cui effetti, legati all'uso della legge di Morison, sono stati ipotizzati come trascurabili.

$$Int = \int_{0}^{T_{f}} W_{rel}^{\beta+1} dt$$
(4.7)

Questa procedura è stata svolta sempre in ambiente Matlab, dove le serie temporali di W_{rel} sono state suddivise in porzioni di durata pari alla scala turbolenta di 2 s già citata. Su ognuna è stata calcolata una velocità media nell'ottica della valutazione della forza di *drag*, per la cui definizione non si fa riferimento alla velocità istantanea. Tali valori sono poi stati elevati all'esponente β +1, assumendo i due valori limite di tale parametro. Potendo considerare la velocità costante su ogni tratto si è quindi ottenuto *Int* come somma di queste potenze moltiplicate per la durata degli stessi. Questi valori rappresentativi, a meno di una costante specifica di ogni individuo, dell'energia spesa dagli stessi, sono stati rappresentati in relazione alla velocità relativa media corrispondente in modo da verificare l'indipendenza di tali variabili. I risultati, distinti in base alla condizione sperimentale, sono riportati in Figura 4.12 ($\beta_1 = 1,73$) e Figura 4.13 ($\beta_2 = 2$). Inoltre, si riportano, rispettivamente in Tabella 4.6 e 4.7, i valori del coefficiente di correlazione r e del *p-value* del *test* di significatività ad essa riferito.

Tabella 4.6 Valori dei parametri di correlazione lineare r, *p-value* relativi al legame tra *Int* calcolato tramite $\beta_1 =$ 1,73 e $\langle W_{rel} \rangle$, per i tre passi temporali di calcolo della derivata

passo temporale [s]	1/50	1/25	1/5
r	0,095	0,095	0,107
p-value	0,5599	0,5589	0,5116

Tabella 4.7 Valori dei parametri di correlazione lineare r, *p-value* relativi al legame tra *Int* calcolato tramite $\beta_2 = 2$ e $\langle W_{rel} \rangle$, per i tre passi temporali di calcolo della derivata

passo temporale [s]	1/50	1/25	1/5
r	0,167	0,168	0,180
p-value	0,3031	0,3012	0,2678



Figura 4.12 Legame tra *Int* calcolato tramite $\beta_1 = 1,73$ e $\langle W_{rel} \rangle$ con dati suddivisi per condizione sperimentale, per un passo temporale nella derivazione di 1/50 s (sopra), 1/25 s (al centro) e 1/5 s (sotto)



Figura 4.13 Legame tra *Int* calcolato tramite $\beta_2 = 2$ e $\langle W_{rel} \rangle$ con dati suddivisi per condizione sperimentale, per un passo temporale nella derivazione di 1/50 s (sopra), 1/25 s (al centro) e 1/5 s (sotto)

Dai grafici riportati si può osservare una disposizione dei punti caratterizzata da notevole variabilità. Come detto al paragrafo 2.2.3, infatti, l'energia al limite di fatica, relazionata agli integrali qui valutati, può variare notevolmente anche tra esemplari della stessa specie e lunghezza, come quelli in esame. A livello di un campione rappresentativo, però, essa viene ipotizzata indipendente dalla velocità. Tale supposizione sembra confermata dalla distribuzione osservata. Inoltre, i valori di r quasi nulli e l'alta significatività riscontrata in riferimento all'ipotesi di assenza di correlazione, seppur relativi alla presenza di un legame lineare, indicano la verosimiglianza di tale considerazione. La maggior correlazione mostrata dai risultati relativi al calcolo dell'integrale mediante β_2 sembra indicare come questo descriva meno bene l'andamento per i dati in esame. Inoltre, con riferimento ad entrambi i valori limite, si nota una tendenza a maggiori correlazioni e quindi risultati meno convincenti per un passo temporale di 1/5 s, rispetto alla quasi totale corrispondenza tra le altre due alternative.

4.6 Curve di fatica

Valutata la verosimiglianza dell'ipotesi di energia indipendente dalla velocità si sono volute esprimere le capacità natatorie osservate nel presente studio, anche in un'ottica di confronto con quanto riportato al paragrafo 2.2.3. Queste sono solitamente presentate in letteratura come legami tra tempo di fatica e velocità mantenuta. Inoltre, se si ipotizza una velocità fissata l'integrale legato all'energia della (2.22) si risolve in un semplice prodotto tra velocità elevata alla β +1 e tempo di fatica, come espresso dalla (2.23). Come evidenziato già al paragrafo 4.3, nel caso in esame la velocità relativa di ogni esperimento è risultata differente da una costante. Al contempo, come descritto al paragrafo 4.5, sono stati calcolati i valori degli integrali legati all'energia secondo i due valori limite di β . Si è quindi pensato di valutare secondo la (4.8), un coefficiente di ragguaglio *C* identificativo del rapporto tra il valore dell'integrale e il prodotto tra T_f e una certa velocità ritenuta costante, per la quale è stato assunto il valore medio $\langle W_{rel} \rangle$ già valutato.

$$C = \frac{Int}{T_f \cdot \langle W_{rel} \rangle^{\beta+1}}$$
(4.8)

Questo è stato possibile per ogni esperimento e relativamente a ciascun passo temporale nel calcolo della velocità assoluta, nonché considerando entrambi i valori di β . In ogni caso si è

sempre ottenuto un valore superiore a 1, come atteso dal legame tra le operazioni di media ed elevamento a potenza. Per ogni *set* di parametri, i valori relativi ai diversi individui hanno presentato una certa variabilità, probabilmente legata alle caratteristiche delle oscillazioni osservate nelle rispettive serie temporali. Si riportano in Tabella 4.8 ($\beta_1 = 1,73$) e 4.9 ($\beta_2 = 2$) i valori medi e le deviazioni standard riscontrati.

Tabella 4.8 Medie e deviazioni standard dei valori del coefficiente di ragguaglio C ottenuti in riferimento a $\beta_1 =$ 1,73, per i tre passi temporali di calcolo della derivata

passo temporale [s]	1/50	1/25	1/5
media	1,115	1,117	1,124
deviazione standard	0,103	0,105	0,115

Tabella 4.9 Medie e deviazioni standard dei valori del coefficiente di ragguaglio C ottenuti in riferimento a $\beta_2 = 2$, per i tre passi temporali di calcolo della derivata

passo temporale [s]	1/50	1/25	1/5
media	1,150	1,151	1,159
deviazione standard	0,134	0,136	0,151

Si osserva, come già in precedenza, una sostanziale corrispondenza per i valori ottenuti con passi temporali di 1/50 s e 1/25 s mentre si ha una leggera differenza, con valori medi più alti e maggiore variabilità, per la frequenza più ridotta.

Tale valutazione è legata alla possibilità di esprimere il vincolo energetico attraverso una curva di fatica $T_f - \langle W_{rel} \rangle$. Infatti, se si considera *C* come una costante, diventa valido un legame del tipo (2.23). In realtà, come ora osservato, tale situazione non si verifica ma è necessario ottenere degli strumenti descrittori delle *performance* natatorie che siano caratterizzati da facilità di applicazione. In questo senso, emerge il significato dietro l'uso delle curve di fatica rappresentanti, infatti, il tipico prodotto presente in letteratura. Nella presente analisi sono quindi stati prodotti grafici di questo tipo con valori sperimentali relazionati alla velocità relativa media. In un'ottica di confronto tra le possibili velocità considerabili come riferimento della resistenza, analogamente a quanto fatto al paragrafo 4.4, gli stessi grafici sono anche stati prodotti rispetto a $\overline{U} \in \langle W_a \rangle$. Per tutti è anche stato operato un confronto con l'andamento teorico (2.23), valido in virtù delle considerazioni ora effettuate, considerando di volta in volta al posto di *U* la velocità desiderata. Applicando le proprietà dei logaritmi si ottiene un legame lineare tra gli stessi relativi al tempo di fatica e alla velocità secondo quanto espresso dalla (4.9), in cui l'esponente diventa il coefficiente angolare.

$$\ln(T_f) \sim -(\beta + 1)\ln(U)$$
(4.9)

Le curve di fatica $T_f - \langle W_{rel} \rangle$ relative a ciascun passo temporale, sono quindi state rappresentate su piano bilogaritmico (Figura 4.14). I valori sperimentali, distinti in base alla condizione sperimentale, sono quindi stati interpolati secondo una retta ai minimi quadrati, valutando la correlazione lineare degli stessi, e confrontando i risultati (Tabella 4.10) con l'andamento (4.9), rappresentato nei grafici con un coefficiente angolare relativo ad un valore di $\beta = 1,87$, intermedio rispetto ai limiti teorici.

passo temporale [s]	1/50	1/25	1/5
а	-2,02	-2,02	-1,85
β	1,02	1,02	0,85
r	-0,349	-0,349	-0,324
p-value	0,0273	0,0273	0,0413

Tabella 4.10 Valori dei parametri di correlazione lineare a, r, p-value e dell'esponente β relativi al legame $T_f - \langle W_{rel} \rangle$ in scala bilogaritmica, per i tre passi temporali di calcolo della derivata

Da quanto riportato si può osservare come per i valori di velocità relativa media ottenuti all'aumentare di questa si ottenga effettivamente una diminuzione del tempo di fatica riscontrato nell'esperimento. I valori di r ottenuti, infatti, evidenziano tale correlazione negativa seppur non siano troppo elevati a testimonianza di una certa variabilità legata alle differenze tra gli individui della popolazione, già riscontrata nella valutazione dell'energia. Tuttavia, i p-value relativi al test di significatività sono tali da permettere di considerare l'esistenza di un legame lineare tra i logaritmi di $T_f \in \langle W_{rel} \rangle$, come ipotizzato. Si osserva, inoltre, che tali valori risultano molto simili per i passi più ridotti mentre si nota una correlazione minore per il caso con 1/5 s. Tale comportamento, probabilmente legato ad un maggior smorzamento delle oscillazioni della velocità relativa e alle conseguenze sul calcolo di quantità ad essa legate, è stato osservato durante tutto il corso dell'analisi. Allo stesso modo si osserva la discrepanza tra i valori del coefficiente angolare, e quindi di β , riferiti ai diversi passi temporali di calcolo. Relativamente a questo confronto con l'andamento teorico si è ottenuta una pendenza meno marcata anche del limite inferiore ma tale valore, in virtù della poca nitidezza dei legami trovati, potrebbe essere suscettibile di variazioni apprezzabili analizzando gruppi di dati più importanti, aventi maggiore affidabilità.



Figura 4.14 Curve di fatica $T_f - \langle W_{rel} \rangle$ come rette su piano bilogaritmico, con rappresentazione dei dati in base alla condizione e confronto tra interpolazione e andamento teorico ($\beta = 1,87$), per un passo temporale nella derivazione di 1/50 s (sopra), 1/25 s (al centro) e 1/5 s (sotto)

Come detto, secondo gli stessi criteri sono state anche rappresentate le curve di fatica $T_f - \overline{U}$ (Figura 4.15) e $T_f - \langle W_a \rangle$ (Figura 4.16). Inoltre, vengono riportati i valori dei parametri di confronto con l'andamento teorico, rispettivamente in Tabella 4.11 e 4.12.



Figura 4.15 Curva di fatica $T_f - \overline{U}$ come retta su piano bilogaritmico, con rappresentazione dei dati in base alla condizione e confronto tra interpolazione e andamento teorico ($\beta = 1,87$)

Tabella 4.11 Valori dei parametri di correlazione lineare a, r, p-value e dell'esponente β relativi al legame $T_f - \overline{U}$ in scala bilogaritmica

m	β	r	p-value
-4,49	3,49	-0,630	1,3E-05



Figura 4.16 Curva di fatica $T_f - \langle W_a \rangle$ come retta su piano bilogaritmico, con rappresentazione dei dati in base alla condizione e confronto tra interpolazione e andamento teorico ($\beta = 1,87$)

Tabella 4.12 Valori dei parametri di correlazione lineare a, r, p-value e dell'esponente β relativi al legame $T_f - \langle W_a \rangle$ in scala bilogaritmica

m	β	r	p-value
-4,08	3,08	-0,682	1,3E-06

Si osserva che per entrambi i casi si ottengono pendenze maggiori di quelle ottenute in riferimento alla velocità relativa media. Ciò è in accordo con quanto ritrovato al paragrafo 4.4, dove essa risultava legata a $\langle W_a \rangle$, e ancora di più ad \overline{U} , secondo legami con pendenza inferiore all'unità. Questo si riflette, quindi, nei valori di β ottenuti da interpolazione che risultano, in entrambi i casi, maggiori del limite teorico superiore. Al contempo, si nota una maggiore correlazione lineare del tempo di fatica con tali parametri, rispetto a quella mostrata con $\langle W_{rel} \rangle$. Questo deriva dalla minore variabilità che mostrano i dati. Infatti, la velocità sezionale media risulta uguale per tutti i dati riferiti ad un certo *set*. La velocità dell'acqua media riscontrata, invece, varia anche a seconda delle posizioni occupate dagli individui. Infine, la velocità relativa media è influenzata anche dalla risposta dei diversi esemplari ad essa, che si presenta ancor più variabile come osservato da r e p-value riportati in Tabella 4.10.

5 Discussione

Lo studio presentato è stato incentrato, in particolar modo, sulla valutazione delle capacità natatorie e il confronto con andamenti teorici riferiti alla velocità relativa mantenuta dai pesci, rispetto alla situazione comune di confronto con la velocità media sezionale del flusso in esame. Mentre quest'ultima può essere valutata con facilità, la determinazione della velocità relativa coinvolge diversi aspetti accompagnati da numerose particolarità.

Relativamente alla determinazione del campo di moto, come detto, numerose valutazioni sono state eseguite per assicurarsi il controllo sui risultati forniti dai programmi CFD. Con riferimento al mesh independence study si è potuta notare un'evoluzione dei risultati al variare della discretizzazione spaziale piuttosto ridotta. Questo può essere dovuto al fatto che la mesh 1 adottata all'inizio della procedura per avere una prima soluzione è stata già costruita andando a rispettare i canoni consigliati. Il fattore geometrico di crescita risulta, infatti, al limite massimo del campo solitamente indicato (G < 1,3) mentre il numero di strati leggermente al di sotto dei valori tipici indicati in letteratura. Tuttavia, la loro combinazione, unita alla scelta dell'altezza del primo strato, ha portato al rispetto dei criteri di rapporto tra le dimensioni del boundary e dell'inflation layer in maniera ottima, già con tale griglia. Questo può spiegare le poche variazioni osservate al proseguire della procedura che, come comunque atteso, si sono via via ridotte fino al raggiungimento della stabilità. Uniche zone nelle quali sono state osservate delle particolarità nei risultati ottenuti sono quelle prossime agli angoli tra fondo e pareti dove l'utilizzo degli strati crescenti sui due lati ha causato una griglia distorta. Per migliorare la discretizzazione in tali regioni si potrebbe pensare di suddividere il dominio con soli elementi ortogonali, anche se più numerosi, vista la semplice geometria in gioco.

Seppur sia stato assunto, sulla base dei video osservati, che i pesci trascorressero la maggior parte del *test* vicino al fondo, la modellazione del flusso tenendo conto dell'aria potrebbe far emergere considerazioni nuove sul campo di moto. Insieme a questo, nella prospettiva di virare verso un approccio transitorio, si potrebbe pensare di utilizzare modelli di chiusura della turbolenza LES. L'uso di modelli legati ai grandi vortici, permetterebbe di valutare anche un effetto di questi e quindi delle scale turbolente del sistema, come proposto anche da Nikora *et al.* (2003). Il confronto tra modelli $k - \varepsilon e k - \omega$ eseguito nel presente studio, e posto nell'ottica sempre consigliata di valutare chiusure differenti della turbolenza (Andersson *et al.*, 2012), ha già evidenziato delle differenze nelle soluzioni, nonostante la similitudine delle due strategie. Queste non sono però state identificate come significative anche alla luce delle difficoltà che una nuova modellazione può comportare in alcuni casi. Bisogna quindi sempre valutare strategie di descrizione e risoluzione del problema, anche dal punto di vista matematico, che non comportino oneri computazionali inadeguati al livello dei risultati necessari (Andersson *et al.*, 2012). La stessa considerazione è anche valida relativamente all'affinamento della discretizzazione sia spaziale che numerica, la quale può rappresentare, oltre un certo limite, solamente uno spreco di risorse (Zhao *et al.*, 2019). Sempre nell'ottica di mantenere il massimo controllo sulle varie incertezze legate ai modelli numerici si è scelto di eseguire un'analisi di sensibilità, sempre consigliata rispetto ai parametri di modellazione da assegnare dotati di maggiore incertezza (Andersson *et al.*, 2012). Qui essa è stata focalizzata sui parametri turbolenti generati all'ingresso dalla presenza della griglia. Visto che questi solitamente penetrano all'interno del dominio per un tratto ridotto, vista la maggior generazione di turbolenza per effetti di taglio (Andersson *et al.*, 2012), essi risultano di scarsa rilevanza. In generale, la maggior parte dell'attenzione va invece posta nelle zone prossime ai bordi dove si realizzano le variazioni più marcate.

Legata a tale considerazione è anche la tendenza dei pesci, osservata nel presente studio, a mantenersi nelle regioni prossime alle pareti, facilmente comprensibile dall'osservazione dei density plot relativi alle posizioni occupate sul piano riportati alle Figure 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7. Relativamente alla coordinata verticale, dall'analisi dei video registrati lateralmente, è stata osservata la stessa tendenza relativamente allo stazionamento sul fondo. Da essa è derivata l'assunzione, necessaria vista l'impossibilità della rete neurale di trattare tali sequenze, di assumere la collocazione degli individui sul fondo, operando una media della velocità dell'acqua sulla loro altezza. Questa considerazione rappresenta un importante limite dello studio condotto, vista l'impossibilità di quantificare tale aspetto. Essa, inoltre, si pone anche in contrasto con quanto osservato da Nikora et al. (2003), nei cui esperimenti gli esemplari si mantenevano in uno strato intermedio lontano sia dal fondo che dalla superficie libera. Tuttavia, è nota la capacità dei pesci di individuare le zone con corrente inferiore e sfruttarle per compiere meno fatica (Katopodis e Gervais, 2016) e un atteggiamento differente potrebbe anche essere dovuto a ragioni biologiche dipendenti dal diverso comportamento delle specie. Infatti, i pesci reofili, comprendenti il vairone, sono tipicamente nuotatori di fondo (Forneris, 1989). Inoltre, in letteratura sono riportati casi in cui il tracciamento laterale dei video in esperimenti simili ha evidenziato la permanenza degli individui in strati prossimi al fondo (Detert *et al.*, 2018).

Il tracciamento delle traiettorie interviene nella determinazione della velocità relativa sia attraverso la derivazione della velocità assoluta dell'individuo che nella determinazione della sua posizione e quindi della velocità dell'acqua presente. Inoltre, tale operazione combinante

l'identificazione delle parti d'interesse nei diversi fotogrammi e la rettificazione delle traiettorie attraverso filtraggio secondo Kalmann, comporta degli errori spesso amplificati dalla presenza di rumore dovuto ad oggetti riflessi, increspature e instabilità del flusso. La determinazione di traiettorie imprecise altera ovviamente la velocità assoluta individuata e, di conseguenza, quella relativa. Tuttavia, in un caso come quello in esame, dove si osservi la presenza degli individui nelle zone accompagnate dalle variazioni di velocità più marcate, la determinazione di una posizione anche solo leggermente diversa può far variare notevolmente la velocità attribuita all'acqua e quindi quella relativa. Tale situazione, invece, non si verifica qualora il pesce si mantenga in zone più distanti dalle pareti, dove gli andamenti sono scarsamente variabili. Da queste considerazioni emerge l'importanza che il *tracking* degli individui ricopre all'interno di studi di questo tipo. Per questi motivi e per le potenzialità comunque mostrate da tali procedure nell'ambito di una caratterizzazione più precisa dei comportamenti delle specie ittiche, diverse tecnologie come l'uso di tecniche fotogrammetriche o di traccianti per render più evidenti gli individui sono in corso di sviluppo e rappresentano uno dei campi di novità nella valutazione delle capacità natatorie.

Anche per via di queste incertezze sulle traiettorie, l'analisi delle stesse per ottenere la velocità assoluta, e quindi quella relativa dal legame con il campo di moto, è stata condotta secondo i tre passi temporali di derivazione espressi al paragrafo 4.3. In ogni caso e per tutti gli individui si sono osservate serie temporali della velocità assoluta e quindi di quella relativa costellate di oscillazioni, come esemplificato dalle Figure 4.8 e 4.9. In particolare, in quest'ultima si osserva come la velocità relativa sia alternativamente maggiore e minore di quella dell'acqua a testimoniare il susseguirsi di fasi di nuoto contro corrente e altre di trascinamento ad opera della stessa. Tali considerazioni suggeriscono l'idea dell'adozione da parte degli individui dell'andatura nota come *burst-and-coast*, tramite la quale si alterna l'uso di fibre veloci glicolitiche con quello di muscoli ossidativi lenti (Nikora *et al.*, 2003). La presenza di una tale andatura tipica di situazioni di regimi di moto ad alta velocità fissata e pari alla media sezionale, negli esperimenti di tale tipologia (Nikora *et al.*, 2003).

Per svolgere un confronto tra questa e la velocità relativa tenuta dal pesce si è rappresentata quest'ultima attraverso la sua media lungo la traiettoria, la quale è risultata decisamente inferiore a \overline{U} . Ciò è dovuto primariamente alla tendenza degli individui ad occupare le zone laterali aventi velocità inferiore. In secondo luogo rientra la tendenza, particolarmente evidente nei casi relativi alla condizione D, di perdere progressivamente posizione durante il nuoto per subire una velocità minore. Infatti, il confronto con la media lungo la traiettoria della velocità

dell'acqua ha evidenziato una maggiore corrispondenza. Nella maggior parte dei casi, comunque, si nota come la velocità relativa media sia inferiore anche a tale valore, per via della fase finale di nuoto tipicamente caratterizzata da un trascinamento dell'individuo affaticato verso la griglia di valle. Il confronto qui eseguito mostra, quindi, una differenza significativa tra la velocità relativa media e quella sezionale solitamente usata come riferimento. Ciò contrasta con quanto trovato da Nikora et al. (2003), dove si era osservata un'elevata similarità tra i due parametri. Tale differenza sembra attribuibile soprattutto alla differenza di posizioni occupate dagli individui, che nella medesima analisi si mantenevano in posizione mediamente centrale. Infatti, qui si hanno velocità simili a quella media mentre lungo i bordi queste sono minori. Come si è detto, inoltre, la corrispondenza tra velocità relativa e dell'acqua mediate lungo la traiettoria è alta ed è quindi maggiormente la posizione occupata che determina la velocità mantenuta. Emerge quindi che in alcuni casi, come quello in esame, riferirsi alla velocità media sezionale comporti, in generale, una sovrastima delle capacità natatorie. Oltre a ciò, l'intuizione suggerisce che, in caso di permanenza vicino a delle pareti, il campo di moto possa essere maggiormente influenzato dalla presenza dell'individuo, rispetto a quando questo si mantiene al centro del flusso, e che possano servire analisi che tengano conto della stessa.

Individuata, per il presente studio, la significatività della velocità relativa come parametro descrittivo si è proseguito nella descrizione delle *performance* natatorie e nel confronto delle stesse con considerazioni teoriche ad essa riferite. In particolare, l'ipotesi d'indipendenza dell'energia spesa dalla velocità mantenuta è emersa come verosimile, vista la bassissima correlazione lineare riscontrata. Al contempo, però, è stata osservata una grande variabilità di risultati. Essa può essere legata primariamente alle differenze prestative che individui analoghi possono comunque manifestare ma i risultati riscontrati possono essere stati influenzati anche da aspetti comportamentali. Inoltre, vale la pena sottolineare come le considerazioni teoriche utilizzate nel calcolo degli integrali relazionati all'energia siano riferite ad un moto stazionario del pesce. Come detto, tale situazione sembra lontana da quanto osservato nella presente analisi, viste le numerose oscillazioni di velocità relativa diffusamente osservate. La valutazione di tali aspetti secondo espressioni legate alla legge di Morison, in grado di tenere conto di questa peculiarità probabilmente legata ad un'andatura di *burst-and-coast*, potrebbe consentire una valutazione più accurata di quest'ipotesi ed evidenziare ulteriori risultati d'interesse.

Tali aspetti si presentano anche nella valutazione del coefficiente di ragguaglio in grado di relazionare l'effettivo valore dell'integrale al prodotto tra il tempo di fatica e la corretta potenza della velocità relativa media. Infatti, i diversi valori riscontrati sembrano legati alle differenti caratteristiche delle oscillazioni di velocità nei vari esperimenti. Un'indagine su tale legame e

sulla distribuzione dei valori di *C* potrebbe portare ad ottenere uno strumento efficace di semplificazione delle valutazioni legate all'energia e a comprendere meglio la relazione tra T_f e $\langle W_{rel} \rangle$.

Infatti, queste variabili presentano una relaziona diretta solamente in presenza di un valore costante di tale coefficiente. L'elevata variabilità presente nella distribuzione dei risultati relativi a tale legame potrebbe quindi essere influenzata anche da questo aspetto. Al contempo, sia questo che la scarsa corrispondenza con il relativo andamento teorico ipotizzato potrebbero essere dovuti anche all'influenza di aspetti comportamentali. Tra questi vi è la differenza di atteggiamento nelle fasi di ambientamento alla canaletta e di transizione verso la condizione sperimentale, durante le quali i pesci possono risultare piò o meno attivi in particolare rispetto all'esecuzione di scatti per fuggire dalla situazione di pericolo percepita. Inoltre, si è osservata la tendenza degli individui testati alle velocità maggiori a rinunciare a contrastare la corrente fronteggiata in maniera diversa anche a seconda della posizione, centrale o laterale, occupata al momento dell'inizio del test e quindi della velocità osservata. Tali tendenze del pesce a interrompere la nuotata in maniera preventiva rispetto all'esaurimento effettivo delle energie, vanno considerate nel definire le capacità natatorie dei pesci (Katopodis e Gervais, 2016) anche se l'effettivo passaggio attraverso flussi come quelli delle scale di risalita è effettivamente legato anche a decisioni comportamentali che vanno tenute in conto nella progettazione e delle quali sarebbe bene aumentare la comprensione. Similmente, i criteri individuati per la definizione del raggiungimento dello stato di fatica, del quale vi sono diversi esempi in letteratura, consentendo possibilità differenti di recupero, rendono difficile un'interpretazione univoca dei risultati (Katopodis e Gervais, 2016). Per i motivi ora esposti, l'andamento teorico indagato sembra comunque verosimile, anche se una valutazione più precisa sembra necessitare di un campione più ampio in grado di smorzare l'effetto di possibili outliers. Dal confronto con l'analoga procedura svolta in funzione di \overline{U} e $\langle W_a \rangle$ viene evidenziata ulteriormente la differenza che può emergere nella descrizione delle capacità natatorie a seconda del tipo di velocità considerata.

Infine, lungo tutta l'analisi sembra emergere una differenza legata al passo temporale di calcolo della derivata. Vista la possibile rumorosità delle traiettorie, infatti, è stata presa in considerazione un'analisi di sensibilità a tale parametro. Tuttavia le oscillazioni riscontrate con i due passi minori sono risultate simili e apparse coerenti con il moto degli individui. Al contempo, sembra che con il passo di 1/5 s, oscillazioni di velocità significative vengano smorzate eccessivamente, forse per via dell'adozione di una frequenza dei dati utilizzati troppo

simile a quella adottata nel moto ondulatorio della coda da parte della specie in esame, vista la lunghezza degli esemplari e le velocità in gioco. Per via di questa differenza nelle serie temporali della velocità relativa, i dati rappresentati e i conseguenti andamenti mostrano una sensibile differenza tra questo caso e gli altri. Come detto, la presenza di queste oscillazioni sembra suggerire l'adozione di un'andatura *burst-and-coast* utilizzata dagli esemplari per ridurre il dispendio energetico (Li *et al.*, 2021). Tale aspetto potrebbe anche spiegare alcune peculiarità osservate nell'analisi in esame, anche se relativamente ad esso vi è ancora scarsità di dati sperimentali e studi relativi (Li *et al.*, 2021).

Vista anche l'importanza dell'argomento oggetto della tesi illustrata nella moderna gestione delle risorse naturali, le considerazioni ora riportate sembrano richiedere ulteriori approfondimenti. In particolare, i due ambiti usati per l'ottenimento della velocità relativa presentano diverse possibilità di sviluppo, dato che il rapporto tra costo e accuratezza delle simulazioni CFD sta calando e che diverse tecnologie d'identificazione delle immagini sono in fase di sviluppo. Come espresso da diversi autori, inoltre, la mancanza di procedure e protocolli comuni pone difficoltà nella comprensione dei risultati derivanti da studi differenti. Una standardizzazione delle metodologie e un maggior controllo sulle condizioni sperimentali consentirebbero di ottenere indicazioni più significative e confrontabili. Similmente, appare necessario condurre studi su campioni di dimensioni notevoli in modo da limitare l'intrinseca eterogeneità legata agli aspetti valutati. Al contempo, l'esecuzione di indagini trasversali su specie ittiche con caratteristiche diverse potrebbe portare all'identificazione di aspetti comuni e peculiarità utili per la progettazione. Inoltre, approfondimenti relativi all'andatura di burstand-coast e alle implicazioni della stessa sulle capacità natatorie dimostrate, possibili per via delle sempre maggiori conoscenze e risorse tecnologiche, ne fanno un ambito di crescente importanza. Allo stesso modo, sembra necessaria l'integrazione delle attuali analisi empiriche con nuove considerazioni teoriche utili come confronto e spunto di riflessione.

Bibliografia e sitografia

Andersson B., Andersson R., Håkansson L., Mortensen M., Sudiyo R., van Wachem B., Hellström L., Computational Fluid Dynamics for Engineers, Cambridge University Press, Cambridge (2012) [ISBN 978-1-107-01895-2] doi.org/10.1017/CBO9781139093590

ANSYS Inc., Ansys Fluent Theory Guide, Release 2022 R2 (2022a)

ANSYS Inc., Ansys Fluent User's Guide, Release 2022 R2 (2022b)

- Beamish, F.W.H., Swimming capacity, in *Fish Physiology*, Vol. VII, Academic Press, New York, Chapter 2, p.101-187 (1978) [ISBN 9780123504074]
- Belletti B., Garcia de Leaniz C., Jones J. *et al.*, More than one million barriers fragment Europe's rivers, *Nature*, 588, p.436-441 (2020) doi.org/10.1038/s41586-020-3005-2
- Brett J.R., The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon, Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 21, p.1183-1226 (1964)
- Detert M., Schütz C. e Czerny R., Development and Tests of a 3D Fish-Tracking Videometry System for an Experimental Flume, E3S Web of Conferences, 40, 03018, (2018) doi.org/10.1051/e3sconf/20184003018
- FAO, Code of Conduct for Responsible Fisheries, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 41 p. (1995) [ISBN 9251038345]
- Forneris G., *Piemonte: Ambienti acquatici e ittiofauna*, Regione Piemonte, Edizioni EDA, Torino (1989)
- Grill G., Lehner B., Thieme M. *et al.*, Mapping the world's free-flowing rivers, *Nature*, 569, p.215-221 (2019) doi.org/10.1038/s41586-019-1111-9
- Katopodis C. e Gervais R., Fish swimming performance database and analyses, DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2016/002, vi + 550 p. (2016)
- Knight D.W., Wright N.G. e Morvan H.P., Guideline for applying commercial CFD software to open channel flow based on the research work conducted under EPSCR Grants GR/R43716/01 and GR/R43723/01: Modelling of open channel flow to illustrate the effects of channel shape and heterogeneus roughness (2005) nottingham.ac.uk/cfd/ocf/guidelines.pdf

- Li G., Ashraf I., François B., Kolomenskiy D., Lechenault F., Godoy-Diana R. e Thiria B., Burst-and-coast swimmers optimize gait by adapting unique intrinsic cycle, *Communications Biology*, 4, 40 (2021) doi.org/10.1038/s42003-020-01521-z
- Marchetto F., Zaccara S., Muenzel F.M. *et al.*, Phylogeography of the Italian vairone (*Telestes muticellus*, Bonaparte 1837) inferred by microsatellite markers: evolutionary history of a freshwater fish species with a restricted and fragmented distribution, *BMC Ecology and Evolution*, 10, p.111 (2010) doi.org/10.1186/1471-2148-10-111
- Nikora V.I., Aberle J., Biggs B.J.F., Jowett I.G. e Sykes J.R.E., Effects of fish size, time-tofatigue and turbulence on swimming performance: a case study of Galaxias maculatus, *Journal of Fish Biology*, 63, p. 1365-1382 (2003) doi.org/10.1111/j.1095-8649.2003.00241.x
- Pini Prato E., Gianaroli M. e Comoglio C., Linee guida per il corretto approccio metodologico alla progettazione dei passaggi per pesci – Il caso-studio del medio corso del Panaro, Provincia di Modena (2006)
- Sadrehaghighi I., Mesh Sensitivity & Mesh Independence Study, CFD Open Series, Annapolis (2021)

doi.org/10.13140/RG.2.2.34847.51365/2

- Santos H.A., Pompeu P.S., Vicentini G.S. and Martinez C.B., Swimming performance of the freshwater neotropical fish: *Pimodelus maculatus* Lacèpede,1803, *Braz. J. Biol.*, 68(2), p.433-439 (2008)
- Videler J.J., Fish swimming, Chapman & Hall, London (1993) [ISBN 0412408600]
- Zhao D., Han N., Goh E., Cater J., Reinecke A., 3D-printed miniature Savonious wind harvester, in *Wind Turbines and Aerodynamics Energy Harvesters*, Academic Press, Elsevier, Chapter 2, p.21-165 (2019) [ISBN 9780128171356] doi.org/10.1016/B978-0-12-817135-6.00002-8

colapisci.it fluidmechanics101.com ispra.gov.it iucn.org