

POLITECNICO DI TORINO

*Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio*



Tesi di Laurea Magistrale

Correnti secondarie e corridoi migratori delle anguille nei fiumi

Relatore:

Prof. Costantino Manes

Correlatore:

Prof. Paolo Vezza

Candidato:

Lorenzo Capovilla

Marzo 2021



Indice:

1. Introduzione	2
1.1 Presentazione dell'oggetto di studio, indagine ed analisi.....	2
1.2 Obbiettivi e finalità dello studio.....	3
2. Raccolta, analisi e revisione dei dati utili in letteratura	5
2.1 Response of seaward-migrating European eel (<i>Anguilla anguilla</i>) to manipulated flow fields (Piper et.al, 2015)	5
2.2 Numerical Investigation into Secondary Currents and Wall Shear in Trapezoidal Channels (Hargreaves et al., 2011)	11
2.3 Influence of shallowness, bank inclination and bank roughness on the variability of flow patterns and boundary shear stress due to secondary currents in straight open-channels (Blanckaert et al., 2010)	14
2.4 Numerical simulations of cellular secondary currents and suspended sediment transport in open-channel flows over smooth-rough bed strips (Sung-UK Choi et al., 2010)	19
3. Criteri modellistici e metodi computazionali	22
3.1 Il modello degli stress di Reynolds: RSM, Reynolds Stress Model.....	22
3.2 Riepilogo delle modalità di impostazione ed implementazione delle simulazioni numeriche in ambiente software ANSYS Fluent.....	26
4. Compendio, confronto e discussione dei risultati finali	31
5. Conclusioni	69
6. Bibliografia e Sitografia.....	71



1. Introduzione

1.1 Presentazione dell'oggetto di studio, indagine ed analisi

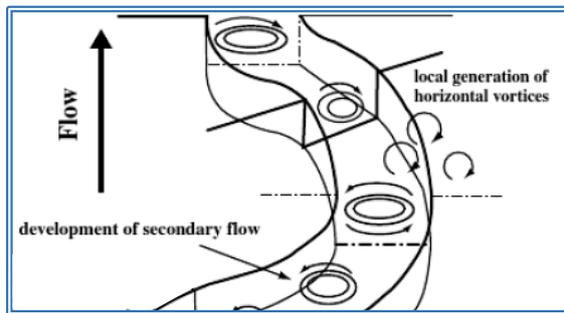
La presente tesi tratta lo studio e l'approfondimento delle correnti secondarie di secondo tipo all'interno dei canali aperti a pelo libero. L'interesse e la volontà di investigarne la natura e gli eventuali effetti idrodinamici nasce in particolare con l'intento di verificarne e valutarne l'ipotetico ruolo giocato nella definizione dei percorsi migratori verso valle delle anguille europee (*Anguilla anguilla*), basandosi sui risultati ottenuti e riassunti nel lavoro sperimentale di Piper et al. (2015). Grazie a tali risultati, è stata infatti osservata una tendenza condivisa da parte delle medesime anguille nel muoversi verso valle lungo due fasce areali piuttosto ristrette rispetto all'estensione dell'alveo di fondo dei corsi d'acqua, configurate come dei corridoi di passaggio ad una certa distanza dalle sponde nel caso di canali rettilinei. La descrizione di tali corridoi migratori viene illustrata graficamente e più dettagliatamente nei capitoli seguenti. L'analisi della configurazione associata alle correnti secondarie avviene per mezzo di simulazioni numeriche ed attraverso l'implementazione di adeguato modello fluidodinamico su software commerciale denominato ANSYS Fluent. In generale, le correnti secondarie si sono rivelate, soprattutto nel corso dell'ultimo secolo, un interessante oggetto di ricerca sia teorica che sperimentale per diverse applicazioni in campo ingegneristico. La loro comprensione e giustificazione risulta ad oggi tutt'altro che completa ed esaustiva ma la presenza e l'importanza funzionale che le caratterizza è stata riconosciuta diffusamente, in particolar modo in relazione ai fenomeni di movimentazione dei sedimenti sospesi e di trasporto solido, di alterazione morfologica degli ambienti fluviali, di miscelazione delle componenti disciolte in acqua nonché di erosione e di modifica delle condizioni di stabilità spondale. Assumendo una prospettiva di tipo multidisciplinare inoltre, gli effetti ed i caratteri idrodinamici associati alle correnti secondarie sono in grado di fornire un utile indizio per quanto concerne i processi di funzionamento degli ecosistemi, con la possibile valutazione integrata, come nel caso studio qui esposto ad esempio, delle possibili influenze sulla migrazione delle specie ittiche.

Le correnti secondarie vengono individuate ortogonalmente alla direzione principale di avanzamento del flusso idrico e presentano una configurazione tipicamente definita come "multicellulare", ovvero costituita da diverse "celle" accostate fra loro all'interno della sezione di attraversamento dell'acqua.

Possono essere storicamente classificate in due differenti tipologie fondamentali, secondo quanto proposto da Prandtl (1926), ovvero le Correnti secondarie del primo tipo e le Correnti secondarie del secondo tipo:

- Le correnti secondarie del primo tipo si manifestano come risultato dell'eterogeneità del moto medio, in funzione ad esempio delle curvature, come può accadere in corrispondenza dei meandri nei fiumi.
- Le correnti secondarie del secondo tipo nascono in virtù dell'anisotropia della turbolenza, indipendentemente dall'eventuale presenza di curvature e deviazioni nel percorso seguito dall'acqua.

Le correnti secondarie del secondo tipo presentano generalmente intensità minore rispetto alle correnti secondarie del primo tipo con conseguenti effetti idrodinamici meno evidenti ma comunque e non per questo affatto trascurabili o irrilevanti.



OLIXODIM JOLICZ

Fig. 1.1 – Correnti secondarie del primo tipo in canale curvilineo in funzione dell'eterogeneità del moto medio

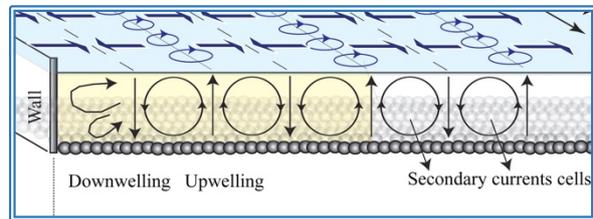


Fig. 1.2 – Correnti secondarie di secondo tipo in canale rettilineo in funzione dell'anisotropia turbolenta

La conoscenza e la comprensione delle strutture tipiche della turbolenza e della configurazione assunta dalle correnti secondarie di secondo tipo in particolar modo risulta ancora piuttosto primordiale e priva di risvolti consolidati. Le informazioni ricavabili dall'elaborazione delle equazioni fondamentali di Navier–Stokes risultano estrapolabili attraverso molteplici modalità, con interpretazione diversificata di tali correnti. Attraverso la media temporale di Reynolds delle equazioni di Navier–Stokes (RANS: Reynolds–Averaged–Navier–Stokes), la turbolenza risulta esprimibile mediante parametri che nascono dalle equazioni mediate del momento, dell'energia turbolenta e della vorticità. Alcuni esempi di questi parametri includono gli stress di Reynolds e le correlazioni tra velocità longitudinali e trasversali, in grado di fornire una buona prospettiva combinata per la valutazione incrociata della turbolenza e delle correnti secondarie di secondo tipo.

Per quanto riguarda la riproduzione delle medesime correnti tramite simulazioni numeriche, diversi modelli sono stati utilizzati, trasformando e semplificando in maniera opportuna le equazioni fondamentali di Navier–Stokes, cercando di ottenerne una soluzione di chiusura appropriata.

Gli approcci più diffusi comprendono le simulazioni numeriche dirette (DNS – Direct Numerical Simulations), le simulazioni riferite alle grandi strutture coerenti, o vortici, di natura turbolenta (LES – Large Eddy Simulations) e le simulazioni governate dal modello degli stress di Reynolds (RSM – Reynolds Stress Model).

1.2 Obiettivi e finalità dello studio

Gli obiettivi principali dell'attività di studio illustrata all'interno del presente lavoro di tesi possono essere riepilogati nei seguenti elementi argomentativi, tra loro correlati:

- Verifica della configurazione assunta dalle correnti secondarie del secondo tipo in uno spazio bidimensionale associato a sezioni geometriche con alveo più o meno regolare ed impostate a priori, attraverso il confronto grafico e numerico con i dati noti dalla letteratura scientifica in materia ed utili pertanto allo scopo.

- Analisi delle modalità attraverso cui risulta possibile procedere alla simulazione delle correnti secondarie del secondo tipo nel caso di canali aperti rettilinei a pelo libero mediante utilizzo del software commerciale ANSYS Fluent, in versione disponibile ed accessibile liberamente su supporto informatico, tramite ricorso integrato al modello degli stress di Reynolds (RSM – Reynolds Stress Model).
- Indagine e ricerca sulla possibile influenza idrodinamica delle correnti secondarie del secondo tipo nella definizione dei percorsi migratori seguiti dalle anguille europee durante il loro spostamento verso valle nei canali e nei corsi d'acqua, considerando a priori le condizioni sperimentali ed i risultati descritti nel lavoro scientifico di Piper et. al (2015).

L'utilità applicativa di uno studio mirato all'investigazione delle possibili interrelazioni tra la natura delle correnti secondarie ed i percorsi migratori delle anguille europee trova un riscontro significativo soprattutto in relazione all'importante diminuzione osservata nel corso degli ultimi anni della popolazione di questa specie ittica. L'anguilla europea risulta infatti ormai formalmente riconosciuta ed accertata come "specie in pericolo critico" in ottica di possibile estinzione (Critically Endangered – CR), secondo quanto riportato dall'Unione Internazionale per la Conservazione della Natura. Tra le cause principali della diminuzione nel numero degli esemplari vi è l'imposizione antropica di numerosi elementi ostacolanti lungo i corsi d'acqua ed i canali frequentati dalle anguille stesse, come ad esempio le dighe, le stazioni idroelettriche e le griglie per la ritenzione e la raccolta del materiale galleggiante e sommerso, causa di una crescente frammentazione delle reti fluviali. Da qui sorge pertanto la volontà e la necessità di comprenderne meglio la risposta comportamentale agli stimoli idrodinamici ed ambientali in generale che le circondano, al fine di poter ricercare, ed in stadi successivi progettare e adottare, valide soluzioni in grado di salvaguardarne la sopravvivenza, contestualizzandole nell'ambito di corretta gestione e di adeguato governo dei corsi d'acqua, sia naturali che artificiali.



Fig. 1.3 – Diversi esemplari adulti di anguilla europea deceduti dopo essere rimasti intrappolati in una griglia



Fig. 1.4 – Anguille europee rimaste vittima di incontro fatale con le turbine di una centrale idroelettrica



2. Raccolta, analisi e revisione dei dati utili in letteratura

Viene qui di seguito riportato il contenuto delle principali fonti di letteratura consultate ed analizzate in quanto ritenute particolarmente utili ai fini dello studio. Contestualmente, viene proposta una revisione sintetica e schematica d'insieme delle casistiche sperimentali e di simulazione numerica che si sono rivelate più significative e che sono state considerate e ripercorse attentamente in qualità di elemento per il confronto e la validazione dei risultati ottenuti.

2.1 Response of seaward-migrating European eel (*Anguilla anguilla*) to manipulated flow fields (Piper et.al, 2015)

Come già brevemente citato all'interno del precedente capitolo introduttivo, in qualità di primo e fondamentale riferimento utile di partenza ai fini della contestualizzazione delle simulazioni numeriche per lo studio delle correnti secondarie nella definizione dei percorsi migratori delle anguille europee, l'articolo scientifico che riassume il lavoro scientifico di Piper et al. (2015) è stato dettagliatamente consultato ed analizzato. Il medesimo articolo riassume e descrive una serie di risultati associati a molteplici misure sperimentali, volte all'investigazione ed alla miglior comprensione del comportamento, e più in generale delle attitudini di movimento, delle anguille europee nel corso del loro naturale spostamento migratorio verso valle all'interno dei corsi d'acqua.

Le misurazioni sono state registrate nei pressi di un sito appositamente scelto ed adattato come dominio di ricerca, in corrispondenza di un canale artificiale e di una struttura idroelettrica dismessa nei pressi della località di Longham, Inghilterra, lungo il percorso del fiume Stour. Il canale risulta caratterizzato da un andamento pressoché rettilineo e da una larghezza variabile, compresa tra i 17.0 m ed i 12.2 m, decrescente linearmente in ragione della direzione di avanzamento verso valle. L'acqua giunge presso la struttura idroelettrica dismessa attraverso una deviazione del flusso di circa 90° rispetto al tragitto originale, imponendo una nuova ampiezza trasversale di deflusso costante pari a circa 7.6 m e la presenza di una griglia di chiusura composta da diverse sbarre metalliche inclinate.

La portata è stata mantenuta costante durante lo svolgimento delle prove sperimentali grazie all'installazione, ad una distanza di circa 5 m a valle della griglia di chiusura appena sopra citata di alcune paratoie a saracinesca, in grado di consentirne per l'appunto un controllo continuato, con un valore di riferimento impostato a $6.28 \pm 0.2 \text{ m}^3/\text{s}$. Anche le fluttuazioni naturali del livello idrico sono state opportunamente controllate ed attenuate quando necessario attraverso il posizionamento di uno stramazzo radiale appena a monte della porzione di ingresso dell'acqua nel canale adottato come sito di studio.

La conformazione dell'alveo di fondo del canale è stata contestualmente ricavata ed esaminata preventivamente in qualità di elemento utile integrativo ai fini dell'investigazione sperimentale mediante alcuni rilievi batimetrici eseguiti con un Doppler acustico in corrispondenza di otto transetti adottati come sezioni geometriche di riferimento.



Fig. 2.1 – Individuazione, tramite rappresentazione planimetrica, della porzione di canale, scelta come sito per l'esecuzione delle prove riassunte nel lavoro di Piper et al. (2015), nei pressi di Longham, Inghilterra.

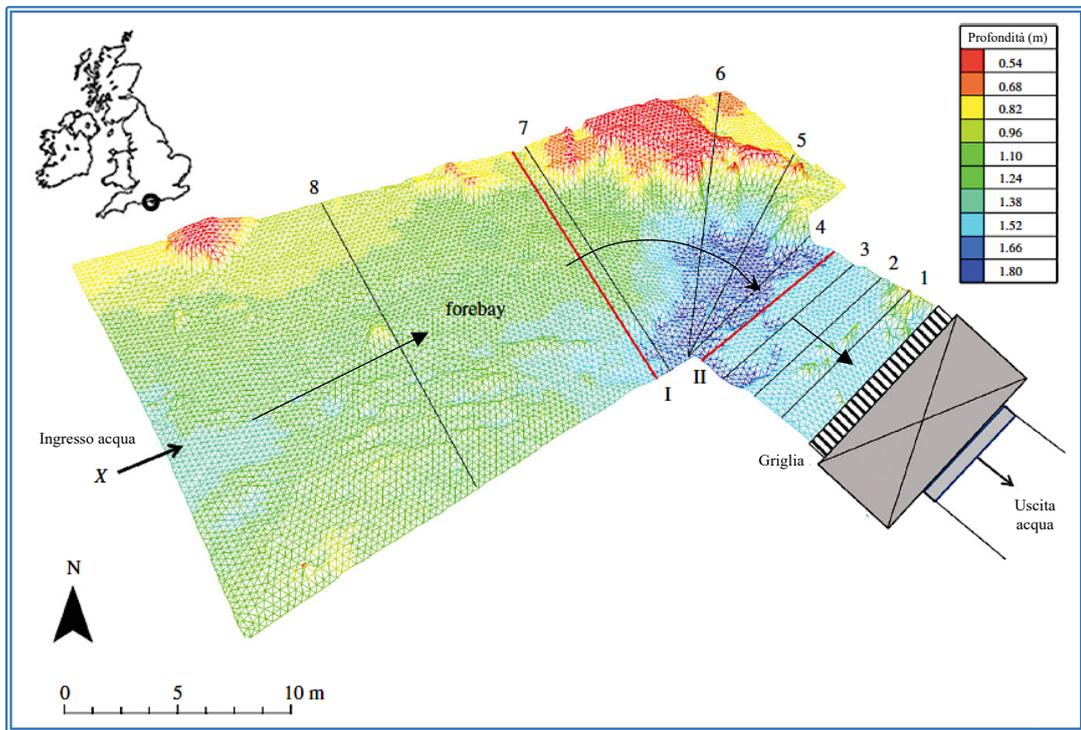


Fig. 2.2 – Riproduzione della geometria associata all'alveo di fondo del canale adibito a sito di indagine per le prove di Piper et al. (2015), in funzione della posizione degli otto transesti impostati come sezioni di riferimento

Le velocità caratterizzanti il regime idrodinamico del flusso d'acqua all'interno del canale sono state inoltre monitorate e quantificate utilizzando lo stesso strumento appena sopra menzionato e sfruttato nell'ambito dell'ispezione batimetrica dell'alveo di fondo.

I dati di misura ricavati sono stati in seguito opportunamente calibrati ed elaborati, ai fini di compensarne la limitata risoluzione spaziale e il ridotto livello di accuratezza, nell'ambito di un apposito modello virtuale bidimensionale sviluppato per il computo fluidodinamico integrato (TELEMAC-2D), assumendo idealmente impermeabili le pareti di confine laterali. Tale iter di correzione e messa a punto in ambiente modellistico ha consentito un'attenta ed adeguata valutazione dei gradienti numerici associati alle variabili idrodinamiche rappresentate da velocità e accelerazione all'interno del flusso.

Ai fini degli obiettivi e degli intenti propri del lavoro di ricerca, sono stati riprodotti due diversi scenari idrodinamici di riferimento, in modo da poter contestualizzare, analizzare ed infine classificare adeguatamente il responso attitudinale di movimento delle anguille durante il loro spostamento migratorio naturale verso valle:

1) UL (Unrestricted flow with Low water acceleration) – Scenario 1

Condizione di flusso idrico relativamente uniforme sull'intera larghezza della porzione di canale che guida l'acqua attraverso la griglia di chiusura, libera da qualsiasi tipologia di ostruzione.

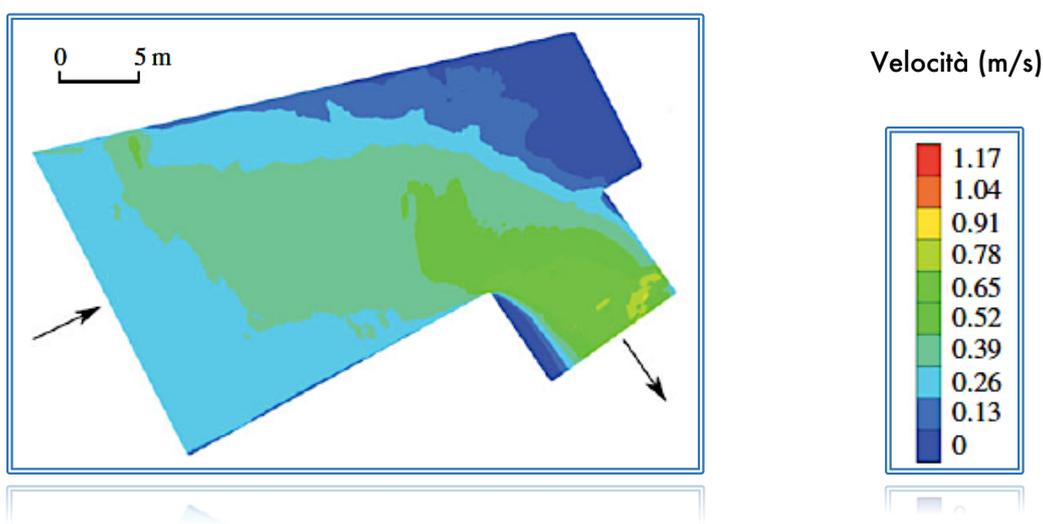


Fig. 2.3 – Rappresentazione tematica del campo di moto associato alla variabile velocità, ottenuta attraverso impiego del modello per il computo fluidodinamico integrato, scenario UL – Piper et al., 2015

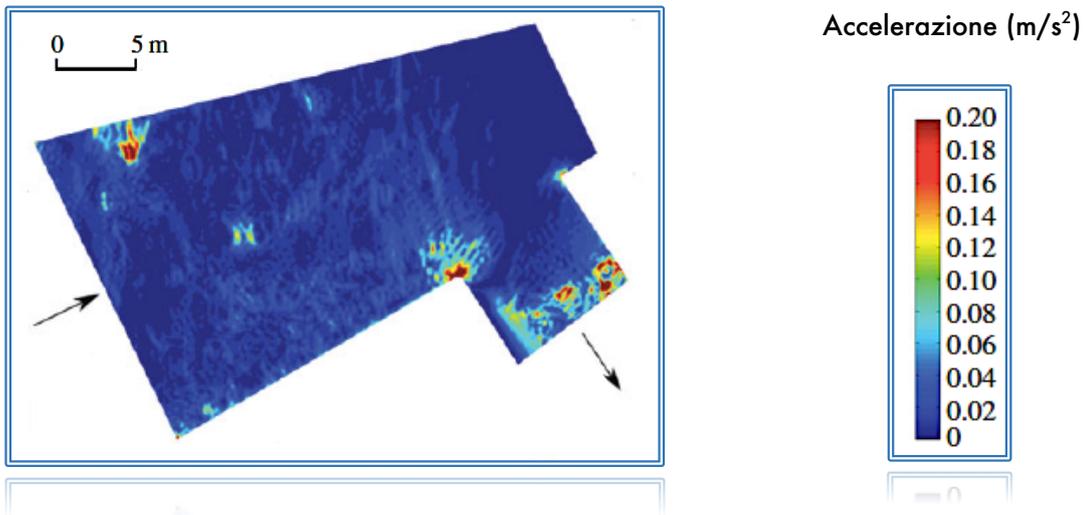


Fig. 2.4 – Rappresentazione tematica del campo di moto associato alla variabile accelerazione, ottenuta attraverso impiego del modello per il computo fluidodinamico integrato, scenario UL – Piper et al., 2015

2) CH (Constricted flow with High acceleration) – Scenario 2

Condizione di flusso ristretto e limitato in virtù dell'installazione di alcune tavole in legno disposte lungo in corrispondenza della griglia di chiusura, con un conseguente effetto di ostruzione, in termini di area propria della sezione utile al passaggio della portata, pari al 66% circa.

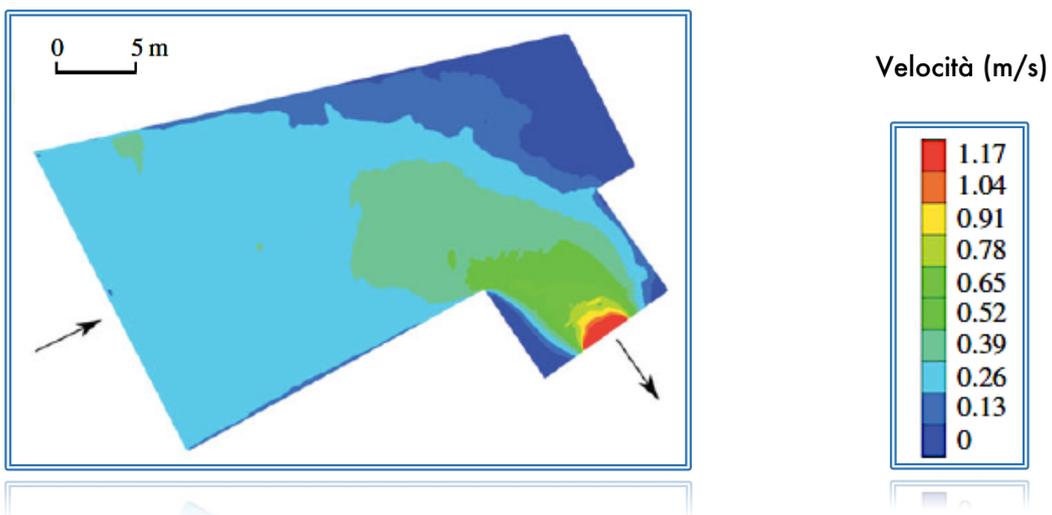


Fig. 2.5 – Rappresentazione tematica del campo di moto associato alla variabile velocità, ottenuta attraverso impiego del modello per il computo fluidodinamico integrato, scenario CH – Piper et al., 2015

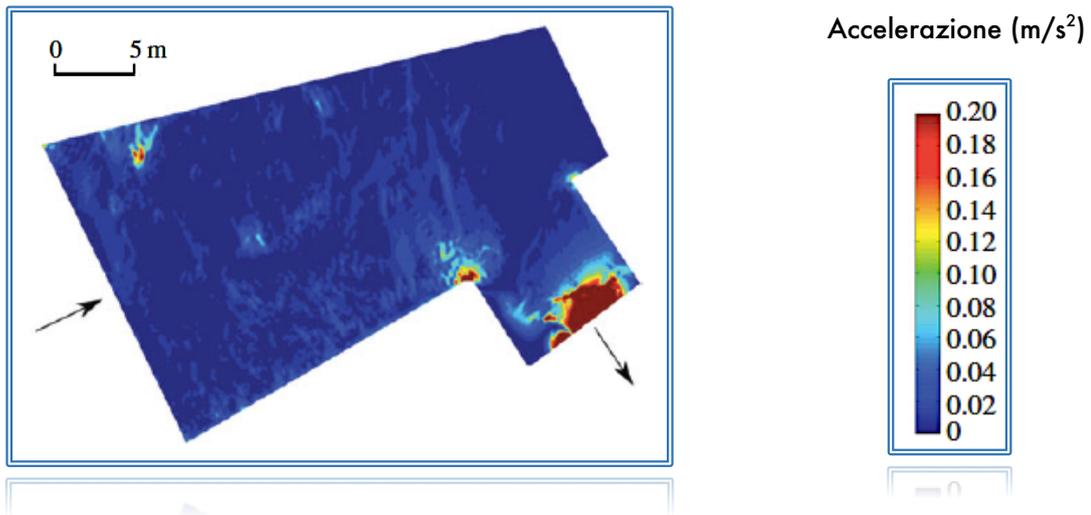


Fig. 2.6 – Rappresentazione tematica del campo di moto associato alla variabile accelerazione, ottenuta attraverso impiego del modello per il computo fluidodinamico integrato, scenario CH – Piper et al., 2015

All'interno degli scenari idrodinamici di riferimento appena sopra descritti, i movimenti manifestati da parte di quaranta esemplari di anguilla europea sono stati monitorati e analizzati con l'impiego della telemetria acustica e passiva a transponder integrato (PIT). In particolare, gli spostamenti sono stati registrati attraverso l'utilizzo di otto idrofoni, appositamente installati lungo il perimetro del sito sperimentale e comunicanti con un unico ricevitore dei segnali acustici. Vista la dimensione ridotta del battente idraulico nel canale sede delle prove sperimentali, e la conseguente difficoltà di una stima accurata ed affidabile dei movimenti delle anguille in direzione perpendicolare all'alveo di fondo per mezzo dei soli idrofoni, la telemetria passiva con utilizzo di transponder integrati (PIT) è stata congiuntamente sfruttata. La profondità di nuoto delle anguille è stata così valutata per mezzo dell'installazione di due stazioni fungenti da antenna ed occupanti l'intera larghezza di due sezioni del corso d'acqua (I e II, Fig. 2.2).

Una volta prelevati, classificati ed opportunamente preparati per le sessioni sperimentali, tramite acclimatazione ed installazione chirurgica di dispositivi appositi atti a dialogare con i sistemi di telemetria acustica e passiva, i pesci sono stati quindi rilasciati in corrispondenza di un punto al centro del canale a monte della porzione sfruttata ai fini dello studio. La preparazione preventiva degli esemplari e le procedure di rilascio in acqua sono state svolte in modo tale da minimizzare il più possibile qualsiasi tipo di condizionamento in grado di alterarne il responso comportamentale.

L'insieme dei risultati sperimentali ha evidenziato una tendenza comune da parte delle anguille nel migrare verso valle seguendo una serie di traiettorie raggruppabili in due fasce ben distinguibili e definite in prossimità delle sponde laterali, configurate come dei corridoi di nuoto nella porzione rettilinea più a monte del canale adottato come dominio di ricerca. Tale tendenza, è stata riscontrata similmente per entrambi gli scenari idrodinamici di interesse, UL (Unrestricted flow with Low water acceleration) e CH (Constricted flow with High acceleration). I percorsi di nuoto sono stati contestualmente sovrapposti alle linee di flusso in modo tale da poterne operare un confronto diretto, qui di seguito illustrato graficamente.

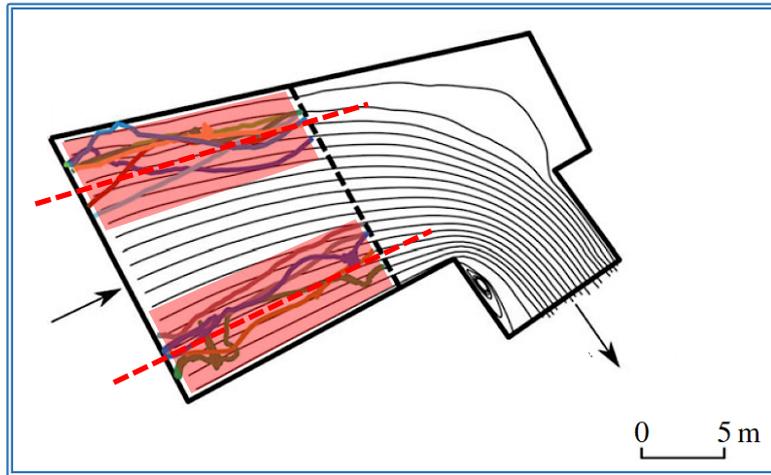


Fig. 2.7 – Rappresentazione delle traiettorie di migrazione verso valle seguite dagli esemplari di anguilla nel corso delle prove sperimentali all'interno del canale adottato come sito di ricerca (Scenario UL) – Piper et al., 2015

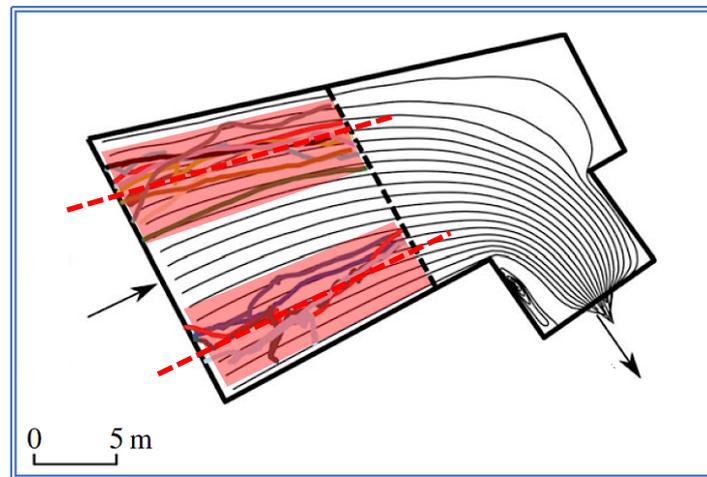


Fig. 2.7 – Rappresentazione delle traiettorie di migrazione verso valle seguite dagli esemplari di anguilla nel corso delle prove sperimentali all'interno del canale adottato come sito di ricerca (Scenario UL) – Piper et al., 2015

La profondità di avanzamento della quasi totalità degli esemplari è risultata compresa entro gli ultimi 20 cm di battente idraulico, in vicinanza dell'alveo di fondo. È stato osservato piuttosto sorprendentemente come le diverse traiettorie che descrivono lo spostamento migratorio verso valle evidenzino molto raramente il contatto diretto delle anguille con le sponde laterali.

La collocazione delle medesime traiettorie all'interno di due corridoi virtualmente individuati in prossimità delle stesse sponde laterali, tendenzialmente in direzione parallela alle linee di flusso, suggerisce una certa capacità di individuazione da parte di questi pesci degli input idrodinamici associati al campo di moto e alla morfologia d'alveo che li circonda. Tuttavia, vista la configurazione delle linee di flusso molto simile sia al centro che sulle porzioni laterali del canale e vista l'assenza di un modello idrodinamico tridimensionale congiunto in grado di fornire informazioni più dettagliate, non è stato possibile identificare precisamente quali particolari peculiarità legate al moto dell'acqua abbiano condotto le anguille a seguire dei tragitti migratori preferenziali lungo due corridoi vicini alle sponde.

2.2 Numerical Investigation into Secondary Currents and Wall Shear in Trapezoidal Channels (Hargreaves et al., 2011)

Ai fini della corretta esecuzione ed interpretazione delle simulazioni numeriche per la riproduzione delle correnti secondarie all'interno dell'ambiente virtuale fornito dal software ANSYS Fluent, l'insieme dei casi studio presentati nell'articolo scientifico di Hargreaves et al. (2011): Numerical Investigation into Secondary Currents and Wall Shear in Trapezoidal Channels, è stato esaminato ed in parte riprodotto. Questo procedimento ha consentito la creazione di una base di riferimento utile per valutare inizialmente l'efficacia e la validità dei criteri computazionali adottati.

L'articolo in questione propone nello specifico una discussione riepilogativa degli esiti inerenti ad una lunga serie di simulazioni numeriche implementate sfruttando il modello degli stress di Reynolds (RSM: Reynolds Stress Model) all'interno del software informatico ANSYS CFX. Le medesime simulazioni sono state svolte ed organizzate ipotizzando diverse sezioni geometriche di forma regolare, rettangolare e trapezoidale, rappresentative della condizione di deflusso dell'acqua in canali idealmente rettilinei ed a pelo libero. L'analisi critica si è concentrata sulla valutazione delle entità e delle modalità attraverso cui gli sforzi di taglio si generano e si distribuiscono sulle pareti di sponda laterali e sull'alveo di fondo, coerentemente al manifestarsi della struttura tipicamente multicellulare associata alle correnti secondarie di secondo tipo.

Il modello computazionale degli stress di Reynolds (RSM: Reynolds Stress Model), ottenuto a partire dalle equazioni di Navier-Stokes mediate (RANS: Reynolds-Averaged-Navier-Stokes), è stato sfruttato tenendo conto degli effetti dell'anisotropia turbolenta per mezzo della soluzione computazionale proposta da Speziale, Sarkar e Gatski (SSG-1991), la quale prevede l'ipotesi di una relazione matematica di natura quadratica per tener conto della redistribuzione della pressione. Tutte le simulazioni sono state eseguite impostando un regime uniforme stazionario ed un vincolo di periodicità in relazione al transito della portata, di valore costante, attraverso le sezioni geometriche precedentemente menzionate, disposte perpendicolarmente rispetto alla direzione di avanzamento principale del flusso verso valle. La superficie corrispondente al pelo libero è stata considerata fissa e parallela all'alveo di fondo con imposizione di una condizione di simmetria semplice al contorno. La discretizzazione spaziale delle diverse sezioni ai fini dell'investigazione modellistica è stata inoltre opportunamente svolta attraverso una suddivisione delle stesse in elementi esaedrici di dimensione costante in grado di garantire valori adeguati della variabile adimensionale y^+ alle pareti laterali ed all'alveo di fondo, ed allo stesso tempo una corretta stabilità numerica dei risultati relativi alle velocità medie ed agli sforzi di taglio.

I risultati finali sono stati ricavati utilizzando una procedura computazionale guidata di tipo sequenziale ed iterativo, inizializzata tramite la scelta di un cosiddetto "parametro d'accelerazione" pari a 0.1 s. Tutti gli scarti numerici associati alle variabili incognite calcolate dal modello fluidodinamico sono stati infine considerati accettabili per un ordine massimo di grandezza di $1 \cdot 10^{-9}$.

Con l'intento di evidenziare le possibili differenze nei risultati finali stessi, le sessioni di simulazione numerica sono state implementate variando l'angolo di inclinazione θ delle pareti di sponda laterale rispetto alla direzione della verticale, perpendicolare all'alveo di fondo ($0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ$ e 60°), la rugosità k_{sb} uniformemente distribuita sul medesimo alveo (0.0015, 0.1, 0.2 e 0.4 mm) ed il formato geometrico b/h definito dal

rapporto tra la larghezza b e l'altezza h delle sezioni esaminate (2, 4, 8, 12, 18, 24, 36, 48). La rugosità distribuita sempre uniformemente sulle pareti laterali è stata assunta costante e pari a 0.0015 mm per tutte le casistiche di studio, similmente all'altezza del battente idraulico, corrispondente all'altezza h delle sezioni, la quale è stata mantenuta fissa con un valore di 50 mm. La condizione di periodicità della portata è stata garantita impostando un'unica fase materiale di natura liquida, rappresentata dall'acqua ($\rho=997 \text{ kg/m}^3$), pareti di sponda ed alveo completamente impermeabili, immobili ed antiscivolo e pendenza del fondale verso valle S costante ed uguale a 0.001 m/m.

I dati analitici e gli esiti numerici conclusivi al termine delle elaborazioni computazionali hanno evidenziato e confermato l'efficacia di impiego del modello fluidodinamico adottato per mezzo dell'analisi della conservazione del momento, in virtù della specifica condizione idraulica di moto uniforme. A tal proposito sono stati esplicitati in particolare gli sforzi medi di taglio agenti rispettivamente su ciascuna delle pareti laterali e sull'alveo di fondo.

Tab. 2.1 – Riepilogo dei dati delle simulazioni numeriche del lavoro di Hargreaves et al., 2011, relativi alla verifica di conservazione del momento con i valori medi degli sforzi di taglio calcolati sulle pareti laterali, $\bar{\tau}_w$, average, e sull'alveo di fondo, $\bar{\tau}_b$, average nel caso di inclinazione delle pareti, rapporto di forma b/h e rugosità variabili

Slant angle (Degrees)	Aspect ratio (b/h)	Bed roughness (mm)	$\bar{\tau}_b$ (Pa)	$\bar{\tau}_w$ (Pa)	$b\bar{\tau}_b$ (N/m)	$2h\bar{\tau}_w$ (N/m)	$b\bar{\tau}_b + 2h\bar{\tau}_w$ (N/m)	ρgSA (N/m)	Difference ^a (%)
20	2	0.0015	0.279	0.280	0.028	0.030	0.058	0.058	0.29
20	4	0.0015	0.353	0.337	0.071	0.036	0.106	0.107	0.21
20	8	0.0015	0.414	0.362	0.166	0.039	0.204	0.205	0.15
20	12	0.0015	0.438	0.365	0.263	0.039	0.302	0.302	0.14
20	18	0.0015	0.455	0.365	0.410	0.039	0.449	0.449	0.11
20	24	0.0015	0.464	0.366	0.556	0.039	0.595	0.596	0.1
20	36	0.0015	0.472	0.366	0.849	0.039	0.888	0.889	0.09
20	48	0.0015	0.476	0.489	1.143	0.052	1.195	1.183	1.02
45	18	0.2	0.466	0.317	0.419	0.045	0.464	0.465	0.09
60	4	0.4	0.424	0.275	0.085	0.055	0.140	0.140	0.17

^aDifference in percentage between CFD results and direct analytical calculations.

Ai fini del lavoro di tesi qui presentato le sole casistiche associate a sezioni con formato geometrico b/h pari a 12 e 18, e con uguale rugosità uniformemente distribuita sia sulle pareti laterali che sull'alveo di fondo ($k_{sb}=k_{sw}=0.0015 \text{ mm}$), sono state considerate ed analizzate nel dettaglio.

La forza di taglio agente sulle pareti di sponda espressa in percentuale rispetto alla forza di taglio totale ($\%SF_w$), e gli sforzi medi di taglio adimensionali calcolati sulle medesime pareti ($\tau_w/\rho ghS$) e sull'alveo rappresentativo del fondale ($\tau_b/\rho ghS$) sono stati esaminati in relazione al variare del parametro di forma P_b/P_w . (P_b e P_w corrispondono rispettivamente alle dimensioni dei perimetri bagnati al fondo e sulle sponde laterali).

I risultati grafici inerenti all'analisi dei dati appena citati vengono di seguito proposti.

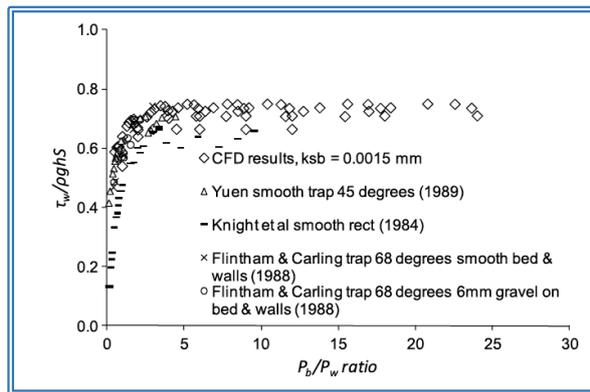
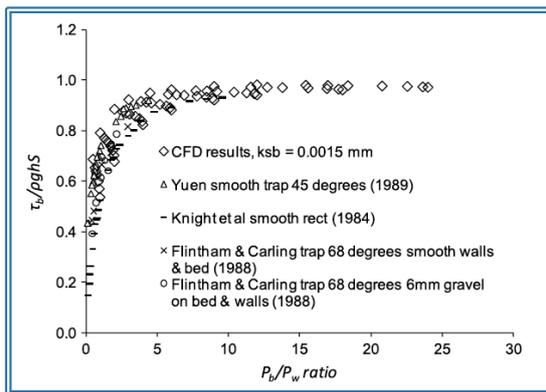
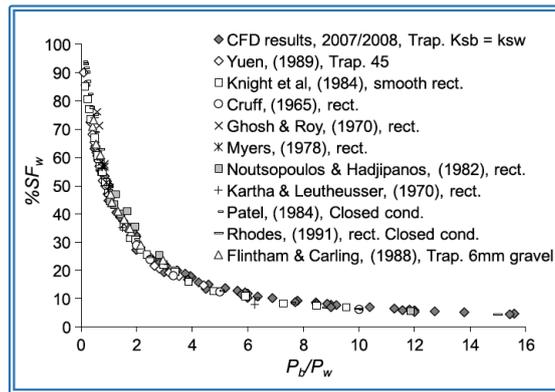


Fig. 2.8 – Risultati grafici per l'analisi dei trend associati ai risultati delle simulazioni contenute nel lavoro di Hargreaves et al., 2011, comprensivi delle simulazioni numeriche e dei dati utili di letteratura utili al confronto (%SF_w: Percentuale della forza di taglio alle pareti laterali sulla forza di taglio totale) ($\tau_b/\rho g H S$ e $\tau_w/\rho g H S$: Media adimensionale degli sforzi di taglio sull'alveo di fondo e sulle pareti laterali) (P_b/P_w : Rapporto tra perimetro bagnato dell'alveo di fondo e delle pareti laterali)

È possibile notare come al crescere del parametro di forma P_b/P_w , e conseguentemente anche del formato geometrico b/h , essendo l'altezza h costante per qualsiasi tipologia di sezione indagata, la forza di taglio percentuale sulle pareti laterali rispetto alla forza di taglio complessiva (%SF_w) tende a diminuire asintoticamente verso un valore finale nullo. I valori adimensionalizzati degli sforzi di taglio medi alle sponde e all'alveo di fondo contrariamente, sempre al crescere del parametro di forma P_b/P_w , tendono ad aumentare gradualmente raggiungendo anch'essi un limite massimo di soglia asintotico. Nel complesso i dati ottenuti attraverso le simulazioni numeriche sul software ANSYS CFX si configurano coerentemente rispetto ai trend derivanti dall'insieme delle informazioni utili attinte dalla letteratura esistente in materia, confermando di fatto l'efficacia e la validità computazionale del modello. Non viene evidenziata, descritta ed investigata tuttavia in maniera sufficientemente estesa la configurazione spaziale delle correnti secondarie, in particolar modo in merito alle possibili influenze ed ai legami con la natura delle distribuzioni degli sforzi di taglio all'alveo di fondo e alle pareti laterali.

2.3 Influence of shallowness, bank inclination and bank roughness on the variability of flow patterns and boundary shear stress due to secondary currents in straight open-channels (Blanckaert et al., 2010)

Il lavoro di ricerca sperimentale di Blanckaert et al. (2010): Influence of shallowness, bank inclination and bank roughness on the variability of flow patterns and boundary shear stress due to secondary currents in straight open-channels, è stato consultato ed analizzato con l'intento di fornire un valido spunto per il confronto diretto tra i risultati derivanti dalle simulazioni numeriche, eseguite con l'impiego del software ANSYS Fluent, e alcuni i risultati sperimentali di misura in laboratorio. Tale lavoro, riassunto all'interno di un articolo accademico, riguarda l'analisi della configurazione spaziale assunta dalle correnti secondarie per flussi d'acqua all'interno di sezioni trasversali regolari, rettangolari e trapezoidali, di canali rettilinei aperti a pelo libero, appositamente predisposti nell'ambito di esecuzione di alcune prove mirate di laboratorio. La ricerca scientifica si è concentrata in particolar modo sullo studio dei pattern multicellulari tipicamente associati alle correnti secondarie ed alle possibili influenze sulle stesse date da una variazione dell'inclinazione delle pareti di sponda laterali e della rugosità superficiale ad esse associata. Parallelamente è stata inoltre valutata ed investigata anche la distribuzione delle velocità longitudinali e trasversali, degli sforzi di taglio alle pareti e all'alveo di fondo, degli sforzi di taglio turbolenti e del contenuto di energia cinetica, al fine di evidenziare possibili relazioni ed interdipendenze con la fenomenologia e la natura propria delle stesse correnti secondarie. Le prove di laboratorio sono state svolte all'interno di un canale appositamente predisposto e preparato, avente larghezza trasversale B pari a 1.3 m, lunghezza rettilinea longitudinale pari a 9 m e rugosità sull'alveo di fondo pari a 2 mm, il più possibile uniformemente distribuita e costituita da grani di sabbia immobilizzati con della vernice adesiva. Una delle due pareti laterali è stata mantenuta sempre verticale, perpendicolare rispetto al fondale, e idraulicamente liscia, mentre inclinazione θ e rugosità d dell'altra parete sono state cambiate a seconda delle necessità e preferenze. Il battente idraulico H è stato inoltre impostato ipotizzando tre casistiche principali separate, rispettivamente corrispondenti ad una misura associata di 0.11, 0.16 e 0.21 cm, con velocità media U su qualsiasi sezione geometrica esaminata mantenuta comunque costante e sempre pari a 0.4 m/s circa. La topografia superficiale dell'alveo di fondo e della superficie libera nel canale è stata rilevata per mezzo di otto ecoscandagli, con un'incertezza di misura stimata minore di 1 mm. La portata idraulica Q ($Q \approx B \cdot H \cdot U$) è stata invece controllata con un'incertezza sperimentale minore del 5% grazie all'installazione di un flussometro elettromagnetico in corrispondenza della sezione di sbocco della tubazione coincidente con il punto di ingresso dell'acqua nel medesimo canale. Le componenti di velocità v_z , v_s e v_n nelle tre dimensioni spaziali di riferimento, impostate rispettivamente in direzione verticale verso l'alto rispetto all'alveo di fondo (z), in direzione concorde all'avanzamento e scarico dell'acqua verso valle (s) e orizzontale e trasversale rispetto a quest'ultima (n), sono state registrate impiegando un doppler acustico (Acoustic Doppler Velocity Profiler - ADVP). Adeguata frequenza e tempo di misurazione sono stati garantiti in modo tale da consentire una stima affidabile delle velocità medie e degli stress di Reynolds, con una risoluzione abbastanza elevata da consentire l'identificazione dei pattern geometrici propriamente associati alle correnti secondarie. Le rilevazioni strumentali sono state sempre contestualizzate con

riferimento ad una sezione trasversale posta ad una distanza di 6.5 m dal punto di ingresso dell'acqua nel canale e variabile in geometria e caratteristiche di rugosità su una delle due pareti laterali a seconda della casistica di studio esaminata.

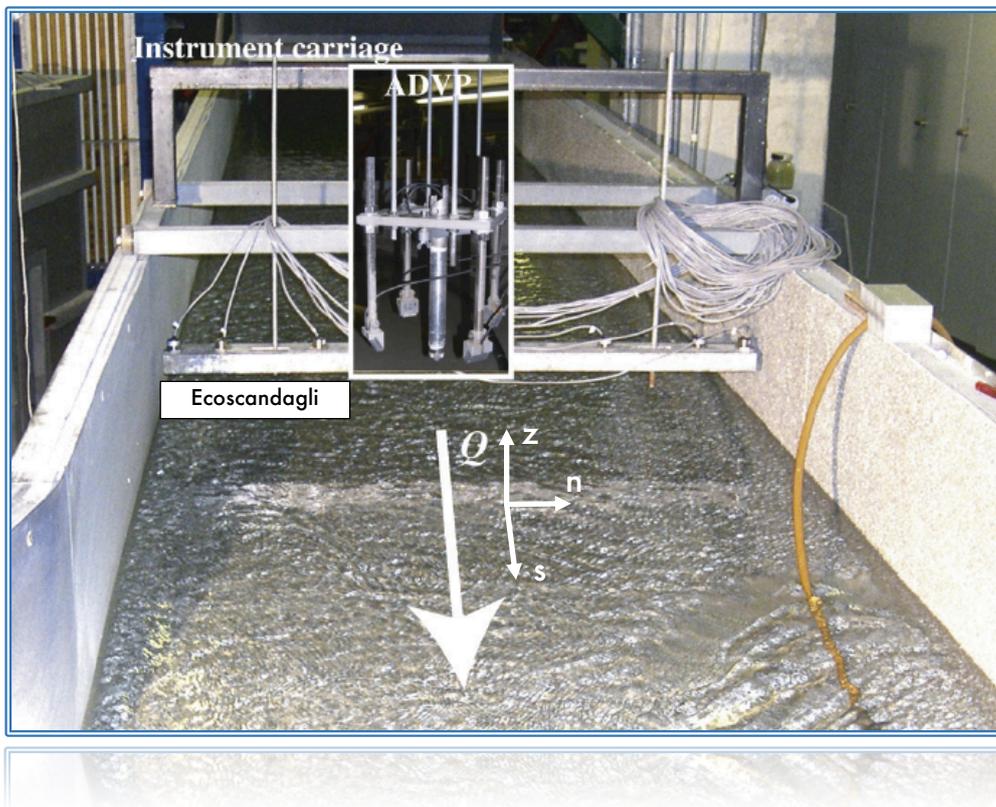


Fig. 2.9 – Rappresentazione fotografica del canale a pelo libero e del setup strumentale di misura appositamente installato per l'esecuzione delle prove sperimentali di laboratorio riepilogate nel lavoro di Blanckaert et al. (2010)

La conformazione delle correnti secondarie è stata ottenuta implementando la funzione matematica di flusso ψ qui di seguito illustrata:

$$\psi(n, z) = \int_0^z v_n dz$$

Tale funzione consente di ricavare una variabile scalare capace di parametrizzare e visualizzare opportunamente l'andamento delle correnti secondarie in ragione del dominio di investigazione e delle differenti condizioni al contorno.

Gli sforzi di taglio lungo l'alveo di fondo τ_{bed} del canale sono stati inoltre stimati in forma normalizzata a partire dalle velocità mediate sulla profondità U_s , con un'incertezza del 10% circa rispetto al valore calcolato. La seguente formula è stata sfruttata a tal proposito:

$$\frac{\tau_{bed}}{\tau_0} = \left(\frac{C_{f,bed}}{C_f} \right) \cdot \frac{U_s^2}{U^2}$$

Dove:

- U : Velocità media sull'intera sezione dell'acqua in avanzamento verso valle
- U_s : Velocità mediata sulla profondità di sezione rappresentata dal battente idraulico

- τ_0 : Sforzo di taglio medio alle pareti riferito all'intera sezione esaminata ($\tau_0 = \rho \cdot g \cdot R_h \cdot E_s$ - g : Accelerazione di gravità; ρ : Densità dell'acqua; R_h : Raggio idraulico; E_s : Gradiente energetico)
- C_f : Coefficiente d'attrito di Chézy adimensionale riferito all'intera sezione esaminata ($C_f = g \cdot R_h \cdot E_s / U^2$ - g : Accelerazione di gravità; ρ ; R_h : Raggio idraulico; E_s : Gradiente energetico)
- $C_{f,bed}$: Coefficiente d'attrito di Chézy adimensionale per alveo di fondo costituito da sabbia quasi uniformemente distribuita (2mm) - $C_{f,bed} \approx 0.0053$

Le molteplici prove di laboratorio eseguite sono state classificate e denominate a seconda dei principali parametri sperimentali tenuti in considerazione ai fini dello studio, in particolar modo la rugosità e l'inclinazione associate ad una delle due pareti di sponda laterali, con l'altra mantenuta sempre verticale ed idraulicamente liscia come già asserito in precedenza. A titolo d'esempio la sigla denominativa F11_45_30 indica la prova sperimentale svoltasi in condizioni di alveo di fondo piano orizzontale (F: Flat), con una parete laterale inclinata a 45° ed una rugosità uniformemente distribuita su di questa pari a 30 mm.

I risultati finali appositamente elaborati ed inerenti ad alcune delle casistiche ritenute utili per gli obiettivi del lavoro di tesi qui discusso vengono riportati e brevemente commentati. Sono stati considerati con maggior attenzione e interesse gli esiti delle prove sperimentali svoltesi imponendo un'inclinazione variabile della parete di sponda laterale tra i 90° ed i 45° e una rugosità associata nulla, corrispondente ad una condizione idraulicamente liscia.

Tab. 2.2 – Riepilogo in matrice tabellare di diversi dati utili descrittivi di alcune delle prove di laboratorio utili riassunte ed esplicitate nel lavoro di Blanckaert et al. (2010) – Re : Numero di Reynolds; Fr : Numero di Froude; d_{bank} : Rugosità della parete di sponda; d_{bed} : Rugosità dell'alveo di fondo; θ_{bank} : Inclinazione della parete di sponda

References	B [m]	B/H [-]	U [ms ⁻¹]	E_s [10 ⁻⁴]	$Re = UH/\nu$ [10 ³]	$Fr = U/(gH)^{1/2}$ [-]	d_{bank} [mm]	d_{bed} [mm]	d_{bed}/H [-]	$Re_* = u_* d/\nu$ [-]	θ_{bank} [°]
Blanckaert et al.											
Exp. F16_90_00	1.30	8.1	0.43	6.2	69	0.34	NA	2	0.013	56	90
Exp. F16_45_00	1.22	7.6	0.43	6.2	69	0.34	NA	2	0.013	56	45
Exp. F16_45_02	1.22	7.6	0.43	6.7	69	0.34	2	2	0.013	58	45
Exp. F11_45_30	1.22	7.6	0.44	8.7	70	0.35	30	2	0.013	66	45
Exp. F16_30_00	1.16	7.1	0.43	5.5	69	0.34	NA	2	0.013	52	30
Exp. F16_30_02	1.16	7.1	0.43	5.9	69	0.34	2	2	0.013	54	30
Exp. F11_30_30	1.16	7.1	0.43	7.6	69	0.34	30	2	0.013	61	30

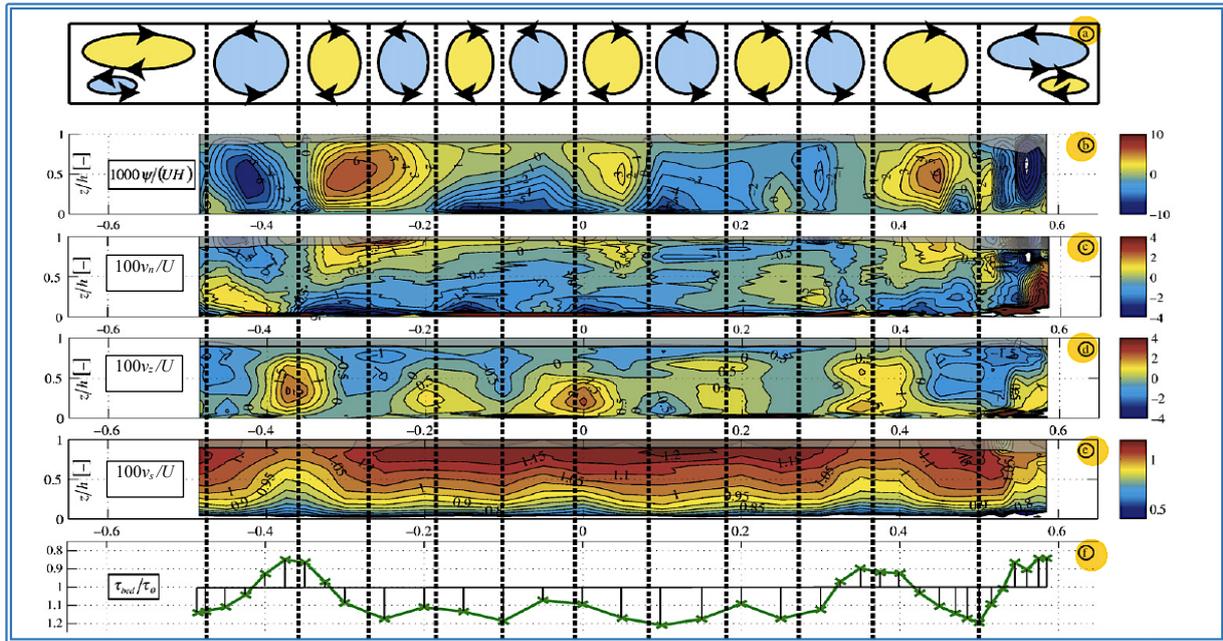


Fig. 2.10 – Rappresentazione d’insieme dei risultati relativi alla prova sperimentale denominata F11_90_00 (a. Schema di presunta configurazione multicellulare delle correnti secondarie; b. Output della funzione di flusso ψ normalizzata; c. Velocità trasversale v_n , normalizzata; d. Velocità trasversale v_z , normalizzata; e. Velocità longitudinale v_s , normalizzata; f. Distribuzione degli sforzi di taglio normalizzati lungo l’alveo di fondo)

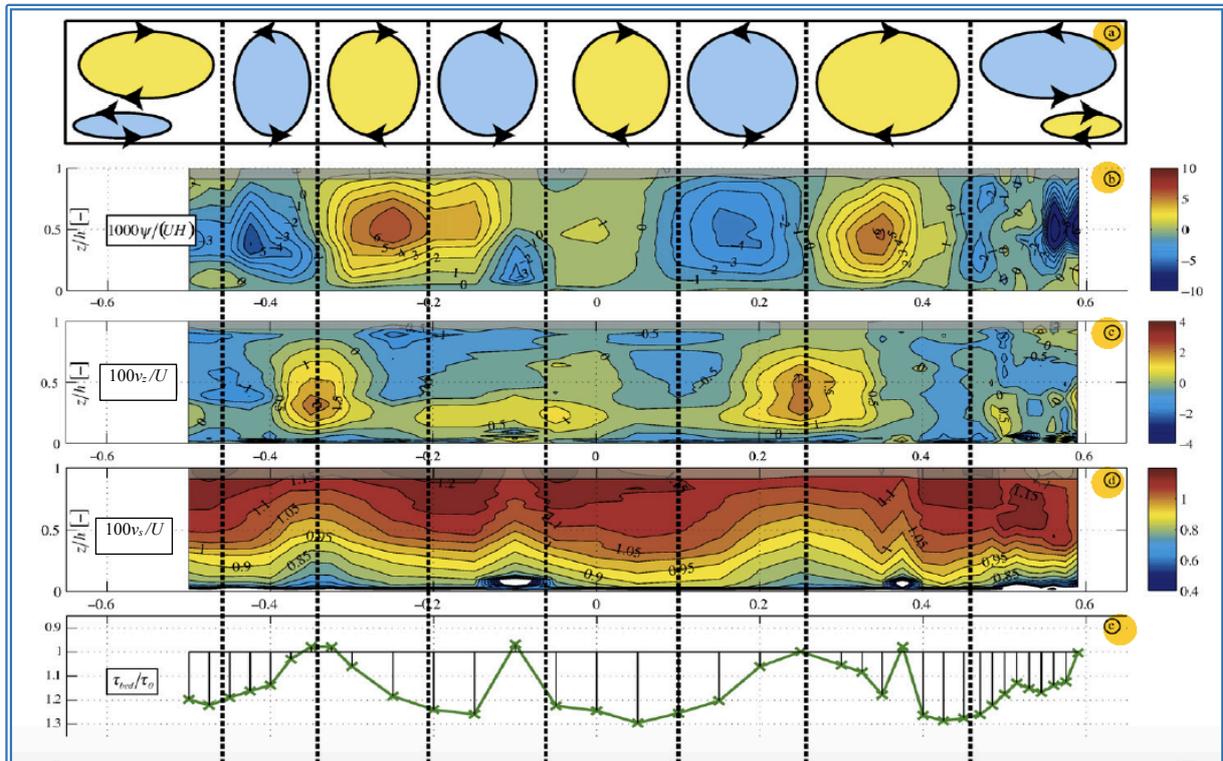


Fig. 2.11 – Rappresentazione d’insieme dei risultati relativi alla prova sperimentale denominata F16_90_00 (a. Schema di presunta configurazione multicellulare delle correnti secondarie; b. Output della funzione di flusso ψ normalizzata; c. Velocità longitudinale v_s , normalizzata; f. Distribuzione degli sforzi di taglio normalizzati sull’alveo)

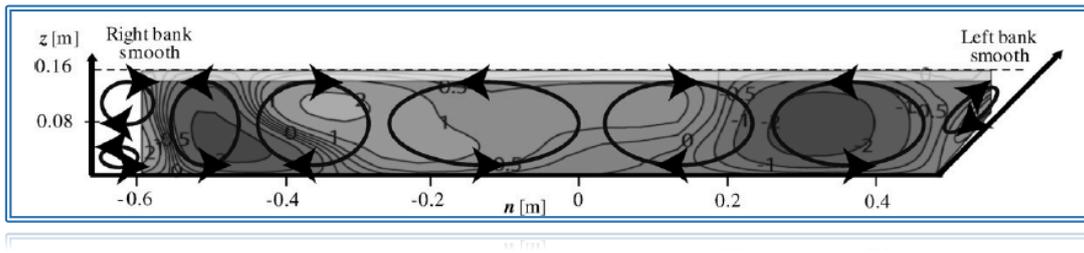


Fig. 2.12 – Output della funzione di flusso ψ normalizzata e rappresentazione contestuale dello schema di presunta configurazione multicellulare delle correnti secondarie in merito alla prova sperimentale denominata F11_45_00

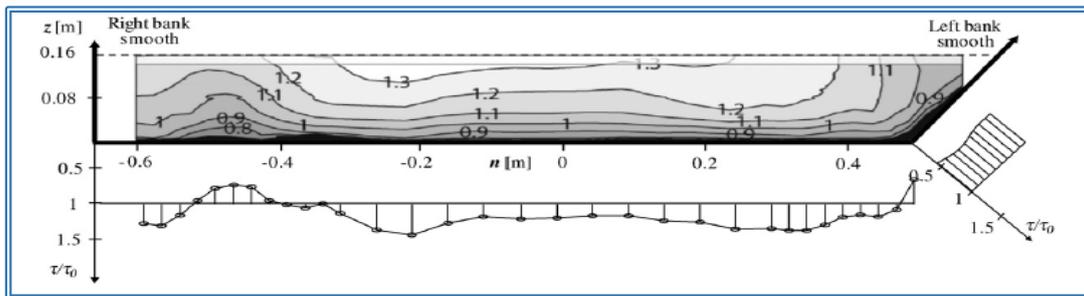


Fig. 2.13 – Rappresentazione della velocità longitudinale normalizzata v_s/U e degli sforzi di taglio normalizzati lungo l'alveo di fondo e lungo la parete di sponda laterale (come deviazione rispetto al valore 1) In relazione alla sezione geometrica associata alla prova sperimentale denominata F11_45_00

Dall'analisi dei risultati sopra illustrati è stato possibile osservare e constatare come i pattern descrittivi della struttura delle correnti secondarie siano stati identificati dagli autori delle prove di laboratorio come distribuiti sull'intera larghezza della sezione del canale adottata in qualità di dominio spaziale di indagine, indipendentemente dalle possibili variazioni di inclinazione e rugosità della parete di sponda laterale. Il particolar modo ne è stato ben evidenziato il tipico andamento a celle multiple tra loro accostate, responsabili di un moto secondario dell'acqua, perpendicolare rispetto alla direzione principale di avanzamento verso valle, con sensi di rotazione imposti rispettivamente orari e/o antiorari. Il numero totale delle suddette celle tende a diminuire al crescere della dimensione del battente idraulico H , pur mantenendo sempre valida una reciproca alternanza dei sensi di rotazione. È possibile notare come in corrispondenza delle porzioni di sezione in cui si configura una convergenza delle celle secondarie con moto dell'acqua risultante diretto verso la superficie libera, dato dalla combinazione dei relativi sensi di rotazione, la distribuzione degli sforzi di taglio normalizzati lungo l'alveo di fondo τ_{bed}/τ_0 presenta dei picchi di minimo, soprattutto all'avvicinarsi progressivo alle pareti di sponda laterali. Contestualmente, le velocità longitudinali v_s tendono a variare lungo la direzione verticale con un gradiente ridotto ed anche la variabile rappresentata dalla velocità trasversale v_z sembra essere condizionata, manifestando un raggruppamento dei valori massimi ad essa associati.

Il legame tra la configurazione multicellulare riconosciuta per le correnti secondarie e la distribuzione dei valori scalari ottenuti per mezzo della funzione di flusso ψ non risulta essere tuttavia chiaro e ben definito, se non in prossimità delle pareti di sponda laterali ed in parte all'aumentare progressivo del battente idraulico H . L'insieme dei risultati sembra suggerire nel complesso un'intensità crescente delle correnti secondarie e degli effetti idrodinamici che ne derivano all'avvicinarsi progressivo alle stesse pareti di sponda laterali.

2.4 Numerical simulations of cellular secondary currents and suspended sediment transport in open-channel flows over smooth-rough bed strips (Sung-UK Choi et al., 2010)

Un ulteriore e interessante riferimento utile ai fini dello studio e del lavoro di tesi qui presentato è stato individuato e riconosciuto nell'articolo scientifico di Sung-UK et al. (2010): Numerical simulations of cellular secondary currents and suspended sediment transport in open-channel flows over smooth-rough bed strips. Questo articolo riassume e descrive nello specifico gli aspetti di maggior rilievo legati ad un'attività di ricerca mirata per la riproduzione delle correnti secondarie mediante apposite simulazioni numeriche, con un'analisi correlata del possibile ruolo giocato dalle stesse nei fenomeni di trasporto solido, nel caso di flussi d'acqua in canali rettangolari rettilinei a pelo libero. È stata investigata in particolare l'ipotesi concernente la presenza di alveo di fondo caratterizzato da un'alternanza regolare fra porzioni idraulicamente lisce e caratterizzate invece da una certa scabrezza d_{50} uniformemente distribuita sullo stesso.

Tutte le simulazioni sono state eseguite implementando il modello fluidodinamico degli Stress di Reynolds (RSM - Reynolds Stress Model) e utilizzando le soluzioni computazionali proposte da Mellor-Herring (1973) e Speziale (1991) rispettivamente per la risoluzione del termine di diffusione turbolenta e del termine di correlazione pressione-deformazione. Le variabili idrodinamiche di interesse sono state stimate contestualmente all'impostazione di sezioni trasversali rappresentative del dominio spaziale di interesse, perpendicolari rispetto alla direzione principale di avanzamento ipotizzata dell'acqua verso valle.

A tal proposito le casistiche sperimentali studiate da Muller e Studerus (1979) e Wang-Cheng (2005) sono state appositamente sfruttate come riferimento utile ai fini del dimensionamento geometrico e del confronto diretto dei risultati finali.

Tab. 2.3 – Raccolta dei principali parametri di riferimento relativi ai lavori sperimentali di Muller e Studerus (1979) e Wang-Chang (2005) adottati come riferimento per le simulazioni numeriche di Sung-UK Choi et. al. (2010) – H: Dimensione del battente idraulico; B: Larghezza trasversale della sezione; AR (B/H): Formato geometrico; S_0 : Pendenza associata all'alveo di fondo; Fr: Numero di Froude; d_{50} : Dimensione delle asperità sull'alveo di fondo; Rough/Smooth (Strip Width): Larghezza trasversale delle fasce di alveo alternate e rispettivamente scabre o lisce

Researcher	H (m)	B (m)	AR (B/H)	S_0	Fr	d_{50} (mm)	Strip width (m)	
							Rough	Smooth
Muller and Studerus (1979)	0.08	0.6	7.5	0.00152	0.6	2.5	0.06	0.1
Wang and Cheng (2005)	0.075	0.6	8.0	0.0007	0.52	2.55	0.075	0.075

La discretizzazione delle sezioni sopra citate per la risoluzione modellistica è stata svolta suddividendole in elementi uguali costituenti una griglia uniforme atta a garantire adeguati valori della grandezza adimensionale y^+ in prossimità delle pareti e dell'alveo di fondo, nonché il raggiungimento di esiti numerici finali stabili per mezzo di una procedura iterativa convergente. Un'opportuna condizione di simmetria planare è stata impostata per il controllo della superficie libera, considerata sempre e comunque parallela al fondale, e la legge logaritmica standard è stata adottata per tenere conto correttamente delle variazioni nelle caratteristiche del moto dell'acqua in vicinanza dei confini solidi rappresentati dalle pareti di sponda e dall'alveo fondo.

I risultati definitivi derivanti dalle simulazioni numeriche connesse alla casistica di studio esaminata da Wang-Cheng (2005), vengono di seguito brevemente illustrati e commentati con l'intento di evidenziarne gli aspetti maggiormente significativi. Viene proposta nello specifico una comparazione diretta delle configurazioni multicellulari assunte dalle correnti secondarie nella sezione di riferimento impiegata e rappresentativa della condizione di canale rettilineo a pelo libero, nonché della distribuzione delle velocità longitudinali e degli sforzi di taglio sull'alveo di fondo in funzione della presenza di porzioni alternatamente scabre o idraulicamente lisce.

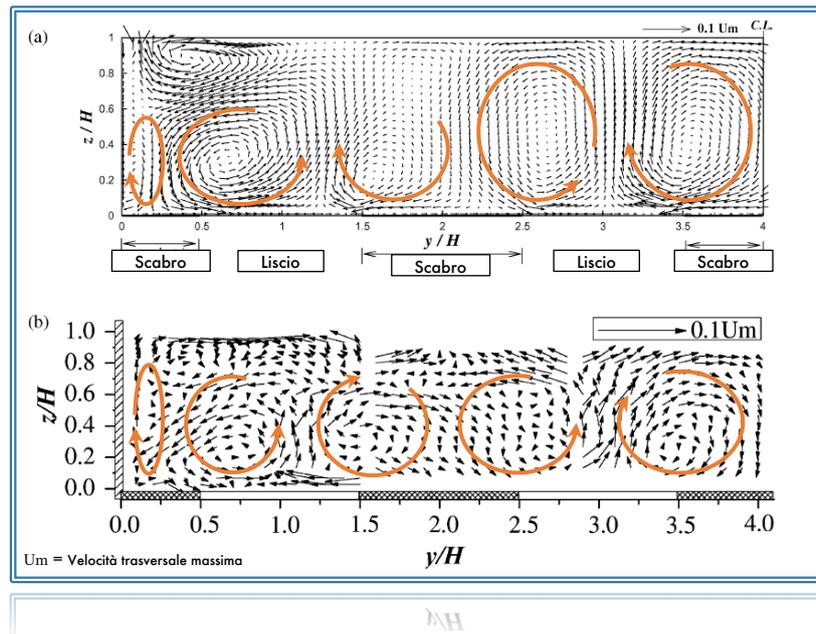


Fig. 2.14 – Confronto tra le configurazioni multicellulari delle correnti secondarie espresse in forma vettoriale e descrittiva del moto trasversale dell'acqua nella sezione, ottenute rispettivamente attraverso le simulazioni numeriche di Sung-UK Choi et al. (a) ed i risultati sperimentali di Wang-Cheng (b) (y/H : Larghezza progressiva dell'alveo di fondo normalizzata sulla dimensione del battente idraulico H)

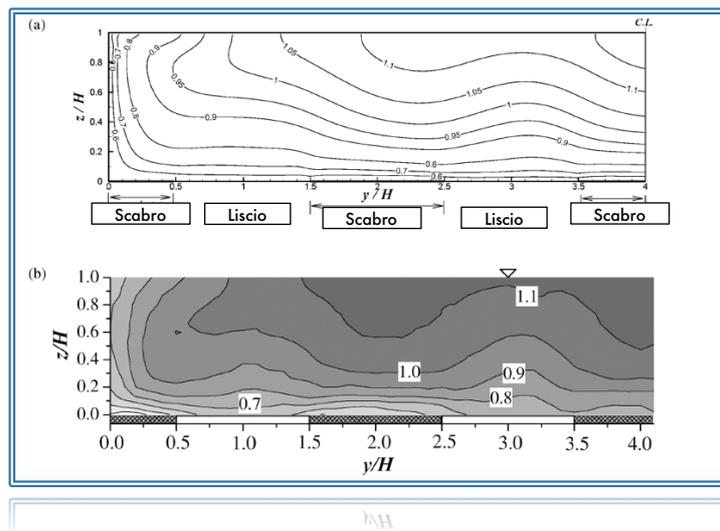


Fig. 2.15 – Confronto tra le distribuzioni in sezione delle velocità longitudinali normalizzate rispettivamente ricavate attraverso le simulazioni numeriche di Sung-UK Choi et al. (a) e i risultati sperimentali di Wang-Cheng (b) (y/H : Larghezza progressiva dell'alveo di fondo normalizzata sulla dimensione del battente idraulico H)

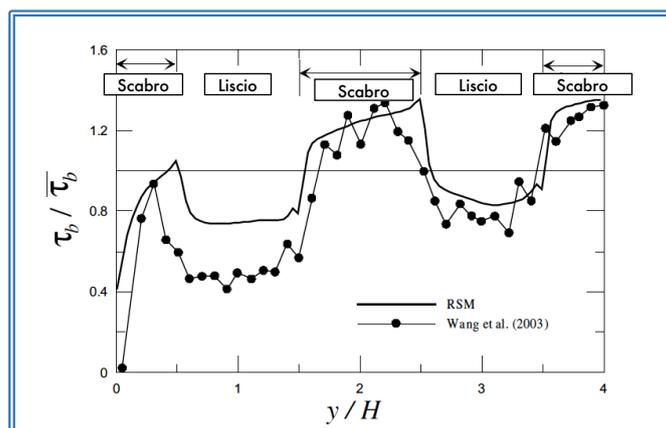


Fig. 2.15 – Confronto tra le distribuzioni degli sforzi di taglio normalizzati sull'alveo rispettivamente ottenute attraverso le simulazioni numeriche di Sung–UK Choi et al. (RSM) e i risultati sperimentali di Wang et al. (2003) (y/H : Larghezza progressiva dell'alveo di fondo normalizzata sulla dimensione del battente idraulico H)

Dall'analisi dei risultati è possibile constatare come le simulazioni numeriche abbiano fornito in generale una riproduzione delle principali caratteristiche del moto dell'acqua e degli effetti idrodinamici di interesse che ne derivano coerente e ben comparabile con quanto ricavato in seguito alle indagini sperimentali di Wang e Chang (2005). In particolar modo l'impiego del modello fluidodinamico degli stress di Reynolds (RSM – Reynolds Stress Model) sembra fornire una valida ed efficace alternativa per l'identificazione ed il riconoscimento delle strutture multicellulari associate alle correnti secondarie. Anche i dati inerenti alle distribuzioni degli sforzi di taglio sull'alveo di fondo e alle velocità longitudinali all'interno della sezione geometrica trasversale di interesse si dimostrano inoltre in linea con gli esiti sperimentali noti pregressi.

Risulta evidenziabile più specificatamente come gli stessi sforzi di taglio appena sopra citati tendono ad assumere dei valori rispettivamente più elevati in corrispondenza delle porzioni di alveo idraulicamente scabre e più bassi invece in corrispondenza delle porzioni di alveo idraulicamente lisce, in conseguenza delle pronosticabili differenti forze di attrito generate. Le velocità longitudinali inoltre tendono a variare lungo la direzione verticale, ortogonale al fondale, seguendo un gradiente ridotto in corrispondenza delle porzioni idraulicamente lisce se confrontato con quello al di sopra delle porzioni idraulicamente scabre. Tale effetto si manifesta congruentemente alla configurazione propria delle celle secondarie, distribuite sull'intera larghezza della sezione esaminata, le quali si susseguono in maniera alternata con un senso di rotazione orario ed antiorario imposto al moto trasversale dell'acqua. A tal proposito si può notare come al di sopra delle porzioni di alveo scabre le correnti secondarie convergono fra loro determinando una "spinta" dell'acqua verso l'alveo stesso, mentre al di sopra delle porzioni di alveo lisce le medesime correnti convergono fra loro determinando una "spinta" dell'acqua contraria, ovvero verso la superficie libera.

3. Criteri modellistici e metodi computazionali

All'interno del presente capitolo vengono riportati in forma riepilogativa i principi logici e computazionali di base considerati ai fini dell'impostazione, dell'esecuzione e della classificazione delle simulazioni numeriche per l'analisi delle correnti secondarie in ambiente virtuale fornito dal software ANSYS Fluent.

Viene proposta nello specifico una sintesi illustrativa dei riferimenti teorici fondamentali per la comprensione e l'applicazione del modello fluidodinamico degli Stress di Reynolds (RSM - Reynolds Stress Model), opportunamente adottato e sfruttato in tal senso. Contestualmente viene inoltre elencato, esplicitato e posto a confronto l'insieme delle diverse casistiche di interesse valutate ed indagate ai fini dello studio, evidenziandone le peculiarità di maggior rilievo oltre ai criteri modellistici conseguentemente scelti ed adottati in modo tale da poter raggiungere una serie di risultati validabili ed accettabili.

3.1 Il modello degli stress di Reynolds: RSM, Reynolds Stress Model

La simulazione numerica delle correnti secondarie ed in generale delle variabili idrodinamiche associate ai flussi d'acqua all'interno di canali e corsi d'acqua a pelo libero necessita l'impiego di un apposito modello fluidodinamico di riferimento in grado di tenere conto delle fluttuazioni spaziali e temporali propriamente manifestate in virtù della turbolenza. L'equazione fondamentale a partire dalla quale vengono sviluppate ed elaborate le diverse possibili strategie modellistiche per la risoluzione delle caratteristiche del moto dell'acqua è rappresentata sempre e comunque dall'equazione di Navier-Stokes, la quale per fluidi newtoniani incomprimibili si presenta nella seguente forma tensoriale:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (1)$$

Dove:

- $U_{i,j}$: Componenti della velocità nelle direzioni principali di riferimento nello spazio
- $x_{i,j}$: Direzioni principali di riferimento nello spazio in relazione al dominio indagato
- P : Pressione
- ρ : Densità dell'acqua (costante)
- ν : Viscosità cinematica dell'acqua (costante)

La risoluzione numerica diretta dell'equazione fondamentale sopra riportata (DNS - Direct Numerical Simulation) risulta molto spesso inaccessibile ed ineseguibile in relazione alle applicazioni ed alle casistiche di interesse tipicamente affrontate in campo ingegneristico. La natura intrinseca del moto turbolento implica infatti delle fluttuazioni ad alta frequenza ed anche a piccolissima scala spazio-temporale nei campi di velocità dell'acqua, con la conseguente necessità di elaborare ed ottenere una quantità enorme di informazioni utili per poter riprodurre, analizzare e descrivere in maniera completa le caratteristiche proprie del moto. Tale tipologia di approccio implica pertanto un elevatissimo dispendio in termini di risorse computazionali e temporali, molto difficilmente disponibile o sfruttabile anche nel caso delle casistiche e circostanze di studio meno complesse.

Una valida alternativa atta a rendere meno articolata e complicata la riproduzione per mezzo di simulazione numerica del moto turbolento dell'acqua è rappresentata dalla manipolazione mirata dell'equazione fondamentale di Navier-Stokes, in modo tale da ridurre i troppo spesso proibitivi requisiti di natura sia temporale che computazionale. L'intento in questa direzione è quello di raggiungere un compromesso in grado di garantire l'elaborazione e l'ottenimento di informazioni utili sufficienti in numero ed accuratezza a seconda degli intenti di ricerca perseguiti, contestualmente e coerentemente alle risorse di calcolo fruibili e sfruttabili nel complesso.

Le equazioni di Navier-Stokes mediate secondo Reynolds (RANS - Reynolds Averaged Navier-Stokes) si configurano e riconoscono in tal senso come una possibilità al giorno d'oggi largamente sfruttata per molteplici applicazioni sia teoriche che pratiche in campo ingegneristico. Queste si ottengono nello specifico attraverso la cosiddetta decomposizione di Reynolds, la quale propone una scomposizione delle variabili idrodinamiche visualizzate come istantanee in due componenti separate, rispettivamente rappresentative di una parte associata ad un valore medio nel tempo ed una parte associata invece ad un valore residuo oscillante e pertanto mutevole, come qui illustrato simbolicamente:

$$U_i = \langle U_i \rangle + u_i \quad (2)$$

$$P_i = \langle P_i \rangle + p_i \quad (3)$$

Dove:

- $\langle U_i \rangle$: Componente media della velocità U_i nella direzione spaziale di riferimento i
- u_i : Componente oscillante della velocità U_i nella direzione spaziale di riferimento i
- $\langle P_i \rangle$: Componente media della pressione P_i nella direzione spaziale di riferimento i
- p_i : Componente oscillante della velocità P_i nella direzione spaziale di riferimento i

Sostituendo le espressioni appena sopra riportate all'interno dell'equazione fondamentale di partenza di Navier Stokes (1) ed apportando le opportune modifiche e semplificazioni matematiche del caso, sempre nell'ipotesi di fluidi newtoniano ed incompressibile, risulta infine possibile giungere alla formula risolutiva qui sotto illustrata e riconosciuta come la forma generale dell'equazione di Navier-Stokes mediata secondo Reynolds (RANS):

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \langle U_j \rangle \frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle P \rangle}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \langle U_i \rangle}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \langle u_i u_j \rangle}{\partial x_j} \quad (4)$$

riscrivibile anche nella seguente forma:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \langle U_j \rangle \frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \langle P \rangle \delta_{i,j} + \mu \left(\frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle U_j \rangle}{\partial x_i} \right) - \rho \langle u_i u_j \rangle \right\} \quad (5)$$

Dove, in aggiunta i termini già noti dalle espressioni illustrate in precedenza:

- $\delta_{i,j}$: Delta di Kronecker
- μ : Viscosità dinamica dell'acqua (costante)

Il termine aggiuntivo incognito $-\rho\langle u_i u_j \rangle$, non visibile e riscontrabile all'interno dell'equazione fondamentale originale di Navier-Stokes è rappresentativo dei cosiddetti Stress di Reynolds. Quest'ultimi possiedono una grande valenza e importanza in quanto stabiliscono un legame di accoppiamento ed interdipendenza tra le componenti medie ed oscillanti del campo di velocità dell'acqua. In particolare, essi si presentano come un tensore del secondo ordine che tiene conto del momento di secondo ordine associato alle diverse componenti della velocità manifestate rispetto ad un singolo punto di interesse nello spazio di indagine:

$$\tau_{i,j} = \begin{bmatrix} -\rho\langle u_1 u_1 \rangle & -\rho\langle u_1 u_2 \rangle & -\rho\langle u_1 u_3 \rangle \\ -\rho\langle u_2 u_1 \rangle & -\rho\langle u_2 u_2 \rangle & -\rho\langle u_2 u_3 \rangle \\ -\rho\langle u_3 u_1 \rangle & -\rho\langle u_3 u_2 \rangle & -\rho\langle u_3 u_3 \rangle \end{bmatrix} \quad (6)$$

Gli stress di Reynolds vengono comunemente chiamati anche stress apparenti in quanto si identificano per l'appunto nella forma raccolta di tensore fittizio aggiuntivo il quale, pur appearing simile al termine di stress di natura viscosa, non fa parte delle componenti di stress interne al fluido, ma risulta invece indicativo dei fenomeni di trasferimento di momento per effetto della turbolenza, ovvero del flusso medio di momento guidato dalle fluttuazioni turbolente della velocità.

Il medesimo tensore appena sopra descritto e precedentemente illustrato in forma simbolica è un tensore di natura simmetrica e pertanto risulta $-\rho\langle u_1 u_2 \rangle = -\rho\langle u_2 u_1 \rangle$, $-\rho\langle u_1 u_3 \rangle = -\rho\langle u_3 u_1 \rangle$ e $-\rho\langle u_2 u_3 \rangle = -\rho\langle u_3 u_2 \rangle$. I termini incogniti relativi agli stress di Reynolds da determinare in quanto sconosciuti a priori sono in definitiva sei e sono essenziali ai fini della risoluzione e chiusura dell'equazione di Navier-Stokes mediata secondo Reynolds (5). Un primo approccio intuitivo ed adottabile a tale scopo potrebbe rivelarsi quello della derivazione diretta delle equazioni che implicano la presenza e l'influenza dei medesimi Stress di Reynolds. Tuttavia, questo tipo di procedimento di calcolo si è rivelato del tutto inefficace in quanto conduce ad un progressivo ed indefinito incremento dell'ordine delle stesse equazioni, da secondo a terzo, da terzo a quarto e così via, rendendo di fatto impossibile il raggiungimento di una soluzione. Questo problema è generalmente indicato come problema della chiusura.

Il modello degli stress di Reynolds (RSM – Reynolds Stress Model) si configura e si propone in tal senso quale metodo utile appositamente studiato e sfruttabile per ovviare a tale problema e poter procedere quindi alla corretta determinazione delle entità degli stress incogniti. La strategia intrinsecamente insita nel modello degli stress di Reynolds (RSM – Reynolds Stress Model) prevede la risoluzione delle equazioni di trasporto per ciascuna componente del tensore sconosciuta, $\tau_{i,j} = -\rho\langle u_i u_j \rangle$ e per il tasso di dissipazione energetica ε . (6+1=7 Equazioni differenziali alle derivate parziali – PDEs: Partial Differential Equations). Il dispendio in termini computazionali legato all'impiego di questo modello è nella maggior parte dei casi sostenibile ma comunque piuttosto alto se confrontato con diversi altri modelli fluidodinamici al giorno d'oggi diffusamente utilizzati, in ragione del forte accoppiamento tra le equazioni di trasporto e della considerevole suscettibilità all'instabilità numerica.

In ogni caso il modello degli stress di Reynolds presenta il grande vantaggio di considerare naturalmente gli effetti idrodinamici storici e non-locali della turbolenza nella risoluzione del campo di moto. Grazie a tale peculiarità l'efficacia e l'affidabilità delle simulazioni numeriche possono essere notevolmente migliorate, in particolar modo per l'appunto in relazione alle conseguenze dirette ed indirette dell'anisotropia turbolenta, come accade esempio per l'investigazione delle correnti secondarie nei canali aperti a pelo libero.

Le equazioni descrittive degli stress di Reynolds possono essere ottenute direttamente a partire dall'equazione fondamentale di Navier-Stokes (1) tramite decomposizione di Reynolds ed applicazione della media nel tempo. La forma completa e finale delle sei equazioni descrittive del trasporto degli stress di Reynolds viene di seguito riportata:

$$\begin{aligned}
 \underbrace{\frac{\partial \langle u_i u_j \rangle}{\partial t}}_I + \underbrace{\langle U_k \rangle \frac{\partial \langle u_i u_j \rangle}{\partial x_k}}_{II} = & - \underbrace{\left(\langle u_i u_k \rangle \frac{\partial \langle U_j \rangle}{\partial x_k} + \langle u_j u_k \rangle \frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial x_k} \right)}_{III} \\
 & - 2\nu \underbrace{\left\langle \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \right\rangle}_{IV} + \underbrace{\left\langle \frac{p}{\rho} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\rangle}_{V} \\
 & - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} \left(\langle u_i u_j u_k \rangle + \delta_{ik} \frac{\langle u_j p \rangle}{\rho} + \delta_{jk} \frac{\langle u_i p \rangle}{\rho} - \nu \frac{\partial \langle u_i u_j \rangle}{\partial x_k} \right)}_{VI}
 \end{aligned} \tag{7}$$

Dove:

- I. Accumulo di $\langle u_i u_j \rangle$
- II. Convezione di $\langle u_i u_j \rangle$ per via della velocità media
- III. Produzione di $\langle u_i u_j \rangle$, tasso di generazione degli stress turbolenti
- IV. Dissipazione viscosa di $\langle u_i u_j \rangle$, tasso di dissipazione degli stress turbolenti
- V. Correlazione tra pressione e deformazione, rappresentativa della redistribuzione tra gli stress di Reynolds
- VI. Termini che tengono conto del trasporto turbolento e della diffusione molecolare

Gli stress di Reynolds risultano individualmente generati, trasportati e dissipati a differenti velocità nel tempo. L'espressione sopra illustrata (7) può essere inoltre riscritta per mezzo della seguente forma abbreviata e semplificata:

$$\frac{\partial \langle u_i u_j \rangle}{\partial t} + \langle U_k \rangle \frac{\partial \langle u_i u_j \rangle}{\partial x_k} = P_{ij} - \varepsilon_{ij} + \phi_{ij} + d_{ij}. \tag{8}$$

I termini III, IV, V e VI vengono sostituiti e racchiusi rispettivamente nelle forme letterali singole P_{ij} , ε_{ij} , ϕ_{ij} e d_{ij} . I termini IV, V, VI, ad esclusione quindi dei soli termini I, II e III, necessitano di essere risolti per via modellistica imponendo alcune ipotesi approssimative. I termini dissipativi (IV - ε_{ij}) vengono trattati assumendo la loro adesione alla condizione di isotropia in quanto i processi di dissipazione avvengono alle scale spaziali più piccole, mentre i termini di trasporto (VI - d_{ij}) vengono elaborati sulla base del concetto di ipotesi diffusione-gradiente. Il termine di correlazione tra pressione e deformazione (V - ϕ_{ij}) agisce come veicolo di redistribuzione dell'energia turbolenta fra uno stress e l'altro e viene valutato considerando sia i contributi derivanti dalle interazioni turbolenza-turbolenza ($\phi_{ij,1}$) che dalle deformazioni medie ($\phi_{ij,2}$):

$$\phi_{ij} = \phi_{ij,1} + \phi_{ij,2} \tag{9}$$



$\phi_{ij,1}$ viene definito in particolare come termine di deformazione–pressione “lento” e tiene conto dell’entità dei fenomeni di passaggio dell’energia turbolenta tra gli stress di Reynolds. $\phi_{ij,2}$ viene invece comunemente denominato termine di deformazione–pressione “rapido” e risulta necessario per controbilanciare la produzione di anisotropia nella turbolenza.

In ambito computazionale, una volta opportunamente trattati e risolti numericamente tutti i termini e membri matematici appena sopra citati e brevemente descritti risulta possibile procedere alla chiusura delle equazioni di trasporto degli stress di Reynolds (7 – 8), e di conseguenza anche dell’equazione completa di Navier–Stokes mediata secondo Reynolds (RANS), in grado di fornire la soluzione finale ricercata.

Per quanto concerne il termine per il riconoscimento della correlazione tra deformazione ($V - \phi_{ij}$) più specificatamente, in riferimento all’ambito applicativo di simulazione numerica all’interno dell’ambiente software commerciale ANSYS Fluent, quest’ultimo può essere stimato scegliendo uno schema matematico di tipo lineare o quadratico, ripercorrendo i procedimenti di calcolo risolutivi proposti rispettivamente da Gibson & Launder (1978), Fu et al., (1987), Launder (1989) – (Schema lineare) – e Speciale, Sarkar e Gatski (1991) – (Schema quadratico).

3.2 Riepilogo delle modalità di impostazione ed implementazione delle simulazioni numeriche in ambiente software ANSYS Fluent

Viene illustrata nel presente paragrafo una ricapitolazione e breve descrizione dei più importanti criteri metodologici e principi operativi scelti ed adoperati ai fini dell’esecuzione delle simulazioni numeriche all’interno dell’ambiente virtuale fornito dal software ANSYS Fluent per lo studio e l’investigazione delle correnti secondarie.

Considerando l’interesse specificatamente rivolto e mirato nei confronti della particolare casistica di studio di flussi in canali, e più in generale in corsi d’acqua, aperti e rettilinei a pelo libero, con un richiamo esplicito e diretto alle condizioni sperimentali impostate nel lavoro sperimentale di riferimento di Piper et al. (2015), tutte le simulazioni numeriche sono state svolte impostando una pendenza dell’alveo di fondo S ridotta ed un vincolo di simmetria in grado di considerare la superficie libera come parallela all’alveo stesso.

I domini spaziali per per l’analisi del campo di moto e della configurazione delle correnti secondarie sono stati realizzati mediante la costruzione di apposite sezioni bidimensionali di geometria rettangolare e trapezoidale, trasversali rispetto alla direzione principale ipotizzata di avanzamento x dell’acqua verso valle. Alcune sezioni sono state considerate per metà della loro estensione trasversale imponendo un’ulteriore condizione di simmetria in posizione di mezzeria. Ognuna delle porzioni di confine dei domini stessi inoltre, rappresentative delle pareti laterali e dell’alveo di fondo ad esclusione della superficie libera, sono state considerate come perfettamente solide, immobili, impermeabili e antiscivolo, seppur caratterizzate da rugosità uniformemente distribuita d variabile a seconda delle differenti casistiche esaminate. La pendenza delle medesime pareti laterali θ è stata fatta variare di un angolo compreso tra i 45 ed i 90 gradi rispetto alla direzione orizzontale dell’alveo di fondo, mentre il rapporto di forma B/H , ovvero il rapporto tra la larghezza B l’altezza H della sezione di interesse, è stato fatto variare tra un valore minimo di 8 ed un valore massimo di 18, con l’intento di mantenere il più possibile una certa coerenza e aderenza alle condizioni sperimentali delle prove scientifiche eseguite da Piper et al. (2015). L’altezza H ha sempre conciso con la dimensione del battente idraulico.



La discretizzazione delle sezioni geometriche ai fini della risoluzione computazionale delle caratteristiche idrodinamiche del flusso d'acqua è stata eseguita elaborando una cosiddetta "mesh" esaedrica in grado di suddividere le sezioni stesse in molteplici elementi il più possibile identici fra loro e costituenti una griglia il più possibile uniformemente distribuita. La dimensione degli elementi è stata scelta ed impostata in modo tale da ottenere valori adeguati e accettabili della variabile adimensionale y^+ in corrispondenza dell'alveo di fondo e delle pareti di sponda laterali. Questa variabile nello specifico, considerato il ricorso integrato al modello fluidodinamico degli stress di Reynolds (RSM), deve infatti risultare sempre compresa in un range che va da un limite minimo di 30 ad un limite massimo di 300. Lo spessore del dominio geometrico in direzione parallela a quella di avanzamento principale dell'acqua verso valle x , perpendicolare quindi rispetto alle sezioni trasversali, è stato fissato in misura simbolica ridotta pari alla dimensione di un singolo elemento costitutivo della "mesh", tanto da poter considerare le sezioni stessa per l'appunto di natura bidimensionale.

Tutte le simulazioni numeriche hanno previsto inoltre l'imposizione di una condizione di periodicità rappresentativa del transito di una portata idrica Q di valore costante attraverso le sezioni adottate ai fini dello studio. L'entità della medesima portata Q , se incognita e sconosciuta a priori, è stata valutata e grazie all'impiego della formula di Manning per le correnti a pelo libero:

$$Q = A \cdot k_s \cdot (R_h)^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{S}$$

Dove:

- A : Area della sezione geometrica di interesse (m^2)
- k_s : Coefficiente di Strickler-Manning relativo alla tipologia di materiale ed alla rugosità associate all'alveo di fondo e alle pareti di sponda della sezione ($m^{1/3}/s$)
- R_h : Raggio idraulico (Rapporto tra area della sezione e perimetro bagnato)
- S : Pendenza dell'alveo di fondo in direzione di moto dell'acqua verso valle

La sola fase materiale implementata e considerata per la valutazione fluidodinamica del moto dell'acqua è stata quella dell'acqua stessa allo stato liquido con una densità ρ costante pari a 998.2 kg/s. La topografia dell'alveo di fondo è stata ipotizzata più o meno regolare/irregolare a seconda delle casistiche di studio e la funzione logaritmica standard è stata sempre utilizzata per la riproduzione delle caratteristiche idrodinamiche del flusso in prossimità dell'alveo stesso così come delle pareti di sponda laterali. La soluzione definitiva associata all'esecuzione di ciascuna simulazione numerica è stata ricavata per mezzo di una procedura risolutiva di tipo iterativo sino al raggiungimento di una convergenza per tutte le variabili di modello considerate. Ai fini della medesima convergenza e della conseguente accettabilità della soluzione, le entità residuali associate alle stesse variabili proprie del modello fluidodinamico sono state tollerate per un ordine di grandezza massimo pari a $1 \cdot 10^{-9}$.

Il modello fluidodinamico impiegato degli stress di Reynolds (RSM) è stato implementato nello specifico all'interno dell'ambiente software ANSYS Fluent mantenendo inalterate tutte le costanti modellistiche predefinite, come impostate di default dal software stesso. L'accoppiamento tra velocità e pressione è stato stimato sfruttando l'algoritmo SIMPLEC. La valutazione dei gradienti numerici è stata risolta tramite ricorso al teorema di Green-

Gauss, mentre la discretizzazione spaziale di momento, stress di Reynolds, pressione, energia cinetica turbolenta e tasso di dissipazione turbolenta è stata considerata seguendo uno schema funzionale del secondo ordine (Second Order Upwind).

A titolo d'esempio viene infine di seguito schematicamente illustrata una sezione tipo opportunamente discretizzata con una griglia di "mesh" ai fini del calcolo modellistico:

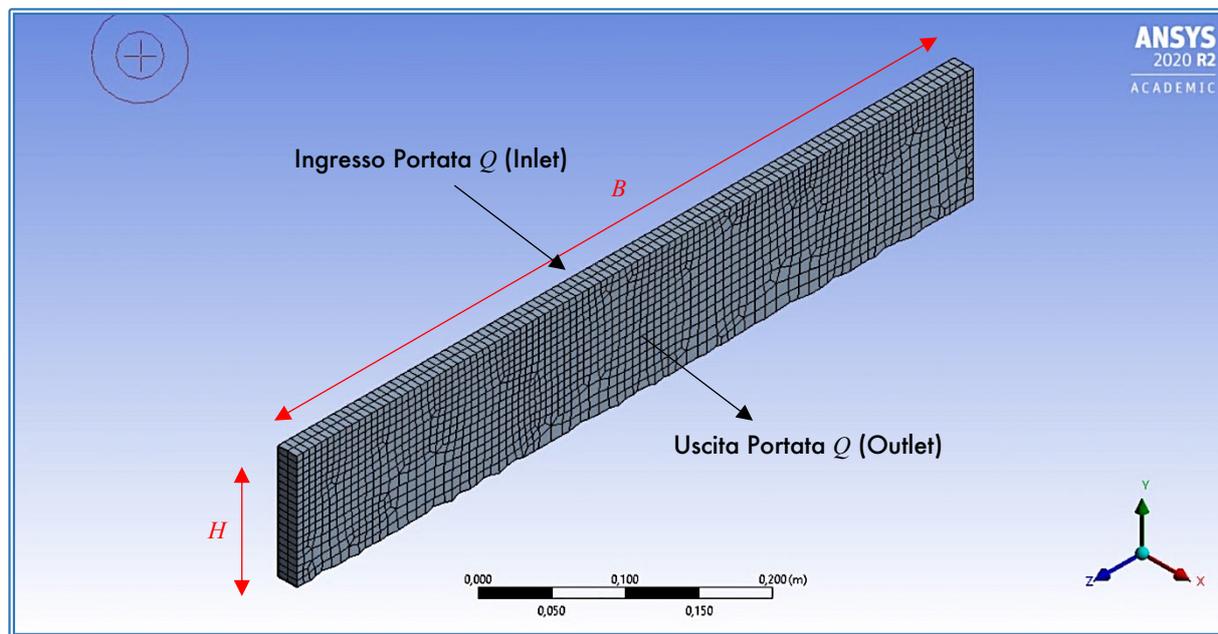


Fig. 3.1 – Rappresentazione nello spazio tridimensionale di una sezione tipo rettangolare con alveo irregolare appositamente costruita e impostata ai fini dell'esecuzione delle simulazioni numeriche nell'ambiente ANSYS Fluent

Viene di seguito proposto un riepilogo tabellare descrittivo di tutte le simulazioni numeriche eseguite ai fini del lavoro di tesi qui proposto, comprensivo delle diverse casistiche indagate e dei collegamenti utili ai riferimenti disponibili dalla letteratura scientifica esistente.

Le simulazioni sono state raccolte ed organizzate in quattro gruppi separati, a seconda delle differenti condizioni al contorno e della differente contestualizzazione in accordo con i medesimi riferimenti disponibili dalla letteratura scientifica esistente:

Nome/ Gruppo	Riferimento Letteratura	B [m]	B/H [m]	$Q \cdot \rho$ [kg/s]	d (alveo) [mm]	d (sponde) [mm]	θ [°]	Pressione – Deformazione	Note aggiuntive
Trap_AR_12_20_ Linear (Gruppo 1)	Hargreaves et al. (2011)	0.6	12	13.32	/ (Liscio)	/ (Liscio)	80	Lineare	Sezione Trapezoidale; Geometria alveo regolare
Trap_AR_12_20_ Quadratic (Gruppo 1)	Hargreaves et al. (2011)	0.6	12	13.32	/ (Liscio)	/ (Liscio)	80	Quadratico	Sezione Trapezoidale; Geometria alveo regolare
Trap_AR_18_20_ Linear (Gruppo 1)	Hargreaves et al. (2011)	0.9	18	20.33	/ (Liscio)	/ (Liscio)	80	Lineare	Sezione Trapezoidale; Geometria alveo regolare
Trap_AR_18_20_ Quadratic (Gruppo 1)	Hargreaves et al. (2011)	0.9	18	20.33	/ (Liscio)	/ (Liscio)	80	Quadratico	Sezione Trapezoidale; Geometria alveo regolare

Nome/ Gruppo	Riferimento Letteratura	B [m]	B/H [m]	$Q \cdot \rho$ [kg/s]	d (alveo) [mm]	d (sponde) [mm]	θ [°]	Pressione – Deformazione	Note aggiuntive
Rect_AR_12_00_ Linear (Gruppo 1)	Hargreaves et al. (2011)	0.6	12	12.75	/ (Liscio)	/ (Liscio)	90	Lineare	Sezione Rettangolare; Geometria alveo regolare
Rect_AR_12_00_ Quadratic (Gruppo 1)	Hargreaves et al. (2011)	0.6	12	12.75	/ (Liscio)	/ (Liscio)	90	Quadratico	Sezione Rettangolare; Geometria alveo regolare
Rect_AR_18_00_ Linear (Gruppo 1)	Hargreaves et al. (2011)	0.9	18	19.77	/ (Liscio)	/ (Liscio)	90	Lineare	Sezione Rettangolare; Geometria alveo regolare
Rect_AR_18_00_ Quadratic (Gruppo 1)	Hargreaves et al. (2011)	0.9	18	19.77	/ (Liscio)	/ (Liscio)	90	Quadratico	Sezione Rettangolare; Geometria alveo regolare
Rect_F11_90_00_ Linear (Gruppo 2)	Blanckaert et al. (2010)	1.3	11.8	57.18	2	/ (Liscio)	90	Lineare	Sezione Rettangolare; Geometria alveo regolare
Rect_F11_90_00_ Quadratic (Gruppo 2)	Blanckaert et al. (2010)	1.3	11.8	57.18	2	/ (Liscio)	90	Quadratico	Sezione Rettangolare; Geometria alveo regolare
Trap_F11_45_00_ Linear (Gruppo 2)	Blanckaert et al. (2010)	1.3	11.8	59.50	2	/ (Liscio)	45	Lineare	Sezione Trapezoidale; Geometria alveo regolare
Trap_F11_45_00_ Quadratic (Gruppo 2)	Blanckaert et al. (2010)	1.3	11.8	59.50	2	/ (Liscio)	45	Quadratico	Sezione Trapezoidale; Geometria alveo regolare
Rect_F16_90_00_ Linear (Gruppo 2)	Blanckaert et al. (2010)	1.3	8.1	83.05	2	/ (Liscio)	90	Lineare	Sezione Rettangolare; Geometria alveo regolare
Rect_F16_90_00_ Quadratic (Gruppo 2)	Blanckaert et al. (2010)	1.3	8.1	83.05	2	/ (Liscio)	90	Quadratico	Sezione Rettangolare; Geometria alveo regolare
Trap_F16_45_00_ Linear (Gruppo 2)	Blanckaert et al. (2010)	1.3	8.1	88.26	2	/ (Liscio)	45	Lineare	Sezione Trapezoidale; Geometria alveo regolare
Trap_F16_45_00_ Quadratic (Gruppo 2)	Blanckaert et al. (2010)	1.3	8.1	88.26	2	/ (Liscio)	45	Quadratico	Sezione Trapezoidale; Geometria alveo regolare
Rect_F8_90_00_ Quadratic (Gruppo 3)	Sung–UK Choi et al. (2010)	0.6 : 2 (0.3)	8	11	Variabile: 2.55 o 0	/ (Liscio)	90	Quadratico	Metà sezione rettangolare; Geometria alveo regolare con porzioni alterne lisce o scabre di larghezza 75 cm
Rect_F11_90_00_ SL NA Linear (Gruppo 4)	/	1.3	11.8	60	2	/ (Liscio)	90	Lineare	Sezione rettangolare; Geometria alveo irregolare con porzioni alterne a pendenza del 3% positiva/negativa

Nome/ Gruppo	Riferimento Letteratura	B [m]	B/H [m]	$Q \cdot \rho$ [kg/s]	d (alveo) [mm]	d (sponde) [mm]	θ [°]	Pressione – Deformazione	Note aggiuntive
Rect_F11_90_00_ SL_NA_Quadratc (Gruppo 4)	/	1.3	11.8	60	2	/ (Liscio)	90	Quadratico	Sezione rettangolare; Geometria alveo irregolare con porzioni alterne a pendenza del 3% positiva/negativa
Rect_F11_90_00_ SL_A_Linear (Gruppo 4)	/	1.3	11.8	60	2	/ (Liscio)	90	Lineare	Sezione rettangolare; Geometria alveo irregolare con porzioni alterne lisce o scabre a pendenza del 3% positiva/negativa
Rect_F11_90_00_ SL_A_Quadratic (Gruppo 4)	/	1.3	11.8	60	2	/ (Liscio)	90	Quadratico	Sezione rettangolare; Geometria alveo irregolare con porzioni alterne lisce o scabre a pendenza del 3% positiva/negativa
Rect_F11_90_00_ 2mm_Linear (Gruppo 4)	/	1.3 : 2 (0.65)	11.8	30	2	/ (Liscio)	90	Lineare	Metà sezione rettangolare; Geometria alveo irregolare con variazioni casuali in direzione perpendicolare all'alveo stesso di entità massima pari a 5mm
Rect_F11_90_00_ 2mm_Quadratic (Gruppo 4)	/	1.3 : 2 (0.65)	11.8	30	2	/ (Liscio)	90	Quadratico	Metà sezione rettangolare; Geometria alveo irregolare con variazioni casuali in direzione perpendicolare all'alveo stesso di entità massima pari a 5mm
Rect_F16_90_00_ 2mm_Linear (Gruppo 4)	/	1.3 : 2 (0.65)	8.1	42	2	/ (Liscio)	90	Lineare	Metà sezione rettangolare; Geometria alveo irregolare con variazioni casuali in direzione perpendicolare all'alveo stesso di entità massima pari a 5mm
Rect_F16_90_00_ 2mm_Quadratic (Gruppo 4)	/	1.3 : 2 (0.65)	8.1	42	2	/ (Liscio)	90	Quadratico	Metà sezione rettangolare; Geometria alveo irregolare con variazioni casuali in direzione perpendicolare all'alveo stesso di entità massima pari a 5mm



4. Compendio, confronto e discussione dei risultati finali

Adottando i criteri e le scelte operative e modellistiche elencate in precedenza, le simulazioni numeriche eseguite all'interno dell'ambiente di lavoro fornito dal software commerciale ANSYS Fluent, hanno fornito i risultati grafici e numerici di seguito riepilogati e brevemente discussi a seconda delle differenti casistiche di studio esaminate.

Più specificatamente, vengono illustrati e analizzati gli output computazionali relativi alla riproduzione modellistica delle linee di flusso relative all'andamento e configurazione spaziale assunta dalle correnti secondarie del secondo tipo in direzione ortogonale rispetto a quella principale di avanzamento dell'acqua, nonché delle distribuzioni assunte dagli sforzi di taglio generati lungo la parete inferiore al contorno rappresentativa dell'alveo di fondo, evidenziandone le possibili interdipendenze e correlazioni:

- Gruppo 1

Prendendo in considerazione, in qualità di riferimento utile di partenza, l'insieme delle simulazioni e dei risultati computazionali contenuti nel lavoro di Hargreaves et al.: Numerical Investigation into Secondary Currents and Wall Shear in Trapezoidal Channels, 2011, i seguenti risultati sono stati ottenuti, messi a confronto ed opportunamente verificati, al fine di fornire un efficace riscontro per il corretto svolgimento delle successive simulazioni:

- Trap_AR12_20_Linear

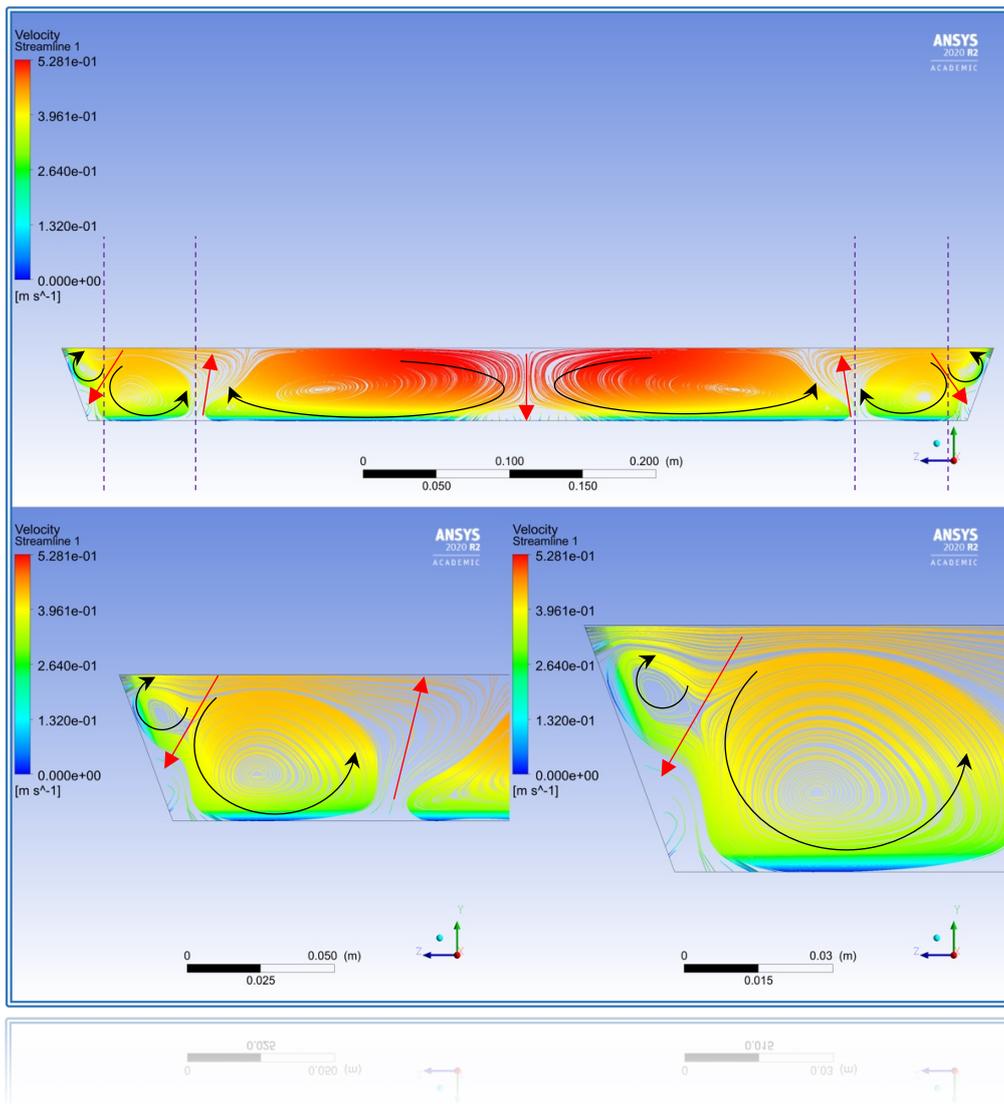


Fig. 4.1 – Configurazione delle linee di flusso che descrivono la struttura multicellulare delle correnti secondarie in relazione alla distribuzione spaziale della velocità longitudinale – Velocity 1 (Trap_AR12_20_Linear)

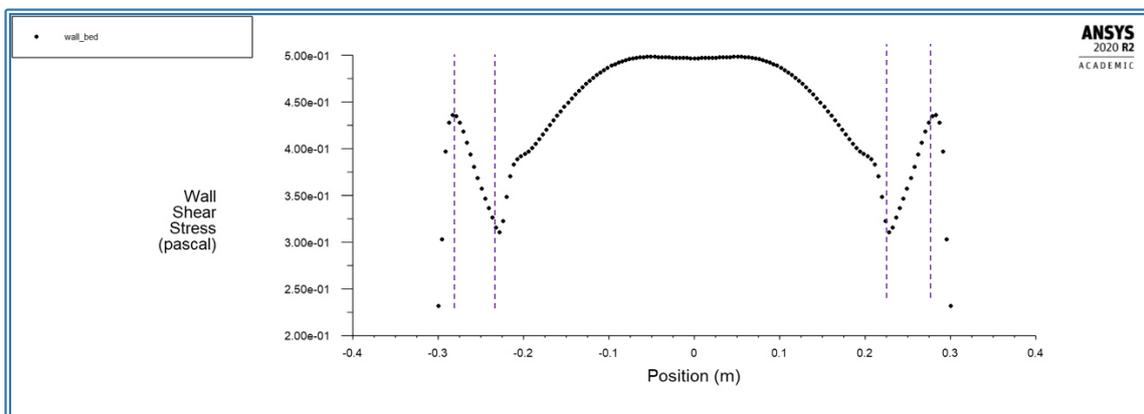


Fig. 4.2 – Distribuzione degli sforzi di taglio τ_b lungo l'estensione orizzontale della parete che costituisce il limite inferiore della sezione geometrica, corrispondente all'alveo di fondo (Trap_AR12_20_Linear)

Tab. 4.1 – Confronto e verifica dei risultati ottenuti tramite simulazione implementata su ANSYS Fluent, in basso, e derivanti dai dati di riferimento all'interno del lavoro di Hargreaves et al., 2011, relativi ai valori rispettivamente dagli sforzi di taglio medi sulle pareti laterali, $\tau_w, average$ e sull'alveo di fondo, $\tau_b, average$ (Trap_AR12_20_Linear)

Slant angle (Degrees)	Aspect ratio (b/h)	Bed roughness (mm)	$\bar{\tau}_b$ (Pa)	$\bar{\tau}_w$ (Pa)	$b\bar{\tau}_b$ (N/m)	$2h\bar{\tau}_w$ (N/m)	$b\bar{\tau}_b + 2h\bar{\tau}_w$ (N/m)	ρgSA (N/m)	Difference ^a (%)
20	2	0.0015	0.279	0.280	0.028	0.030	0.058	0.058	0.29
20	4	0.0015	0.353	0.337	0.071	0.036	0.106	0.107	0.21
20	8	0.0015	0.414	0.362	0.166	0.039	0.204	0.205	0.15
20	12	0.0015	0.438	0.365	0.263	0.039	0.302	0.302	0.14
20	18	0.0015	0.455	0.365	0.410	0.039	0.449	0.449	0.11
20	24	0.0015	0.464	0.366	0.556	0.039	0.595	0.596	0.1
20	36	0.0015	0.472	0.366	0.849	0.039	0.888	0.889	0.09
20	48	0.0015	0.476	0.489	1.143	0.052	1.195	1.183	1.02
45	18	0.2	0.466	0.317	0.419	0.045	0.464	0.465	0.09
60	4	0.4	0.424	0.275	0.085	0.055	0.140	0.140	0.17

$\tau_b, average$ (Fluent)	$\tau_w, average$ (Fluent)
0.437	0.367

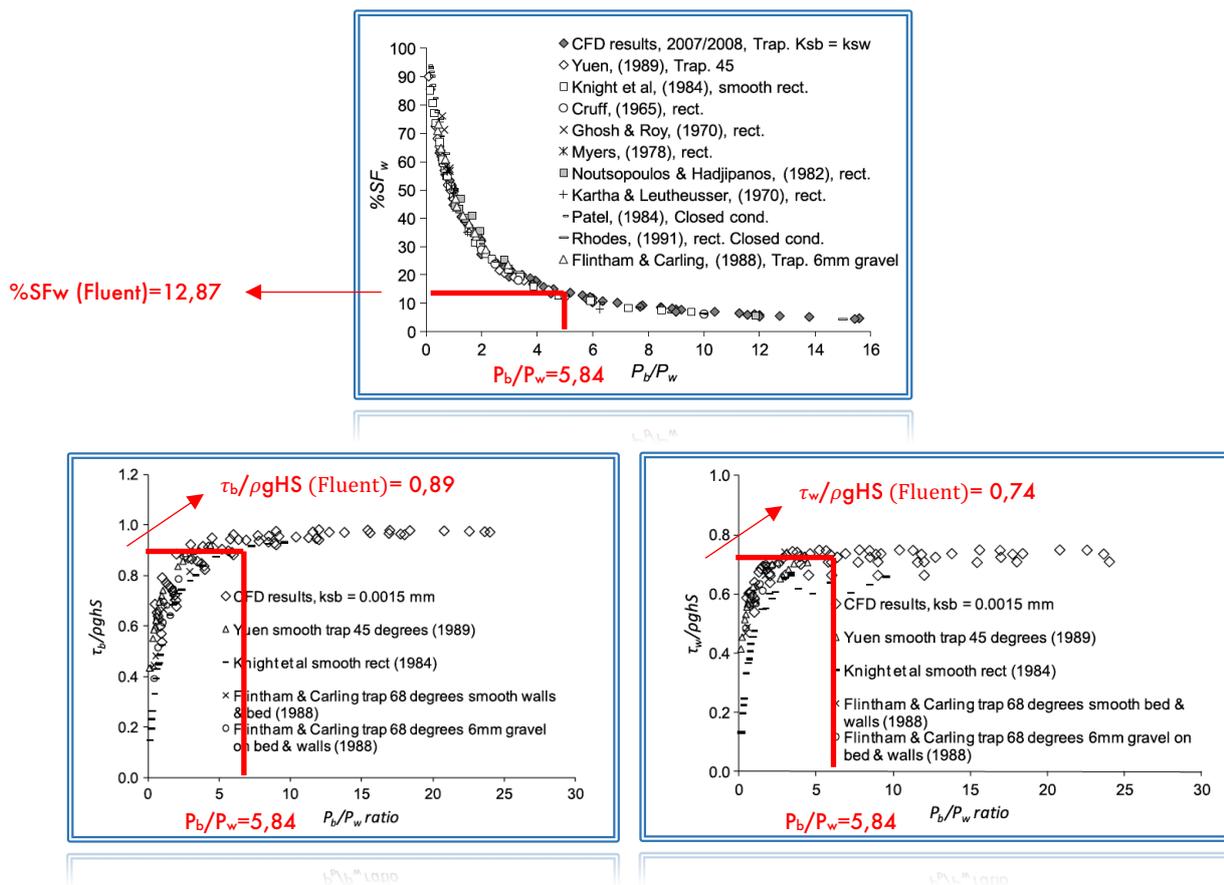


Fig. 4.3 – Verifica dei risultati di simulazione implementata su ANSYS Fluent mediante confronto diretto con trend grafici di riferimento all'interno del lavoro di Hargreaves et al., 2011, (Trap_AR12_20_Linear)

(%SF_w: Percentuale della forza di taglio alle pareti laterali sulla forza di taglio totale)
 $(\tau_b/\rho gHS$ e $\tau_w/\rho gHS$: Media adimensionale degli sforzi di taglio sull'alveo di fondo e sulle pareti laterali)
 $(P_b/P_w$: Rapporto tra perimetro bagnato dell'alveo di fondo e delle pareti laterali $\rightarrow \approx$)

- Trap_AR12_20_Quadratic

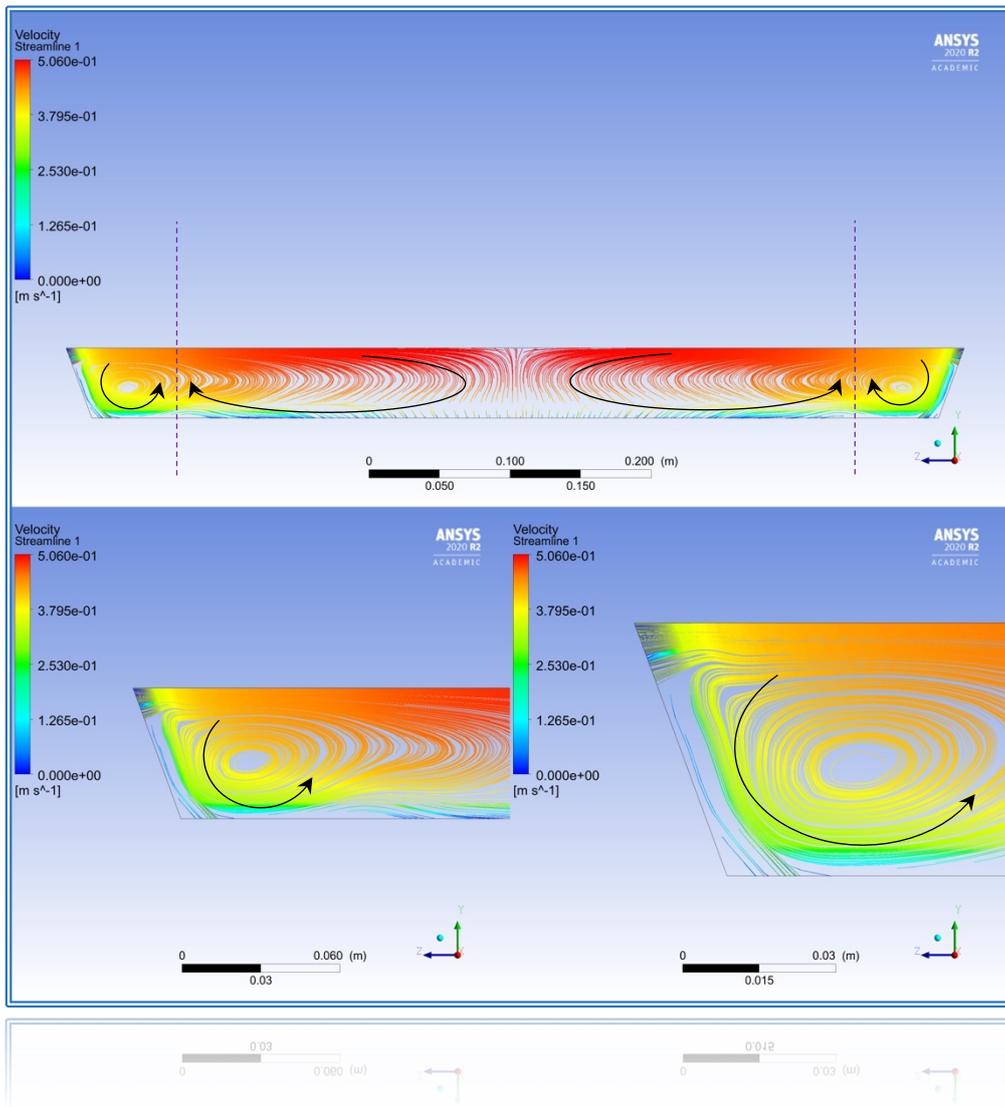


Fig. 4.4 – Configurazione delle linee di flusso che descrivono la struttura multicellulare delle correnti secondarie in relazione alla distribuzione spaziale della velocità longitudinale – Velocity 1 (Trap_AR12_20_Quadratic)

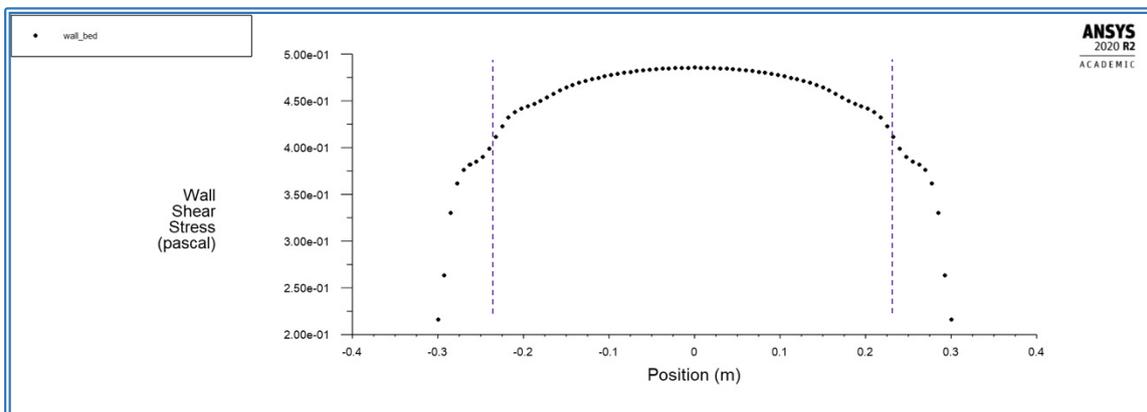


Fig. 4.5 – Distribuzione degli sforzi di taglio τ_b lungo l'estensione orizzontale della parete che costituisce il limite inferiore della sezione geometrica, corrispondente all'alveo di fondo (Trap_AR12_20_Quadratic)

Tab. 4.2 – Confronto e verifica dei risultati ottenuti tramite simulazione implementata su ANSYS Fluent, in basso, e derivanti dai dati di riferimento all'interno del lavoro di Hargreaves et al., 2011, relativi ai valori rispettivamente dagli sforzi di taglio medi sulle pareti laterali, $\tau_{w, average}$ e sull'alveo di fondo, $\tau_b, average$ (Trap_AR12_20_Quadratic)

Slant angle (Degrees)	Aspect ratio (b/h)	Bed roughness (mm)	$\bar{\tau}_b$ (Pa)	$\bar{\tau}_w$ (Pa)	$b\bar{\tau}_b$ (N/m)	$2h\bar{\tau}_w$ (N/m)	$b\bar{\tau}_b + 2h\bar{\tau}_w$ (N/m)	ρgSA (N/m)	Difference ^a (%)
20	2	0.0015	0.279	0.280	0.028	0.030	0.058	0.058	0.29
20	4	0.0015	0.353	0.337	0.071	0.036	0.106	0.107	0.21
20	8	0.0015	0.414	0.362	0.166	0.039	0.204	0.205	0.15
20	12	0.0015	0.438	0.365	0.263	0.039	0.302	0.302	0.14
20	18	0.0015	0.455	0.365	0.410	0.039	0.449	0.449	0.11
20	24	0.0015	0.464	0.366	0.556	0.039	0.595	0.596	0.1
20	36	0.0015	0.472	0.366	0.849	0.039	0.888	0.889	0.09
20	48	0.0015	0.476	0.489	1.143	0.052	1.195	1.183	1.02
45	18	0.2	0.466	0.317	0.419	0.045	0.464	0.465	0.09
60	4	0.4	0.424	0.275	0.085	0.055	0.140	0.140	0.17

$\tau_b, average$ (Fluent)	$\tau_w, average$ (Fluent)
0.441	0.366

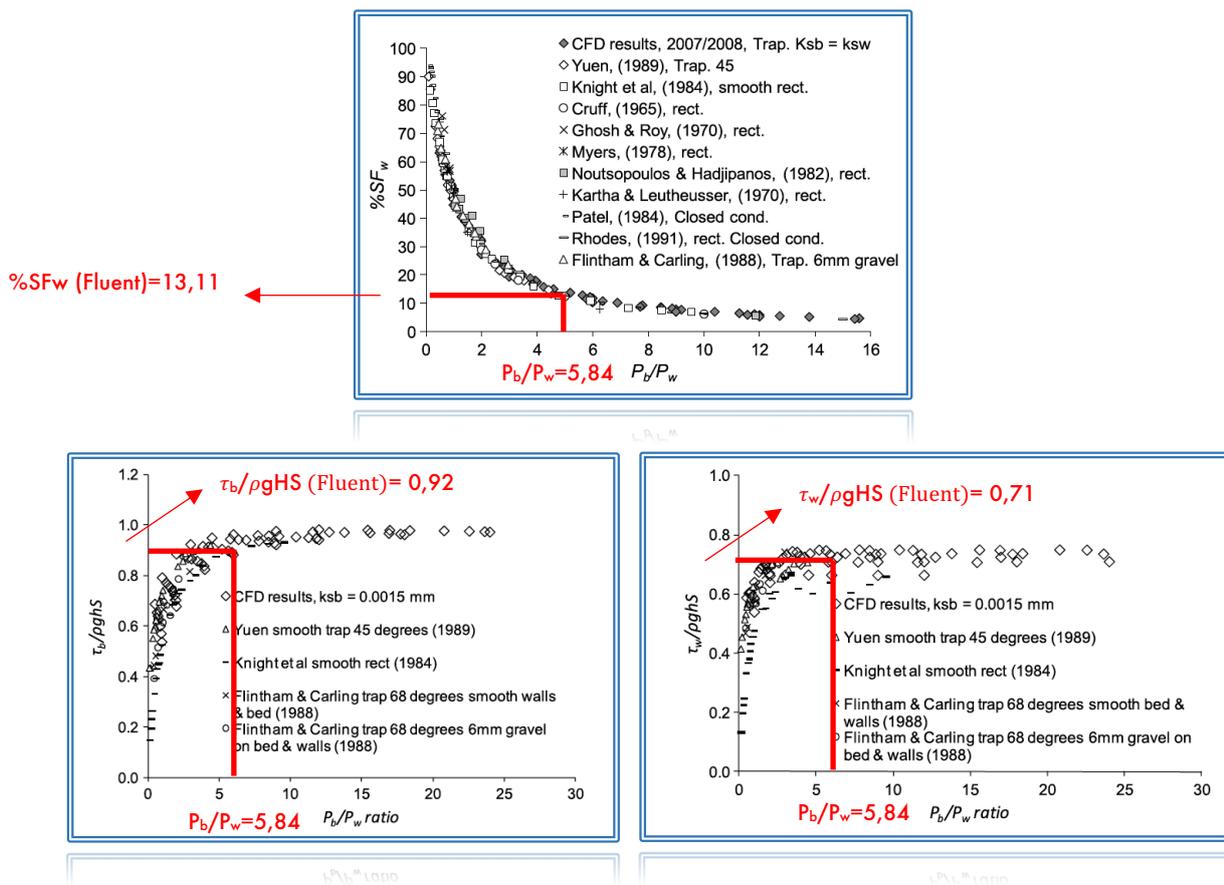


Fig. 4.6 – Verifica dei risultati di simulazione implementata su ANSYS Fluent mediante confronto numerico diretto con i dati grafici di riferimento all'interno del lavoro di Hargreaves et al., 2011, (Trap_AR12_20_Quadratic)
 (%SF_w: Percentuale della forza di taglio alle pareti laterali sulla forza di taglio totale)
 ($\tau_b/\rho gHS$ e $\tau_w/\rho gHS$: Media normalizzata degli sforzi di taglio sull'alveo di fondo e sulle pareti laterali)
 (P_b/P_w : Rapporto tra perimetro bagnato dell'alveo di fondo e delle pareti laterali → ≈)

- Trap_AR18_20_Linear

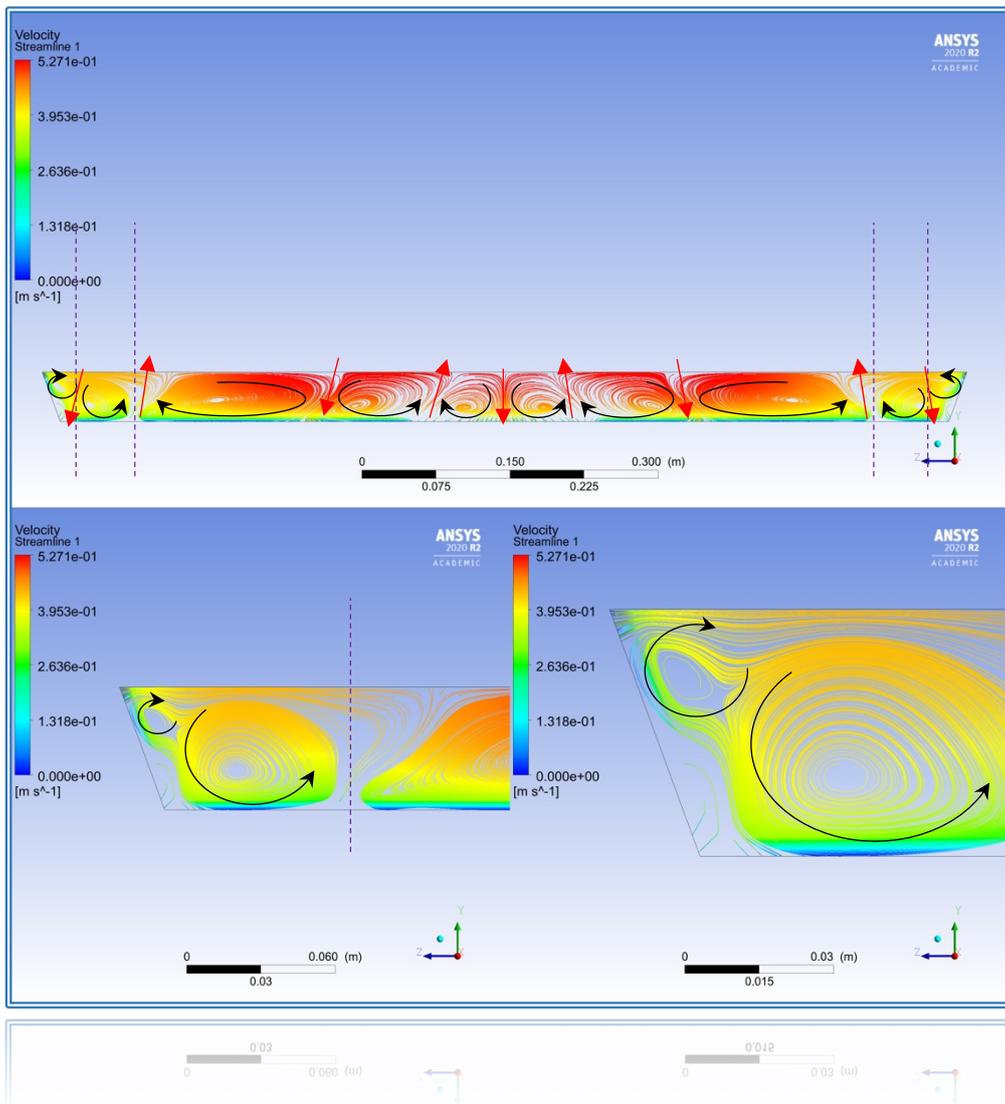


Fig. 4.7 – Configurazione delle linee di flusso che descrivono la struttura multicellulare delle correnti secondarie in relazione alla distribuzione spaziale della velocità longitudinale – Velocity 1 (Trap_AR18_20_Linear)

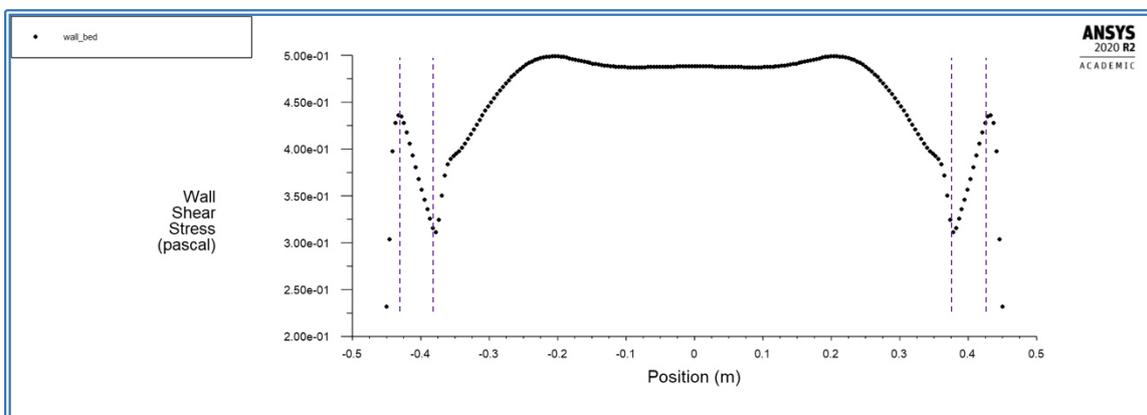


Fig. 4.8 – Distribuzione degli sforzi di taglio τ_b lungo l'estensione orizzontale della parete che costituisce il limite inferiore della sezione geometrica, corrispondente all'alveo di fondo (Trap_AR18_20_Linear)

Tab. 4.3 – Confronto e verifica dei risultati ottenuti tramite simulazione implementata su ANSYS Fluent, in basso, e derivanti dai dati di riferimento all'interno del lavoro di Hargreaves et al., 2011, relativi ai valori rispettivamente dagli sforzi di taglio medi sulle pareti laterali, $\tau_w, average$ e sull'alveo di fondo, $\tau_b, average$ (Trap_AR18_20_Linear)

Slant angle (Degrees)	Aspect ratio (b/h)	Bed roughness (mm)	$\bar{\tau}_b$ (Pa)	$\bar{\tau}_w$ (Pa)	$b\bar{\tau}_b$ (N/m)	$2h\bar{\tau}_w$ (N/m)	$b\bar{\tau}_b + 2h\bar{\tau}_w$ (N/m)	ρgSA (N/m)	Difference ^a (%)
20	2	0.0015	0.279	0.280	0.028	0.030	0.058	0.058	0.29
20	4	0.0015	0.353	0.337	0.071	0.036	0.106	0.107	0.21
20	8	0.0015	0.414	0.362	0.166	0.039	0.204	0.205	0.15
20	12	0.0015	0.438	0.365	0.263	0.039	0.302	0.302	0.14
20	18	0.0015	0.455	0.365	0.410	0.039	0.449	0.449	0.11
20	24	0.0015	0.464	0.366	0.556	0.039	0.595	0.596	0.1
20	36	0.0015	0.472	0.366	0.849	0.039	0.888	0.889	0.09
20	48	0.0015	0.476	0.489	1.143	0.052	1.195	1.183	1.02
45	18	0.2	0.466	0.317	0.419	0.045	0.464	0.465	0.09
60	4	0.4	0.424	0.275	0.085	0.055	0.140	0.140	0.17

$\tau_b, average$ (Fluent)	$\tau_w, average$ (Fluent)
0.454	0.368

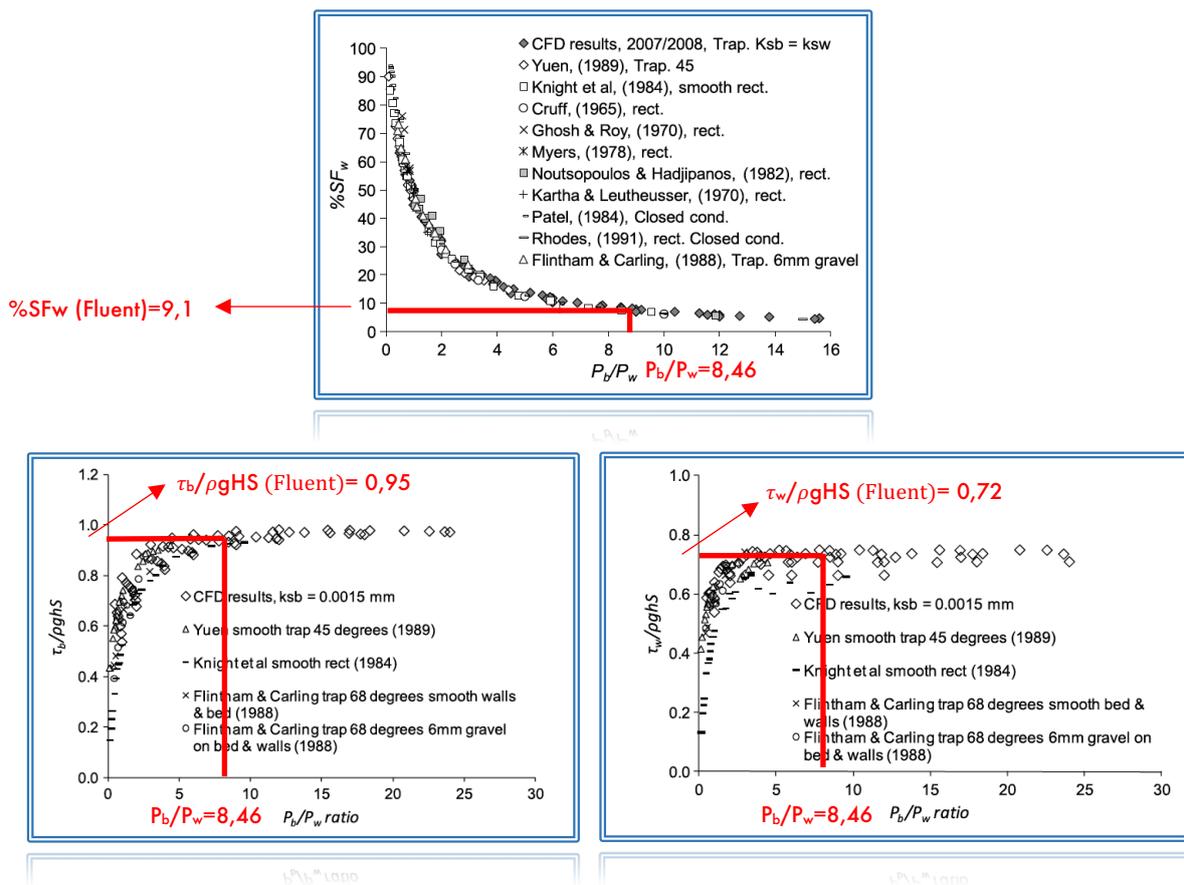


Fig. 4.9 – Verifica dei risultati di simulazione implementata su ANSYS Fluent mediante confronto numerico diretto con i dati grafici di riferimento all'interno del lavoro di Hargreaves et al., 2011, (Trap_AR18_20_Linear)
 (%SF_w: Percentuale della forza di taglio alle pareti laterali sulla forza di taglio totale)
 ($\tau_b / \rho gHS$ e $\tau_w / \rho gHS$: Media normalizzata degli sforzi di taglio sull'alveo di fondo e sulle pareti laterali)
 (P_b / P_w : Rapporto tra perimetro bagnato dell'alveo di fondo e delle pareti laterali → ≈)

- Trap_AR18_20_Quadratic

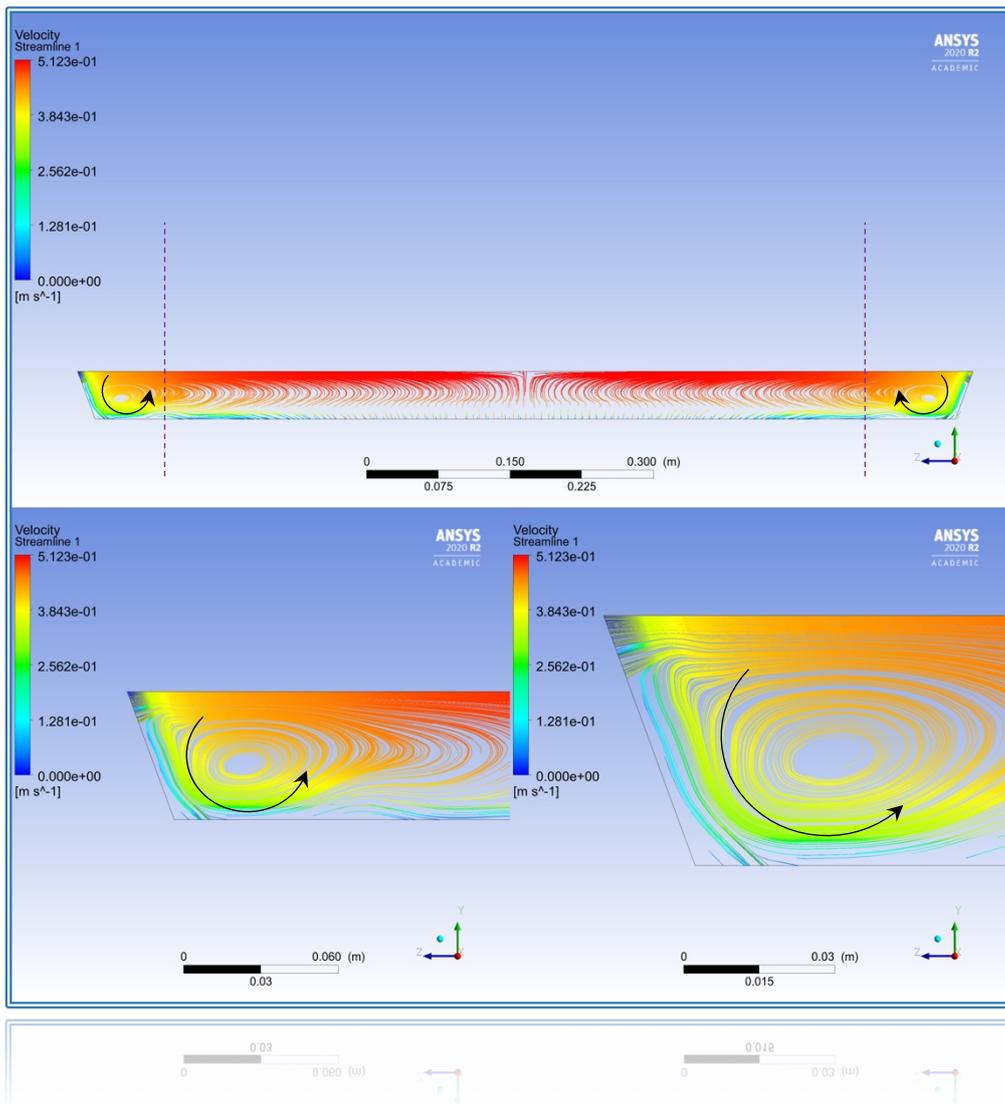


Fig. 4.10 – Configurazione delle linee di flusso che descrivono la struttura multicellulare delle correnti secondarie in relazione alla distribuzione spaziale della velocità longitudinale – Velocity 1 (Trap_AR18_20_Quadratic)

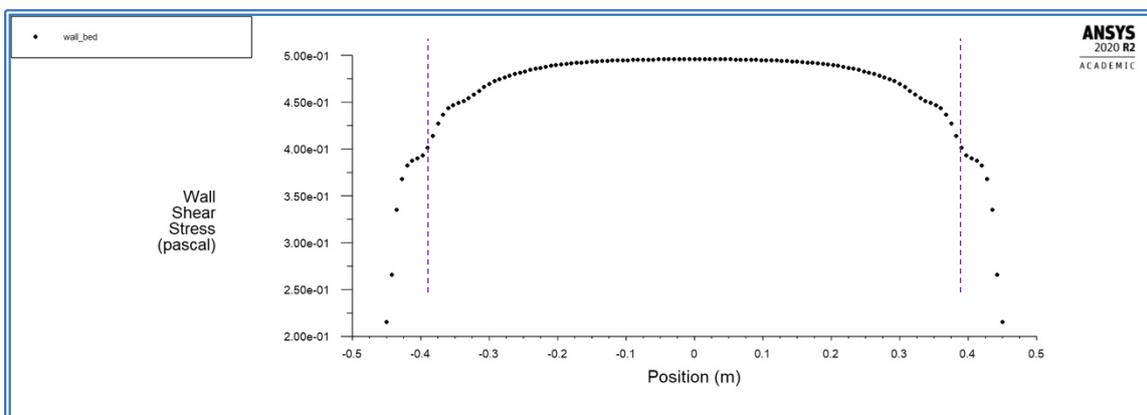


Fig. 4.11 – Distribuzione degli sforzi di taglio τ_b lungo l'estensione orizzontale della parete che costituisce il limite inferiore della sezione geometrica, corrispondente all'alveo di fondo (Trap_AR18_20_Quadratic)

Tab. 4.4 – Confronto e verifica dei risultati ottenuti tramite simulazione implementata su ANSYS Fluent, in basso, e derivanti dai dati di riferimento all'interno del lavoro di Hargreaves et al., 2011, relativi ai valori rispettivamente dagli sforzi di taglio medi sulle pareti laterali, $\tau_w, average$ e sull'alveo di fondo, $\tau_b, average$ (Trap_AR18_20_Quadratic)

Slant angle (Degrees)	Aspect ratio (b/h)	Bed roughness (mm)	$\bar{\tau}_b$ (Pa)	$\bar{\tau}_w$ (Pa)	$b\bar{\tau}_b$ (N/m)	$2h\bar{\tau}_w$ (N/m)	$b\bar{\tau}_b + 2h\bar{\tau}_w$ (N/m)	ρgSA (N/m)	Difference ^a (%)
20	2	0.0015	0.279	0.280	0.028	0.030	0.058	0.058	0.29
20	4	0.0015	0.353	0.337	0.071	0.036	0.106	0.107	0.21
20	8	0.0015	0.414	0.362	0.166	0.039	0.204	0.205	0.15
20	12	0.0015	0.438	0.365	0.263	0.039	0.302	0.302	0.14
20	18	0.0015	0.455	0.365	0.410	0.039	0.449	0.449	0.11
20	24	0.0015	0.464	0.366	0.556	0.039	0.595	0.596	0.1
20	36	0.0015	0.472	0.366	0.849	0.039	0.888	0.889	0.09
20	48	0.0015	0.476	0.489	1.143	0.052	1.195	1.183	1.02
45	18	0.2	0.466	0.317	0.419	0.045	0.464	0.465	0.09
60	4	0.4	0.424	0.275	0.085	0.055	0.140	0.140	0.17

$\tau_b, average$ (Fluent)	$\tau_w, average$ (Fluent)
0.459	0.368

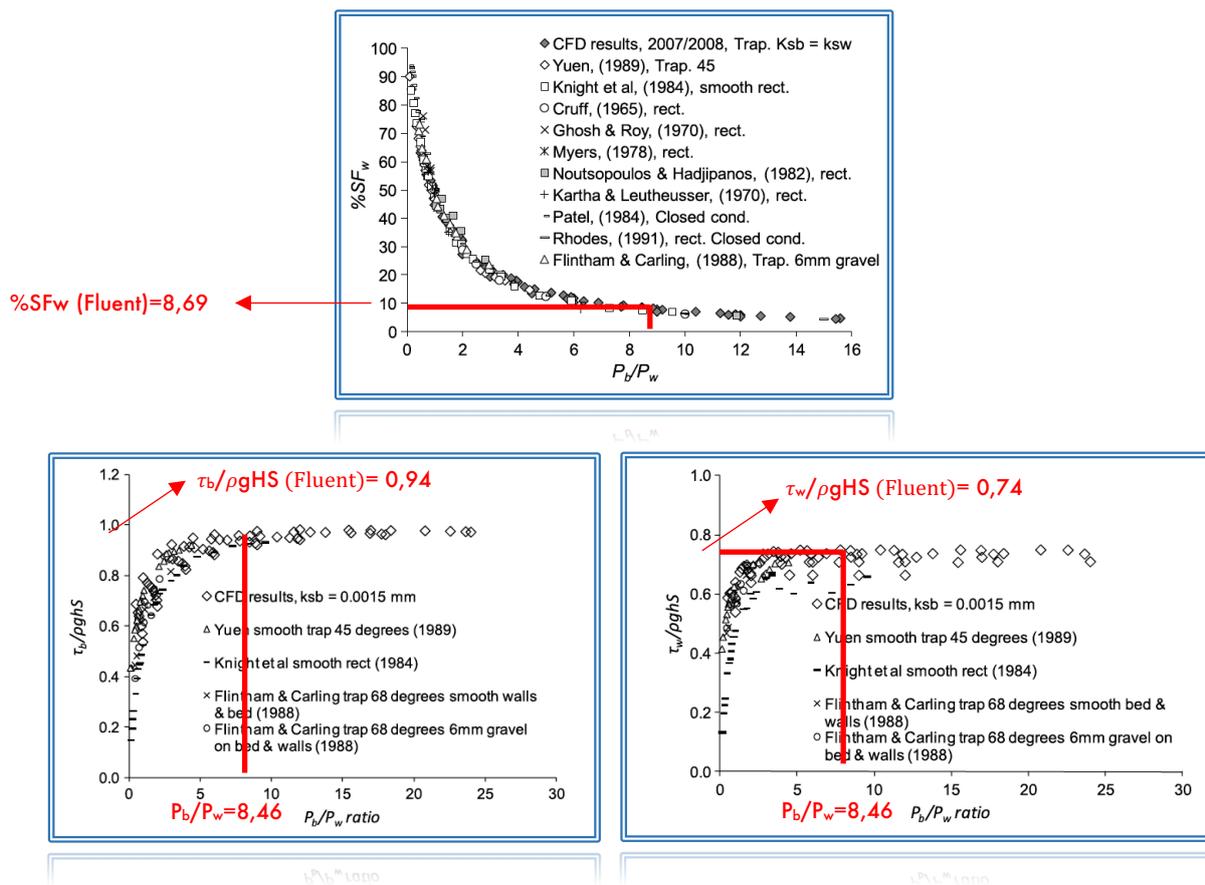


Fig. 4.12 – Verifica dei risultati di simulazione implementata su ANSYS Fluent mediante confronto numerico diretto con i dati grafici di riferimento all'interno del lavoro di Hargreaves et al., 2011, (Trap_AR18_20_Quadratic)
 (%SF_w: Percentuale della forza di taglio alle pareti laterali sulla forza di taglio totale)
 ($\tau_b/\rho gHS$ e $\tau_w/\rho gHS$: Media normalizzata degli sforzi di taglio sull'alveo di fondo e sulle pareti laterali)
 (P_b/P_w : Rapporto tra perimetro bagnato dell'alveo di fondo e delle pareti laterali $\rightarrow \approx$)

- Rect_AR12_00_Linear

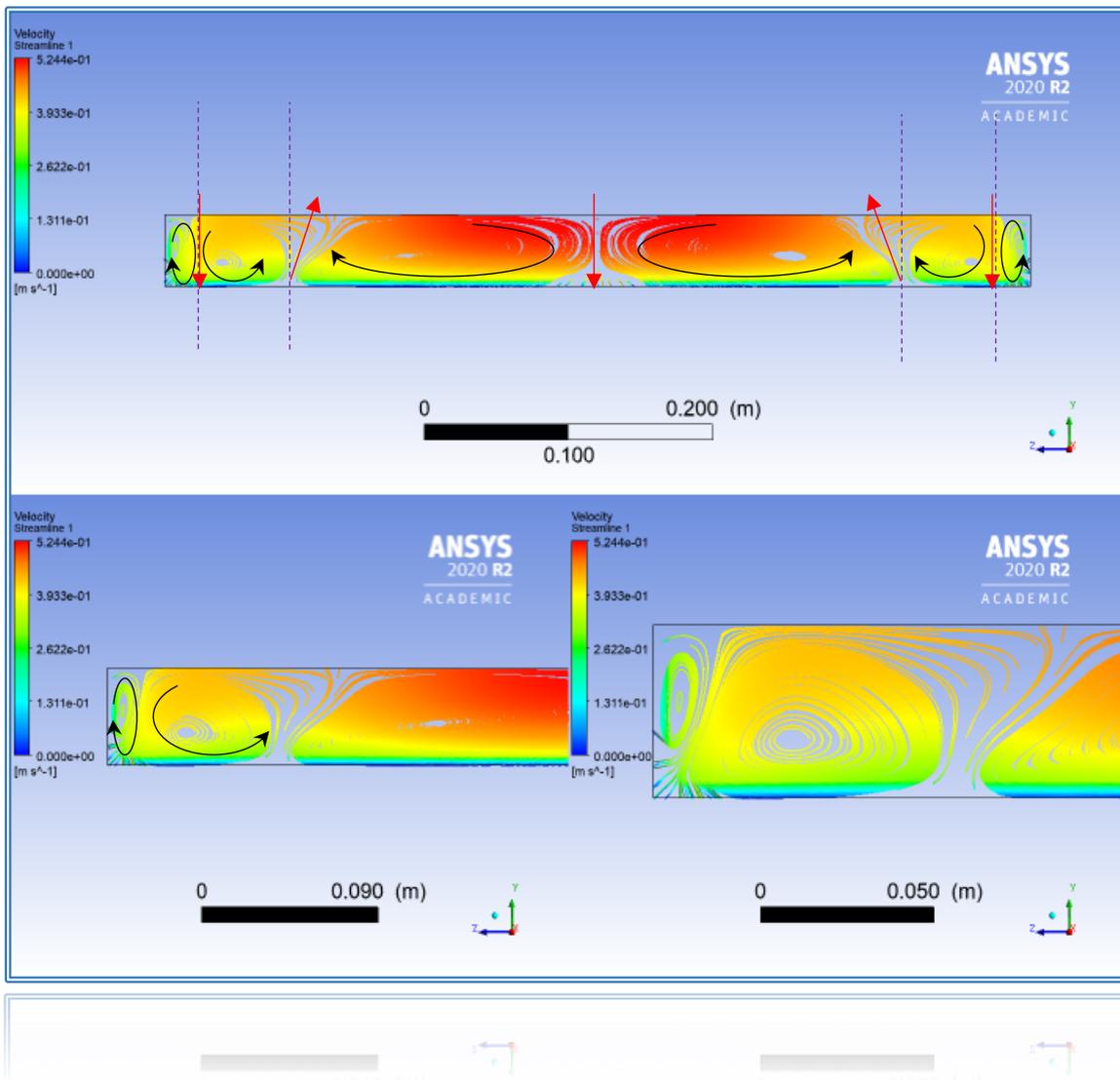


Fig. 4.13 – Configurazione delle linee di flusso che descrivono la struttura multicellulare delle correnti secondarie in relazione alla distribuzione spaziale della velocità longitudinale – Velocity 1 (Rect_AR12_00_Linear)

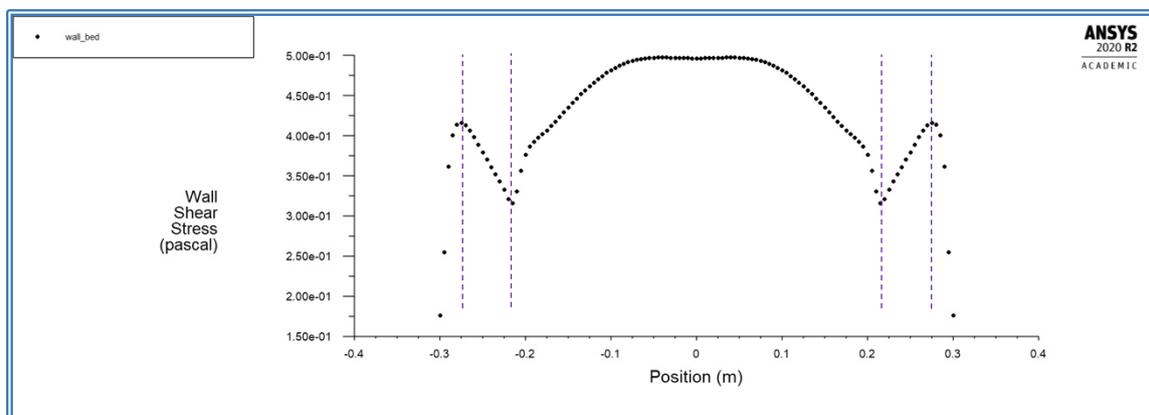


Fig. 4.14 – Distribuzione degli sforzi di taglio τ_b lungo l'estensione orizzontale della parete che costituisce il limite inferiore della sezione geometrica, corrispondente all'alveo di fondo (Rect_AR12_00_Linear)

- Rect_AR12_00_Quadratic

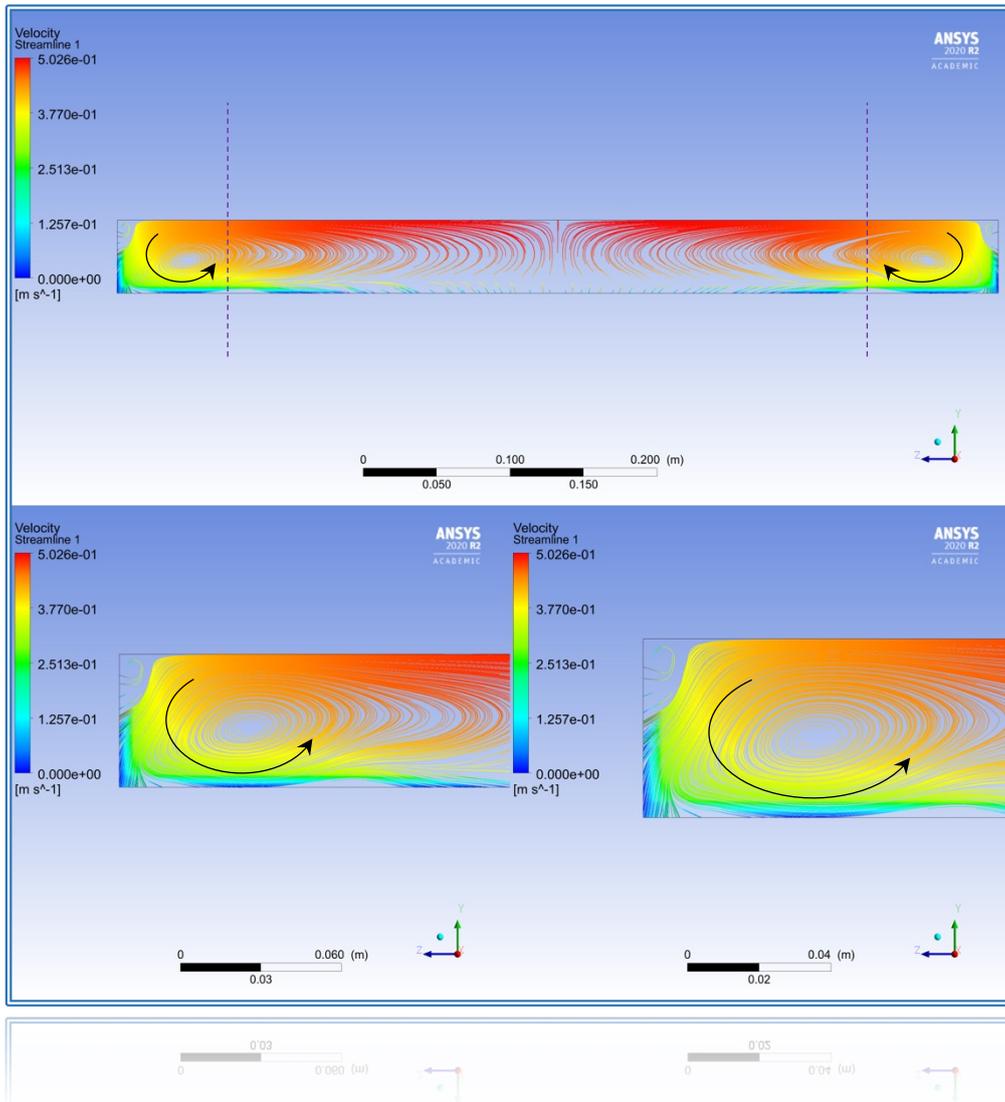


Fig. 4.15 – Configurazione delle linee di flusso che descrivono la struttura multicellulare delle correnti secondarie in relazione alla distribuzione spaziale della velocità longitudinale – Velocity 1 (Rect_AR12_00_Quadratic)

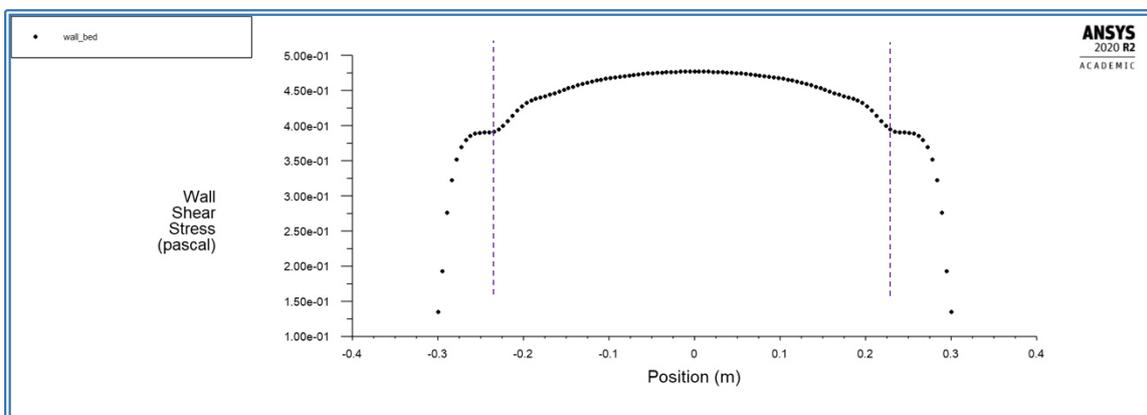


Fig. 4.16 – Distribuzione degli sforzi di taglio τ_b lungo l'estensione orizzontale della parete che costituisce il limite inferiore della sezione geometrica, corrispondente all'alveo di fondo (Rect_AR12_00_Quadratic)

- Rect_AR18_00_Linear

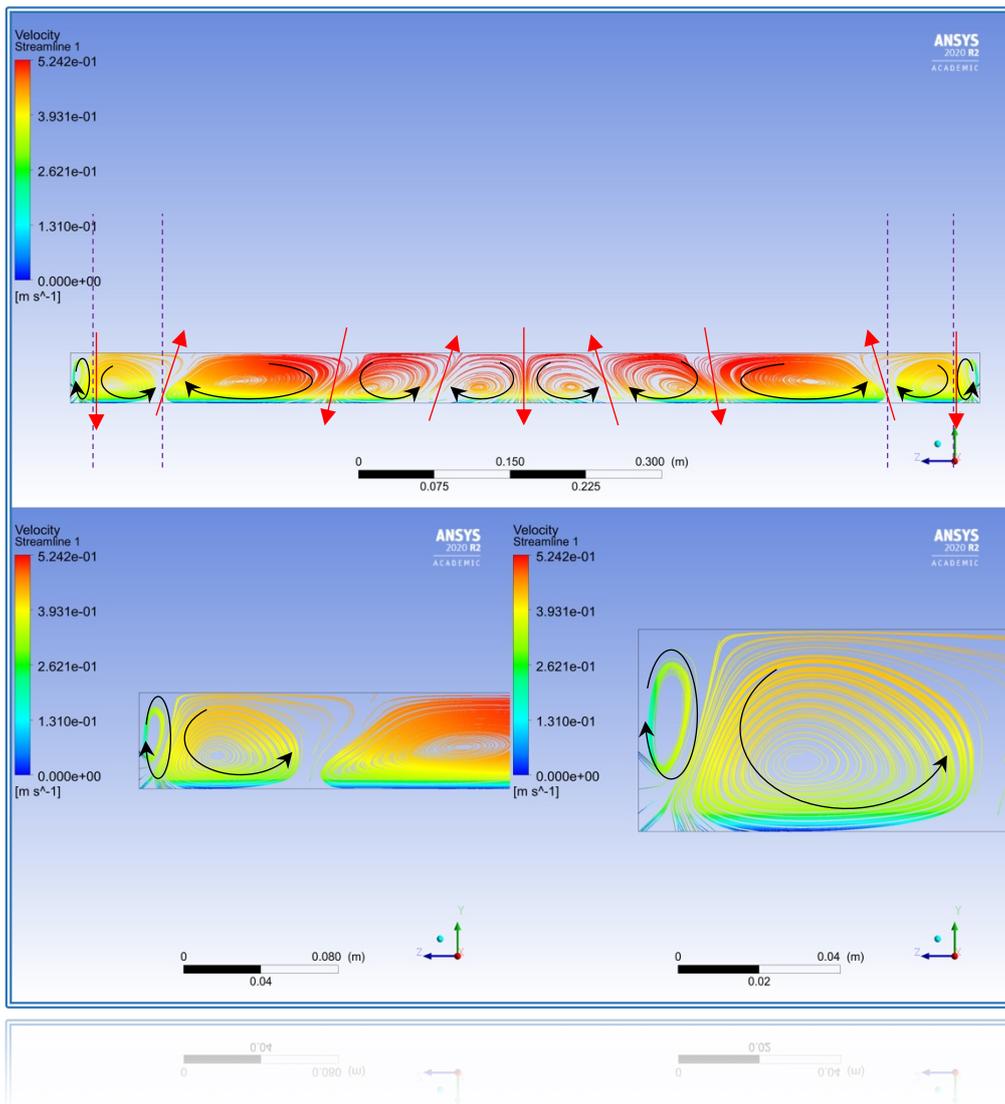


Fig. 4.17 – Configurazione delle linee di flusso che descrivono la struttura multicellulare delle correnti secondarie in relazione alla distribuzione spaziale della velocità longitudinale – Velocity 1 (Rect_AR18_00_Linear)

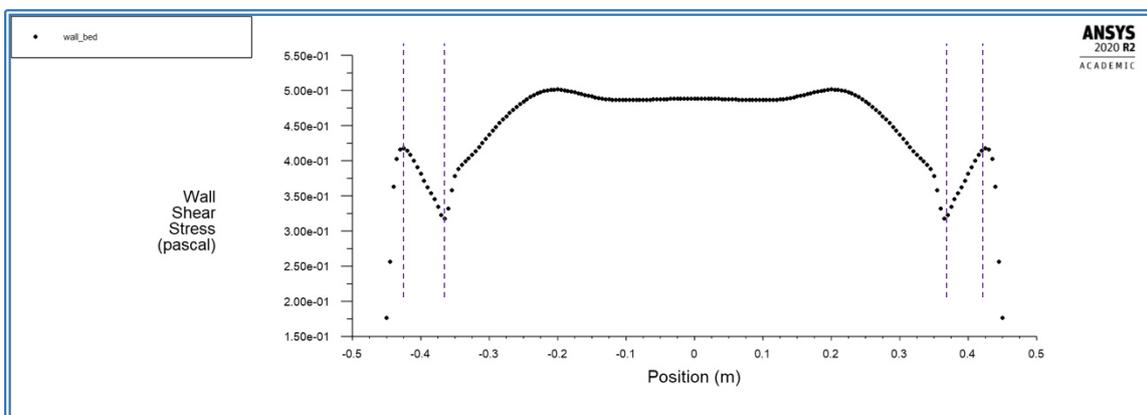


Fig. 4.18 – Distribuzione degli sforzi di taglio τ_b lungo l'estensione orizzontale della parete che costituisce il limite inferiore della sezione geometrica, corrispondente all'alveo di fondo (Rect_AR18_00_Linear)

- Rect_AR18_00_Quadratic

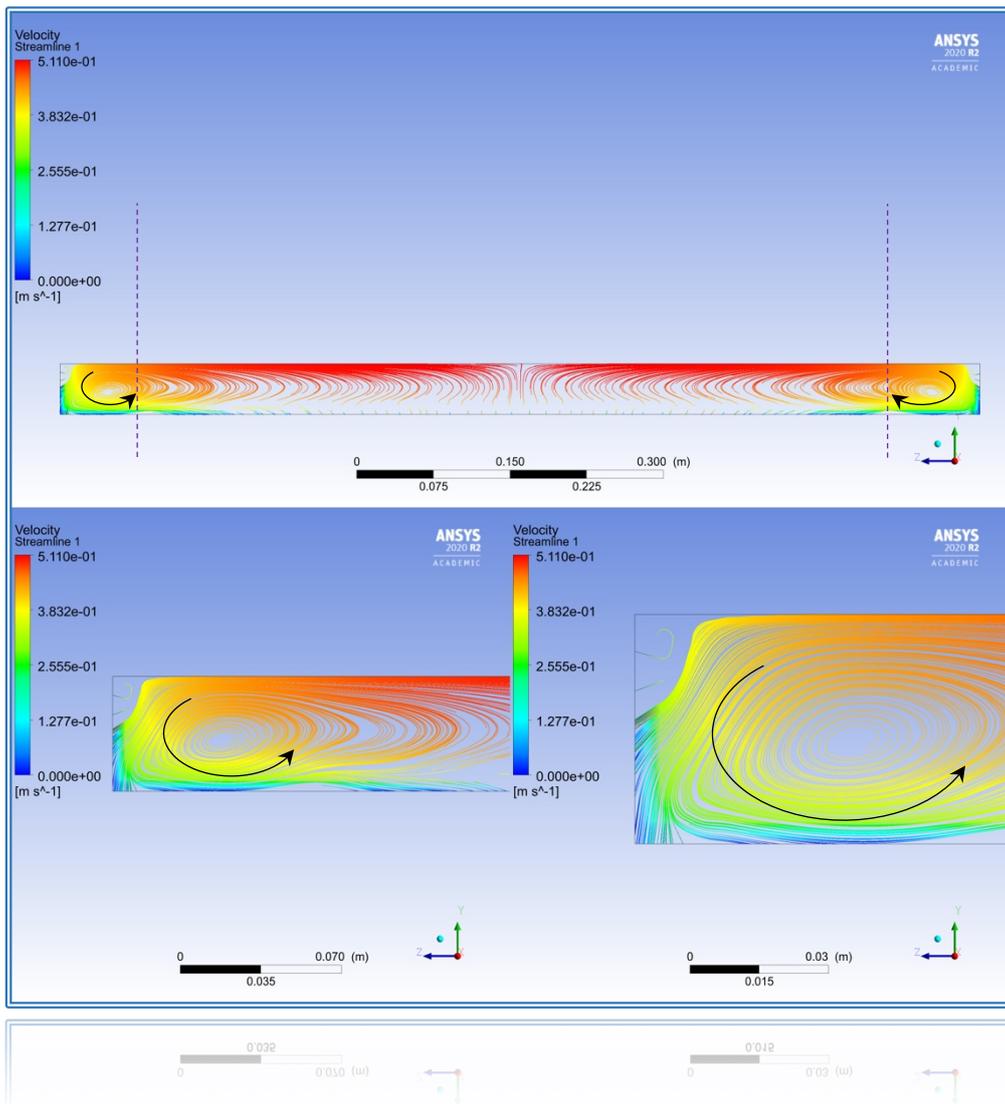


Fig. 4.19 – Configurazione delle linee di flusso che descrivono la struttura multicellulare delle correnti secondarie in relazione alla distribuzione spaziale della velocità longitudinale – Velocity 1 (Rect_AR18_00_Quadratic)

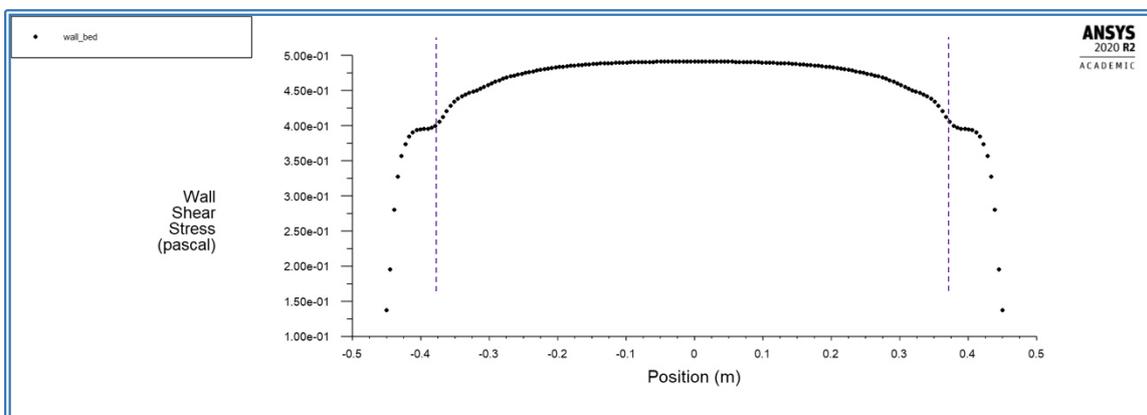


Fig. 4.20 – Distribuzione degli sforzi di taglio τ_b lungo l'estensione orizzontale della parete che costituisce il limite inferiore della sezione geometrica, corrispondente all'alveo di fondo (Rect_AR18_00_Quadratic)



Analizzando i risultati ottenuti attraverso le simulazioni implementate sul software ANSYS Fluent è possibile notare come sia riscontrabile una sostanziale conferma e concordanza con quanto asserito e giustificato all'interno del lavoro di Hargreaves et al.

Per quanto riguarda la configurazione spaziale acquisita dalle linee di flusso che fotografano l'andamento delle correnti secondarie nelle diverse sezioni bidimensionali di interesse adottate ed esaminate, si evidenzia una sostanziale differenza nel caso di modellizzazione del termine di deformazione-pressione (Pressure-Strain Term) secondo uno schema di tipo lineare o quadratico rispettivamente. A tal proposito, l'utilizzo dello schema lineare si associa nello specifico ad una scomposizione multipla e di natura multicellulare delle correnti secondarie lungo tutta l'estensione trasversale delle sezioni, con un accostamento reciproco e sequenziale in direzione orizzontale delle cosiddette strutture a cella. Quest'ultime tendono a creare delle rotazioni in senso orario ed antiorario, e conseguentemente dei punti di convergenza in virtù dei quali il moto dell'acqua risulta diretto rispettivamente verso la superficie libera, in alto, o verso l'alveo di fondo, in basso. L'impiego dello schema quadratico riconosce invece chiaramente la presenza esplicita delle medesime strutture a cella appena sopra citate solamente in prossimità ed in vicinanza delle pareti solide che limitano lateralmente i domini geometrici associati alle sezioni studiate, sia nel caso di forma di natura trapezoidale che rettangolare.

Tali considerazioni si collegano e si associano parallelamente ai risultati concernenti la distribuzione degli sforzi di taglio lungo l'estensione trasversale dell'alveo di fondo. Dai risultati ottenuti impostando il termine di deformazione-pressione (Pressure-Strain Term) lineare si identificano infatti distintamente dei picchi di minimo nell'andamento dei valori associati agli stessi sforzi di taglio, picchi localizzati in corrispondenza della convergenza tra la seconda e la terza struttura cellulare, a partire dalle pareti solide laterali, rappresentative del settore spaziale in cui le correnti secondarie tendono a dirigere il flusso trasversale dell'acqua verso la superficie libera, ovvero verso l'alto. Similmente, risultano inoltre evidenziabili, dei picchi invece positivi nei valori degli sforzi di taglio, in corrispondenza dei punti di convergenza delle strutture a cella immediatamente antecedenti e successivi, seguendo un andamento alternato, indicativi dei settori dove l'acqua tende a spostarsi verso l'alveo di fondo, ovvero verso il basso.

Nonostante la presenza e la ripetizione alternata delle strutture a cella lungo l'intera larghezza delle sezioni esaminate tuttavia, con un numero crescente delle stesse al crescere della medesima dimensione di larghezza, i picchi positivi e negativi direttamente associati alle distribuzioni degli sforzi di taglio risultano ben visibili esclusivamente in vicinanza delle pareti di sponda laterali, subendo un effetto di attenuamento procedendo verso la zona centrale delle sezioni indagate, indicativo di una decrescente intensità delle correnti secondarie all'allontanarsi progressivo dalle pareti stesse.

Esaminando i risultati ricavati impiegando il termine di deformazione-pressione (Pressure-Strain Term) quadratico al contrario, l'andamento degli sforzi di taglio lungo l'alveo di fondo risulta essere privo di particolari variazioni di andamento positive e/o negative rispetto al valore medio di riferimento, se non in vicinanza delle pareti dove si osserva una diminuzione dei valori seppur piuttosto contenuta.

- Gruppo 2

Esaminando e ponendo a confronto diretto i responsi finali derivanti dalle prove di laboratorio presentate nell'articolo scientifico di Banckaert et al.: Influence of shallowness, bank inclination and bank roughness on the variability of flow patterns and boundary shear stress due to secondary currents in straight open-channels, 2010, i risultati qui di seguito esposti sono stati ottenuti tramite opportuna implementazione ed esecuzione di diverse simulazioni numeriche mirate con l'intento specifico di emulare, riprodurre ed analizzare le configurazioni assunte dalle correnti secondarie nelle casistiche sperimentali di interesse, valutandone gli eventuali aspetti comuni e le possibili discrepanze:

- Rect_F11_90_00_Linear

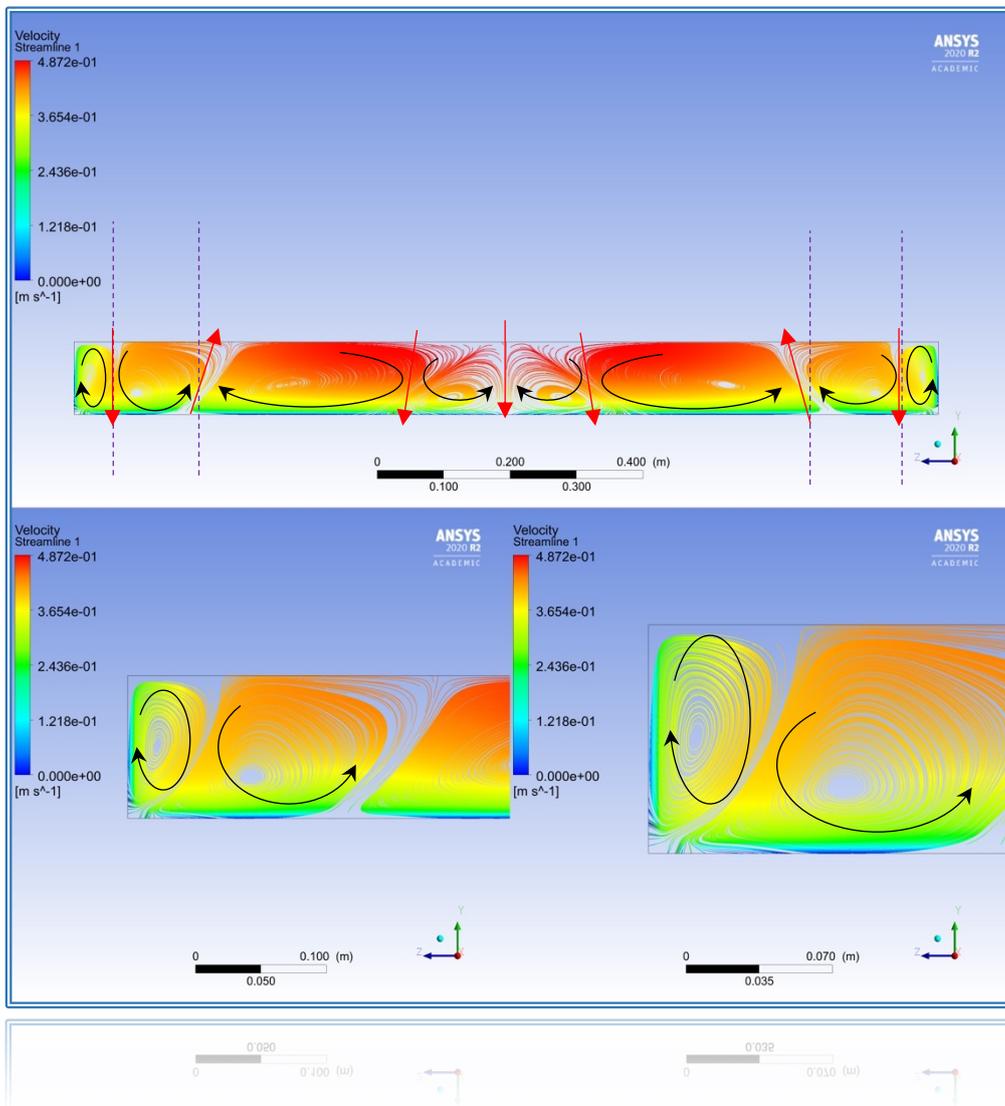


Fig. 4.21 – Configurazione delle linee di flusso che descrivono la struttura multicellulare delle correnti secondarie in relazione alla distribuzione spaziale della velocità longitudinale – Velocity 1 (Rect_F11_90_00_Linear)

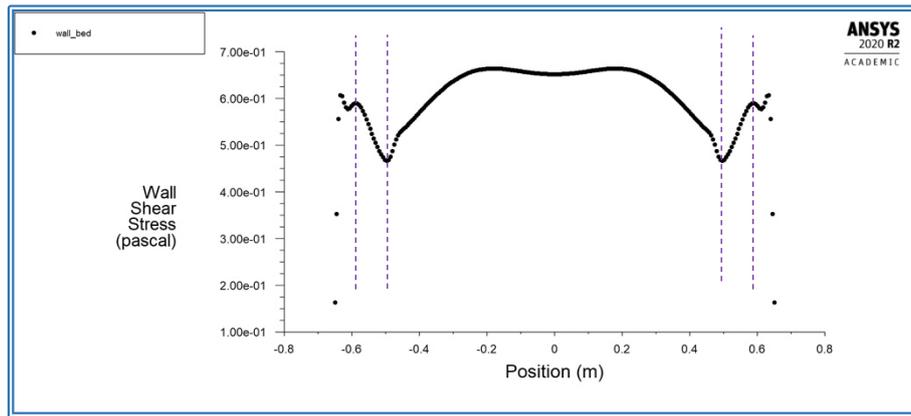


Fig. 4.22 – Distribuzione degli sforzi di taglio τ_b lungo l'estensione orizzontale della parete che costituisce il limite inferiore della sezione geometrica, corrispondente all'alveo di fondo (Rect_F11_90_00_Linear)

- Rect_F11_90_00_Quadratic

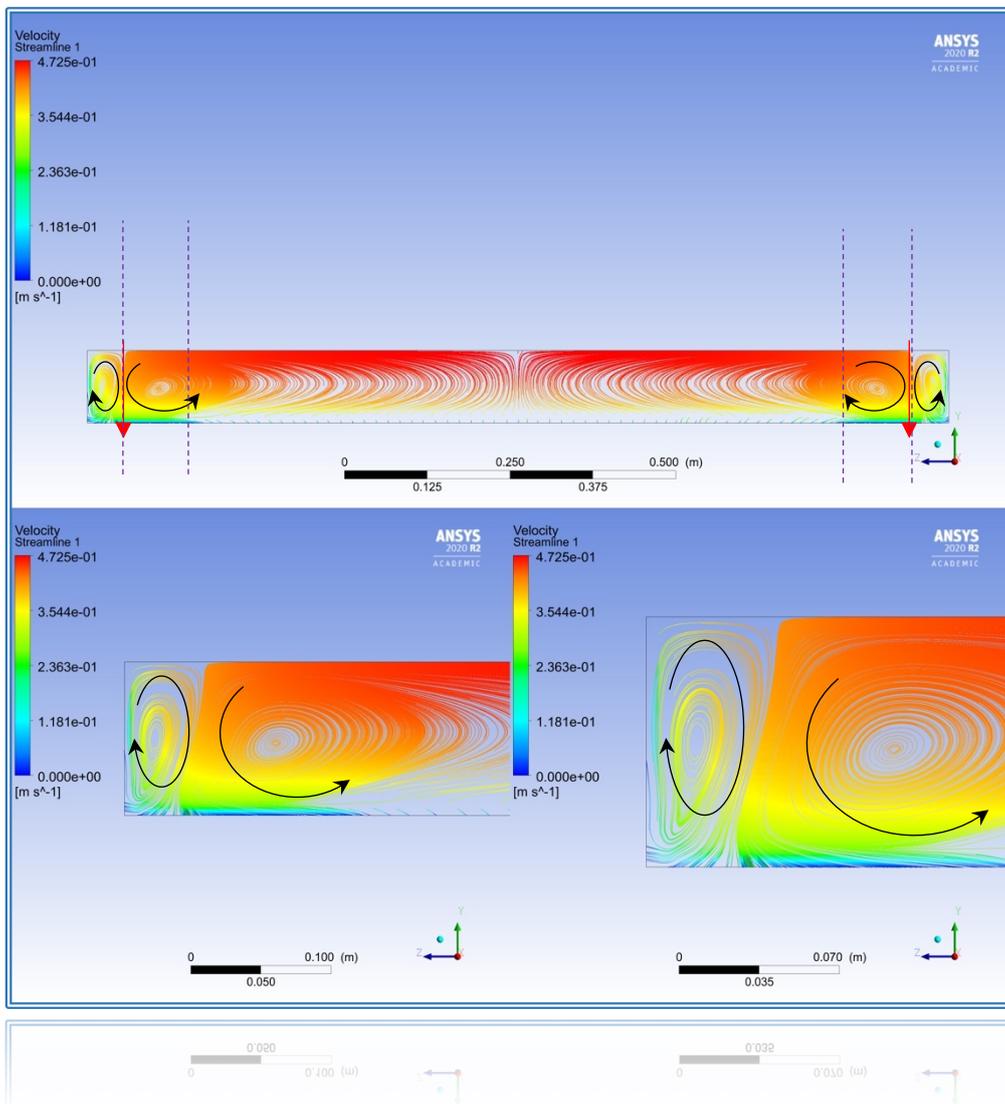


Fig. 4.23 – Configurazione delle linee di flusso che descrivono la struttura multicellulare delle correnti secondarie in relazione alla distribuzione spaziale della velocità longitudinale – Velocity 1 (Rect_F11_90_00_Quadratic)

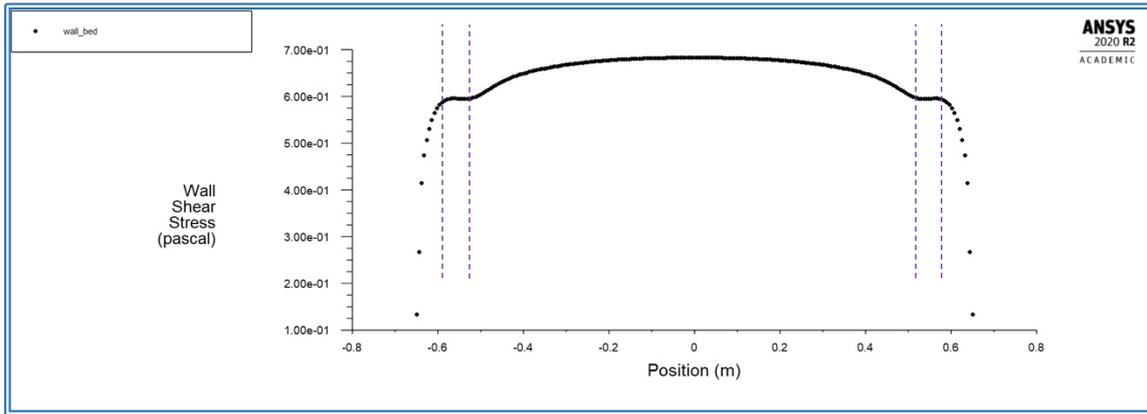


Fig. 4.24 – Distribuzione degli sforzi di taglio τ_w lungo l'estensione orizzontale della parete che costituisce il limite inferiore della sezione geometrica, corrispondente all'alveo di fondo (Rect_F11_90_00_Quadratic)

- Trap_F11_45_00_Linear

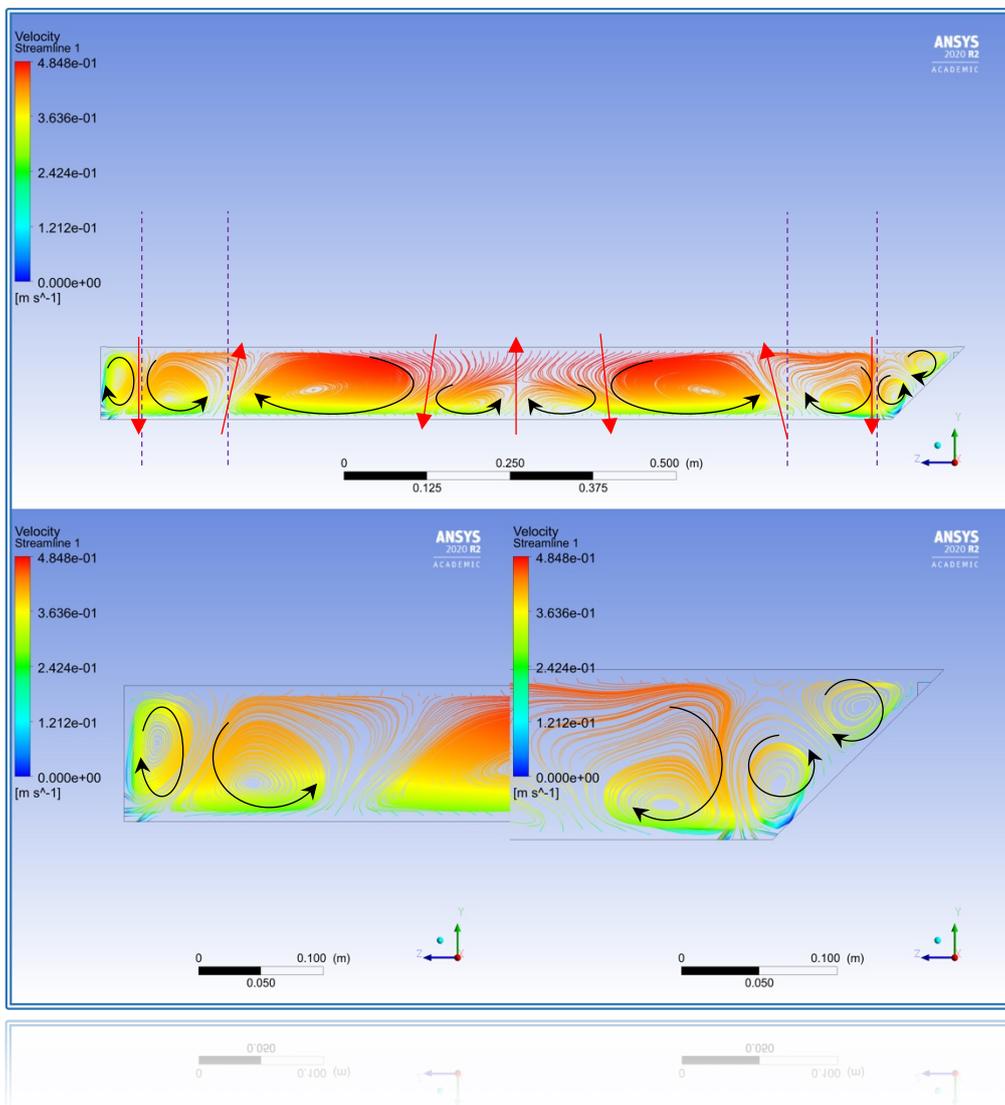


Fig. 4.25 – Configurazione delle linee di flusso che descrivono la struttura multicellulare delle correnti secondarie in relazione alla distribuzione spaziale della velocità longitudinale – Velocity 1 (Trap_F11_45_00_Linear)

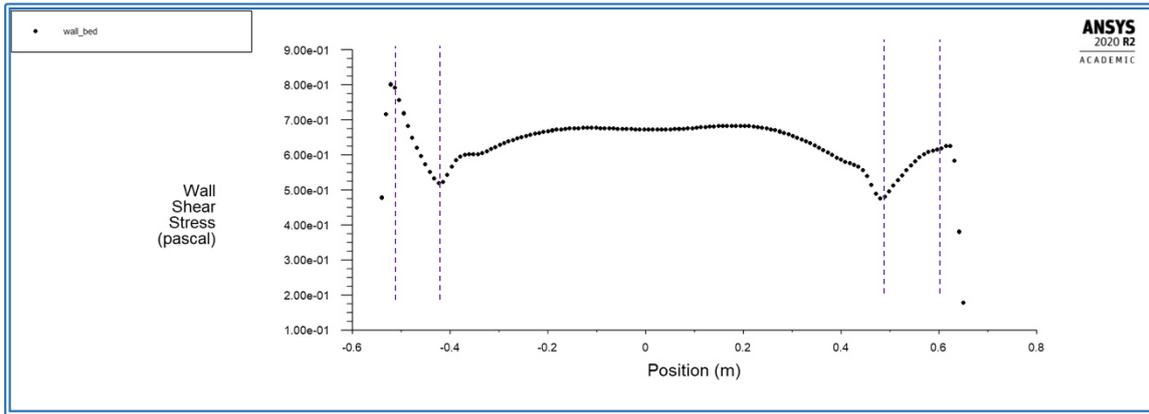


Fig. 4.26 – Distribuzione degli sforzi di taglio τ_b lungo l'estensione orizzontale della parete che costituisce il limite inferiore della sezione geometrica, corrispondente all'alveo di fondo (Trap_F11_45_00_Linear)

- Trap_F11_45_00_Quadratic

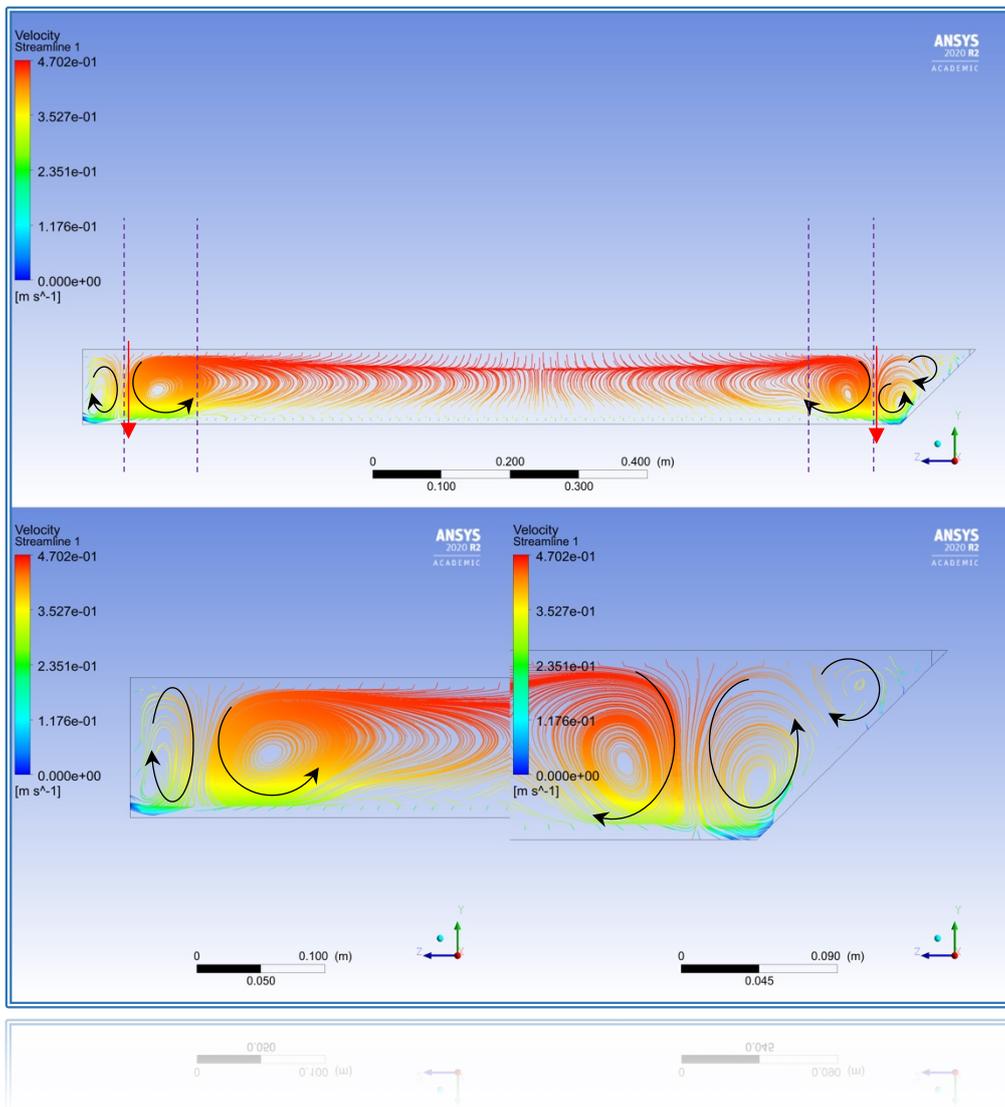


Fig. 4.27 – Configurazione delle linee di flusso che descrivono la struttura multicellulare delle correnti secondarie in relazione alla distribuzione spaziale della velocità longitudinale – Velocity 1 (Trap_F11_45_00_Quadratic)

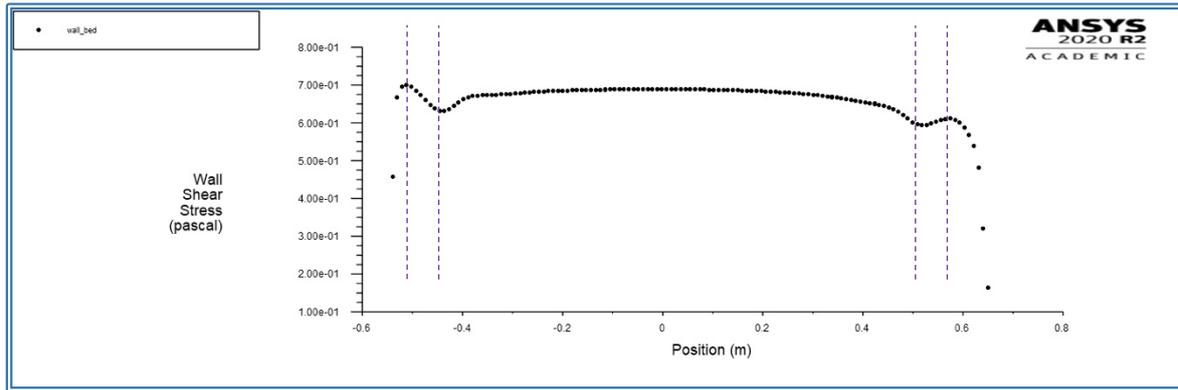


Fig. 4.28 – Distribuzione degli sforzi di taglio τ_b lungo l'estensione orizzontale della parete che costituisce il limite inferiore della sezione geometrica, corrispondente all'alveo di fondo (Trap_F11_45_00_Quadratic)

- Rect_F16_90_00_Linear

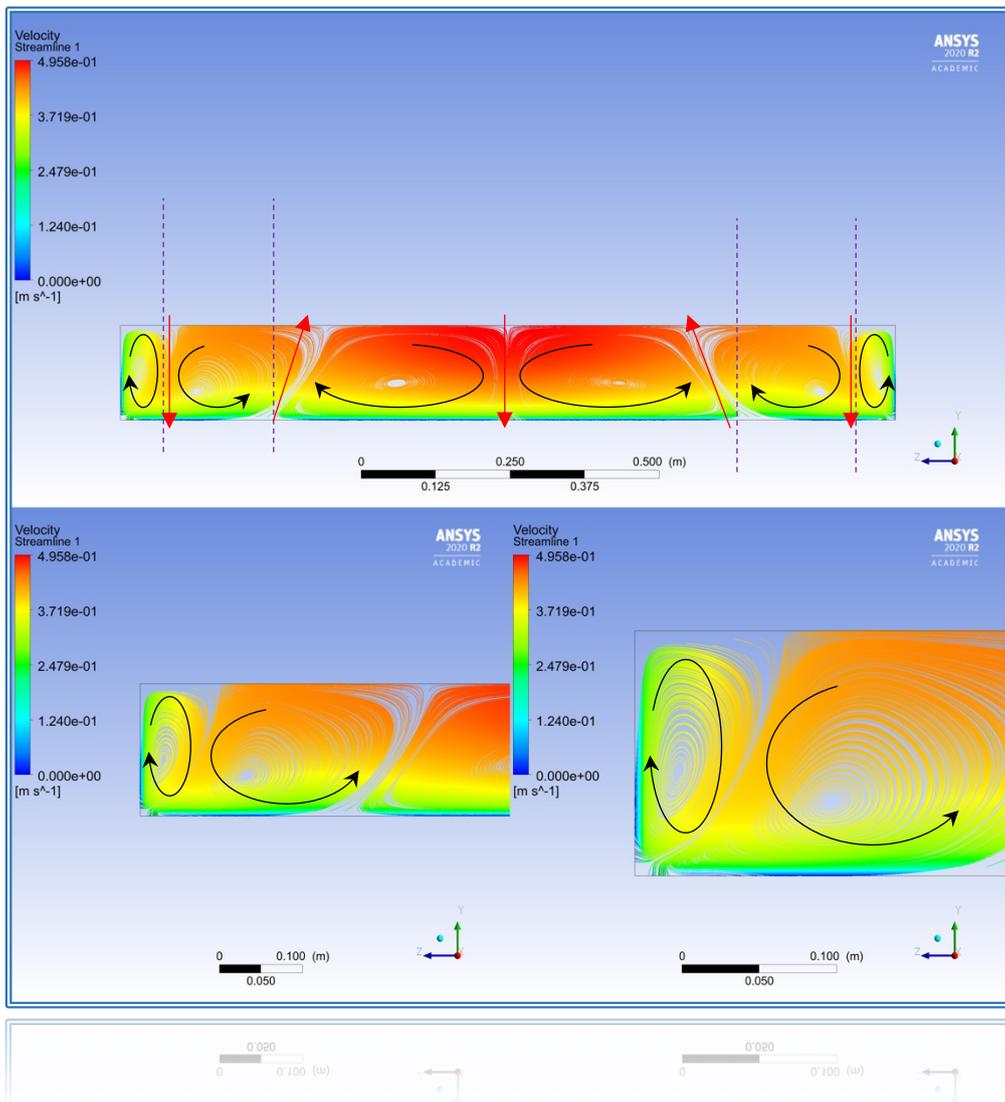


Fig. 4.29 – Configurazione delle linee di flusso che descrivono la struttura multicellulare delle correnti secondarie in relazione alla distribuzione spaziale della velocità longitudinale – Velocity 1 (Rect_F16_90_00_Linear)

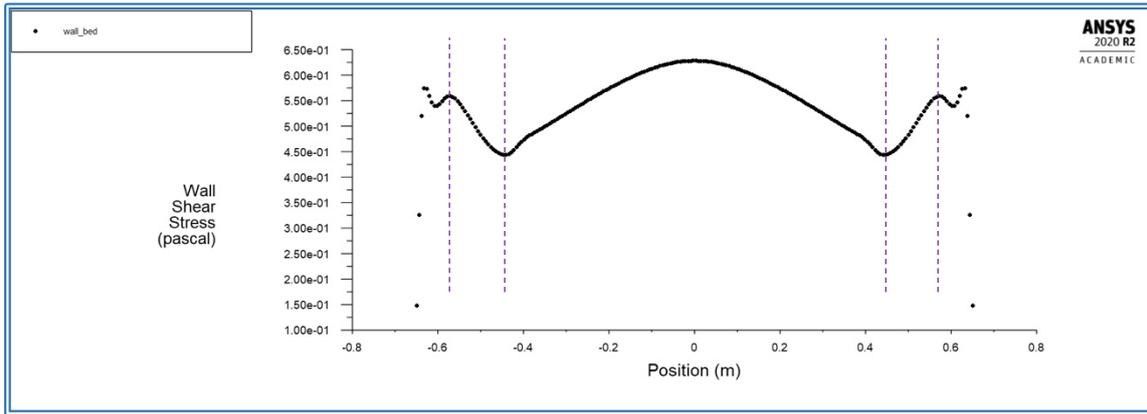


Fig. 4.30 – Distribuzione degli sforzi di taglio τ , lungo l'estensione orizzontale della parete che costituisce il limite inferiore della sezione geometrica, corrispondente all'alveo di fondo (Rect_F16_90_00_Linear)

- Rect_F16_90_00_Quadratic

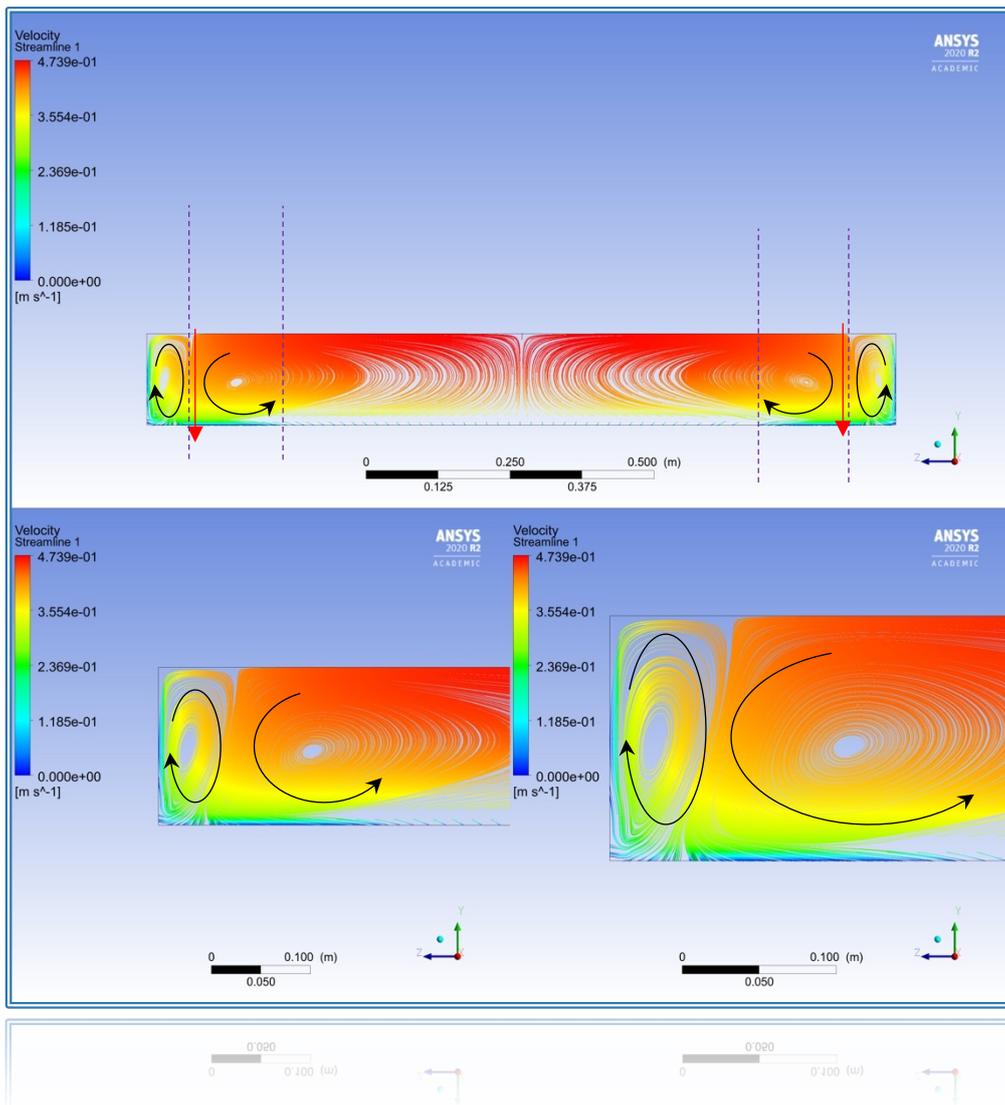


Fig. 4.31 – Configurazione delle linee di flusso che descrivono la struttura multicellulare delle correnti secondarie in relazione alla distribuzione spaziale della velocità longitudinale - Velocity 1 (Rect_F16_90_00_Quadratic)

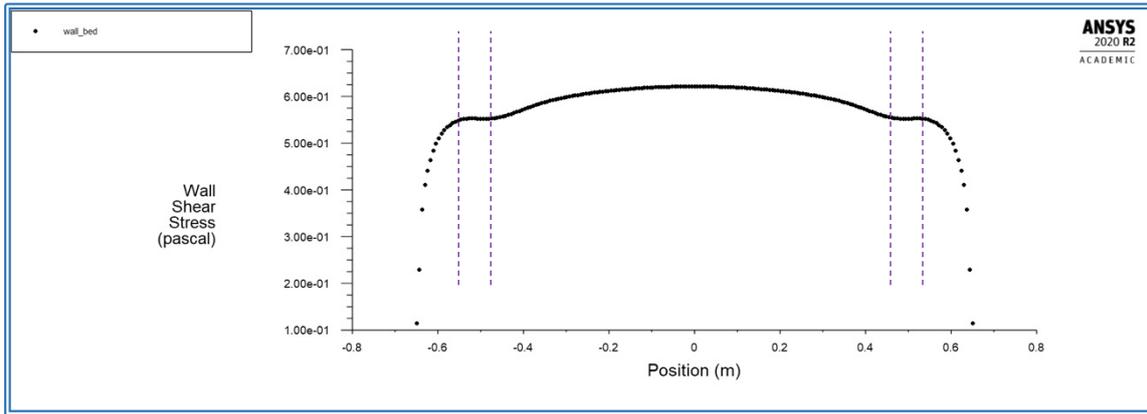


Fig. 4.32 – Distribuzione degli sforzi di taglio τ_w lungo l'estensione orizzontale della parete che costituisce il limite inferiore della sezione geometrica, corrispondente all'alveo di fondo (Rect_F16_90_00_Quadratic)

- Trap_F16_45_00_Linear

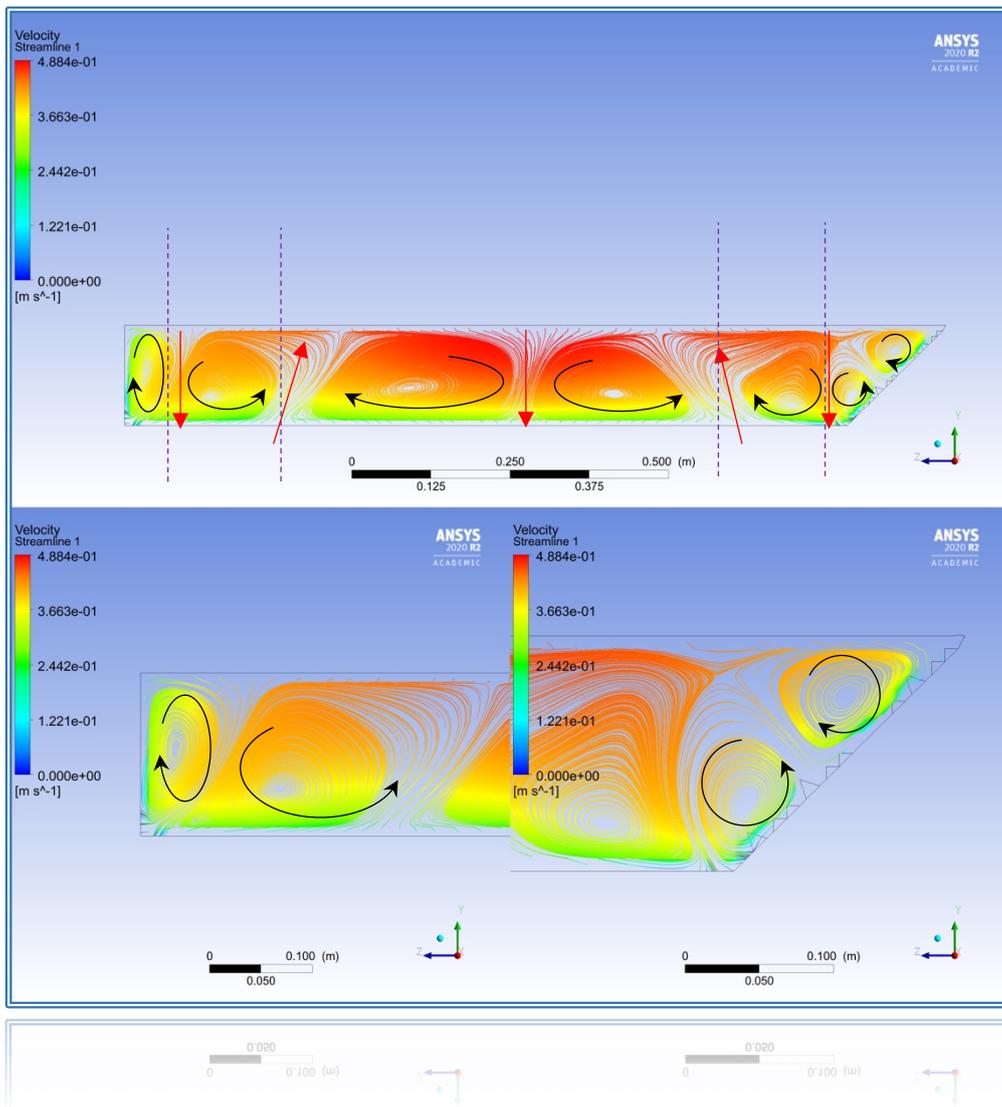


Fig. 4.33 – Configurazione delle linee di flusso che descrivono la struttura multicellulare delle correnti secondarie in relazione alla distribuzione spaziale della velocità longitudinale – Velocity 1 (Trap_F16_45_00_Linear)

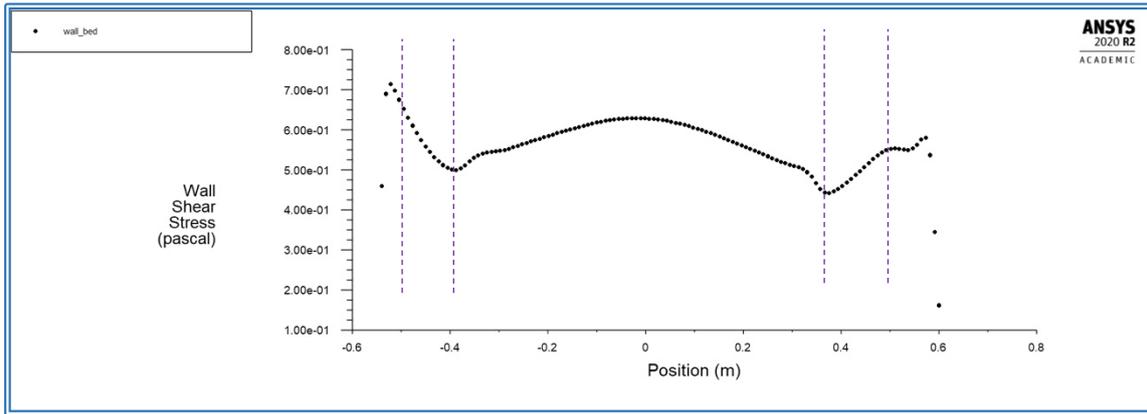


Fig. 4.34 – Distribuzione degli sforzi di taglio τ_b lungo l'estensione orizzontale della parete che costituisce il limite inferiore della sezione geometrica, corrispondente all'alveo di fondo (Trap_F16_45_00_Linear)

- Trap_F16_45_00_Quadratic

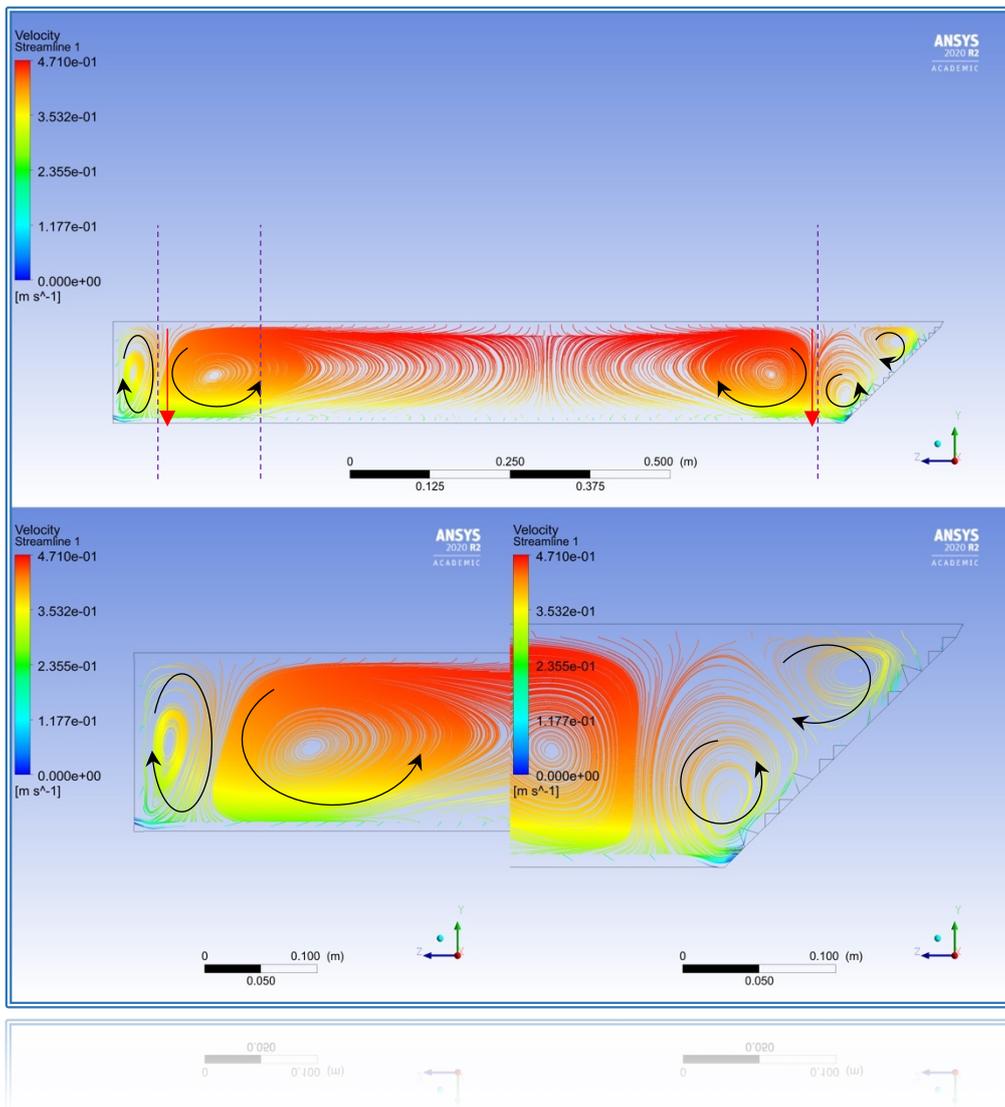


Fig. 4.35 – Configurazione delle linee di flusso che descrivono la struttura multicellulare delle correnti secondarie in relazione alla distribuzione spaziale della velocità longitudinale – Velocity 1 (Trap_F16_45_00_Quadratic)

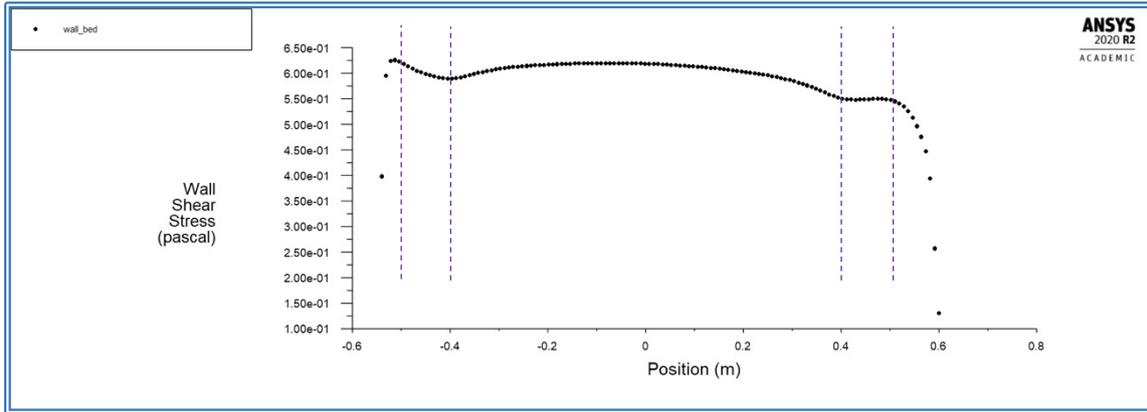


Fig. 4.36 – Distribuzione degli sforzi di taglio τ_b lungo l'estensione orizzontale della parete che costituisce il limite inferiore della sezione geometrica, corrispondente all'alveo di fondo (Trap_F16_45_00_Quadratic)

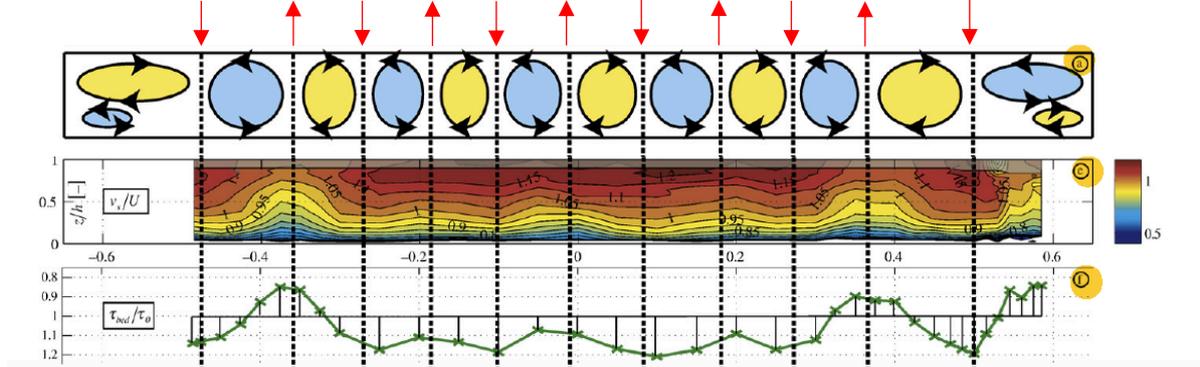


Fig. 4.37 – Configurazione delle linee di flusso che descrivono la struttura multicellulare delle correnti secondarie in relazione alla distribuzione spaziale della velocità longitudinale ed alla distribuzione degli sforzi di taglio normalizzati sull'alveo di fondo secondo i risultati sperimentali nel lavoro di Blanckaert et. al (F11_90_00) (Riferimento per confronto con caso simulazione Rect_F11_90_00_Linear e Rect_F11_90_00_Quadratic)

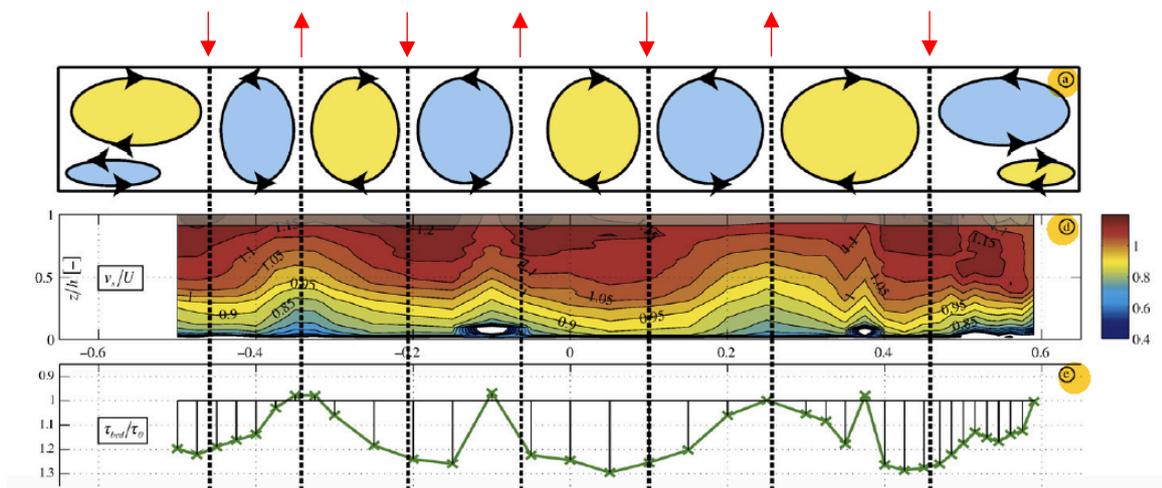


Fig. 4.38 – Configurazione delle linee di flusso che descrivono la struttura multicellulare delle correnti secondarie in relazione alla distribuzione spaziale della velocità longitudinale ed alla distribuzione degli sforzi di taglio normalizzati sull'alveo di fondo secondo i risultati sperimentali nel lavoro di Blanckaert et. al (F16_90_00) (Riferimento per confronto con caso simulazione Rect_F16_90_00_Linear e Rect_F16_90_00_Quadratic)

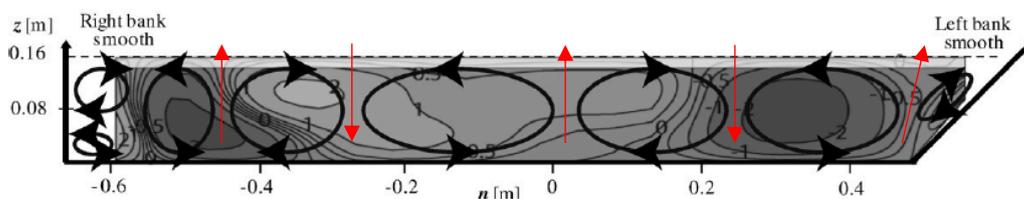


Fig. 4.39 – Configurazione delle linee di flusso che descrivono la struttura multicellulare delle correnti secondarie definita dai risultati sperimentali nel lavoro di Blanckaert et. al (F11_45_00) (Riferimento per confronto con caso simulazione Rect_F11_45_00_Linear e Rect_F11_45_00_Quadratic)

Dall'analisi e dal confronto grafico dei risultati computazionali sopra elencati e riportati è possibile notare come le diverse simulazioni eseguite tramite utilizzo del software ANSYS FLUENT, che riproducono approssimativamente le condizioni geometriche ed idrauliche associate alle prove sperimentali di Blanckaert et al., 2010, forniscono delle configurazioni spaziali delle correnti secondarie all'interno delle sezioni bidimensionali di riferimento adottate sostanzialmente differenti da quelle riconosciute ed ipotizzate dagli autori delle prove sperimentali stesse. In particolare, il numero delle strutture a cella generate sull'intera estensione trasversale delle sezioni risulta essere sempre e comunque inferiore nelle simulazioni. La distribuzione degli sforzi di taglio, nei risultati sperimentali, si presenta più irregolare e meno prevedibile, contrassegnata da una correlazione piuttosto debole tra valori massimi e minimi di picco, soprattutto all'allontanarsi dalle pareti di sponda laterali, in relazione alle tendenze di moto dell'acqua rispettivamente verso l'alveo e verso la superficie libera come conseguenza dei sensi di rotazione indotti delle correnti secondarie. L'impiego diversificato dello schema di tipo lineare o quadratico per la stima del termine di correlazione tra deformazione e pressione (Pressure-Strain Term) fornisce inoltre un riscontro simile a quanto ottenuto attraverso le simulazioni numeriche nell'ambito di discussione del lavoro di Hargreaves et al. (2010). Lo schema di tipo quadratico conduce infatti ad una soluzione di finale del tutto non comparabile e non contestualizzabile con i risultati derivanti dalle misurazioni eseguite sperimentalmente. Questo tipo di discordanza potrebbe essere ipoteticamente attribuita alla presenza di condizioni di modello ideali relative ad un trattamento piuttosto semplificato della superficie libera, ad alvei di fondo perfettamente orizzontali ed a scabrezze distribuite in maniera perfettamente uniforme, circostanze difficilmente replicabili nell'ambito di esecuzione materiale delle sessioni di laboratorio.

- Gruppo 3

Con l'obiettivo di ricavare un'ulteriore prospettiva utile, nonché un'eventuale conferma e controprova in merito all'efficacia e alla correttezza d'impostazione e di implementazione delle simulazioni eseguite sfruttando l'ambiente di lavoro fornito dal software ANSYS Fluent, i risultati presentati all'interno dell'articolo scientifico di Sung-UK Choi et al.: Numerical simulations of cellular secondary currents and suspended sediment transport in open-channel flows over smooth-rough bed strips, 2010, sono stati presi in considerazione riprodotti, analizzando nello specifico la casistica di sezione di un canale aperto rettilineo a pelo libero sul cui alveo di fondo risulta impostata un'alternanza tra settori idraulicamente lisci e contrariamente associati ad una data scabrezza uniformemente distribuita.

- Rect_F8_90_00_Quadratic

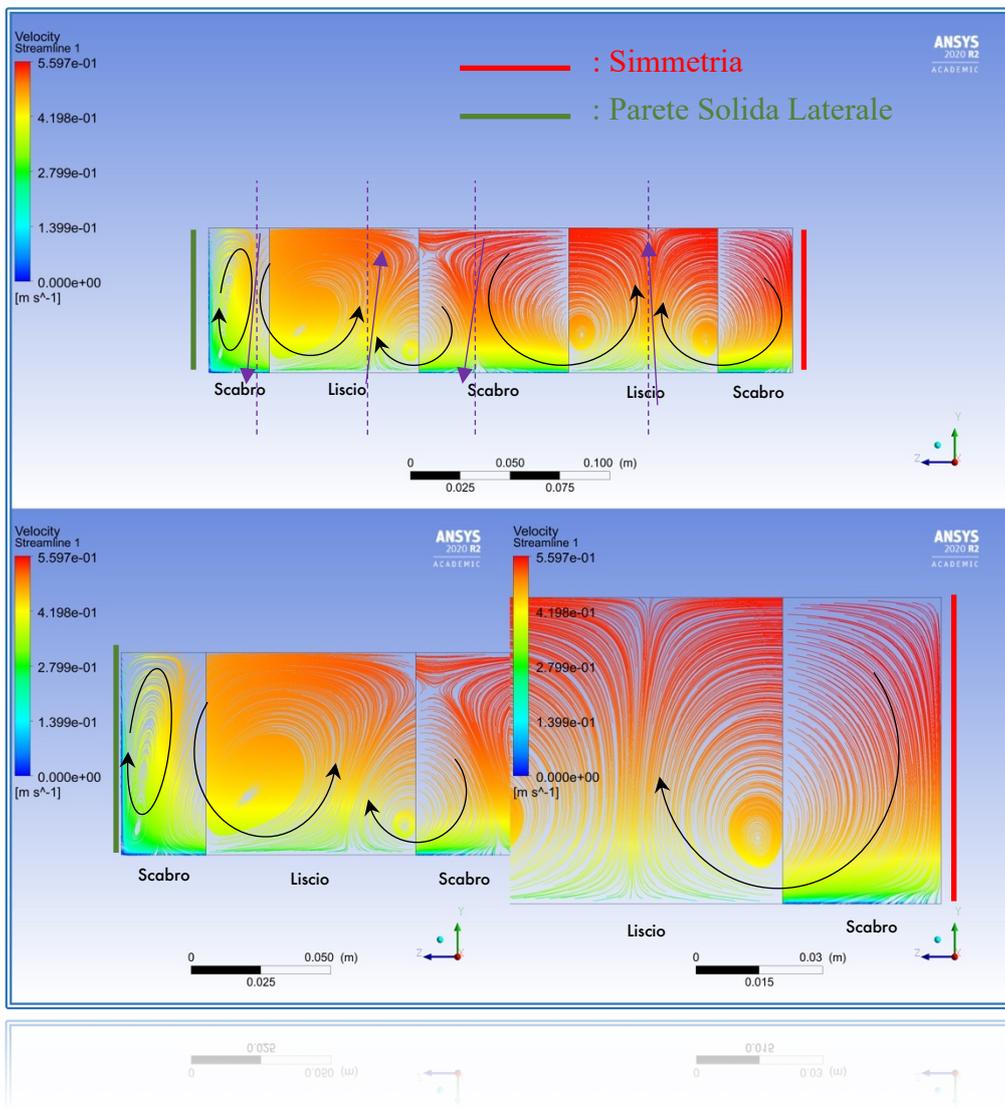


Fig. 4.40 – Configurazione delle linee di flusso che descrivono la struttura multicellulare delle correnti secondarie in relazione alla distribuzione spaziale della velocità longitudinale – Velocity 1 (Rect_F8_90_00_Quadratic)

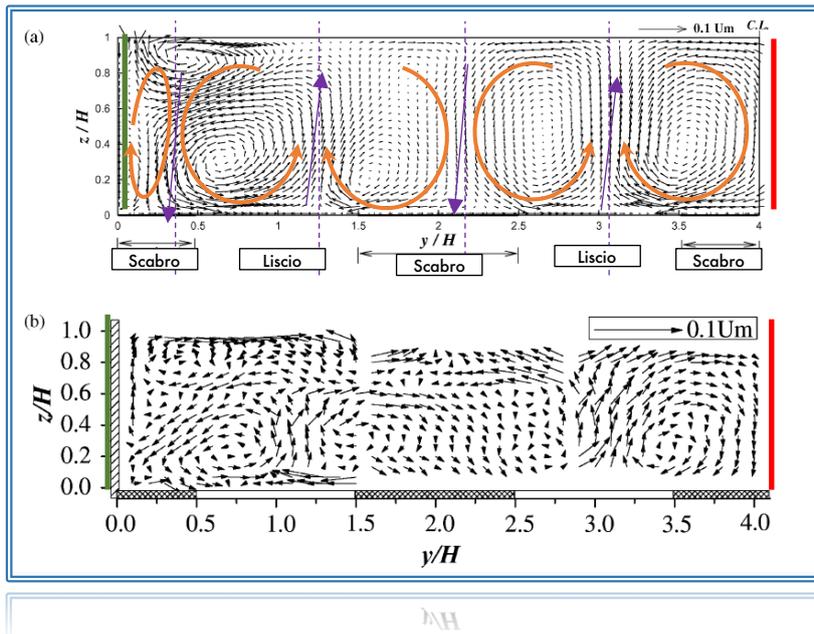


Fig. 4.41 – Configurazione delle linee di flusso che descrivono la struttura multicellulare delle correnti secondarie secondo quanto riportato all'interno del lavoro di Sung-UK Choi et al., 2010 (Rect_F8_90_00_Quadratic)

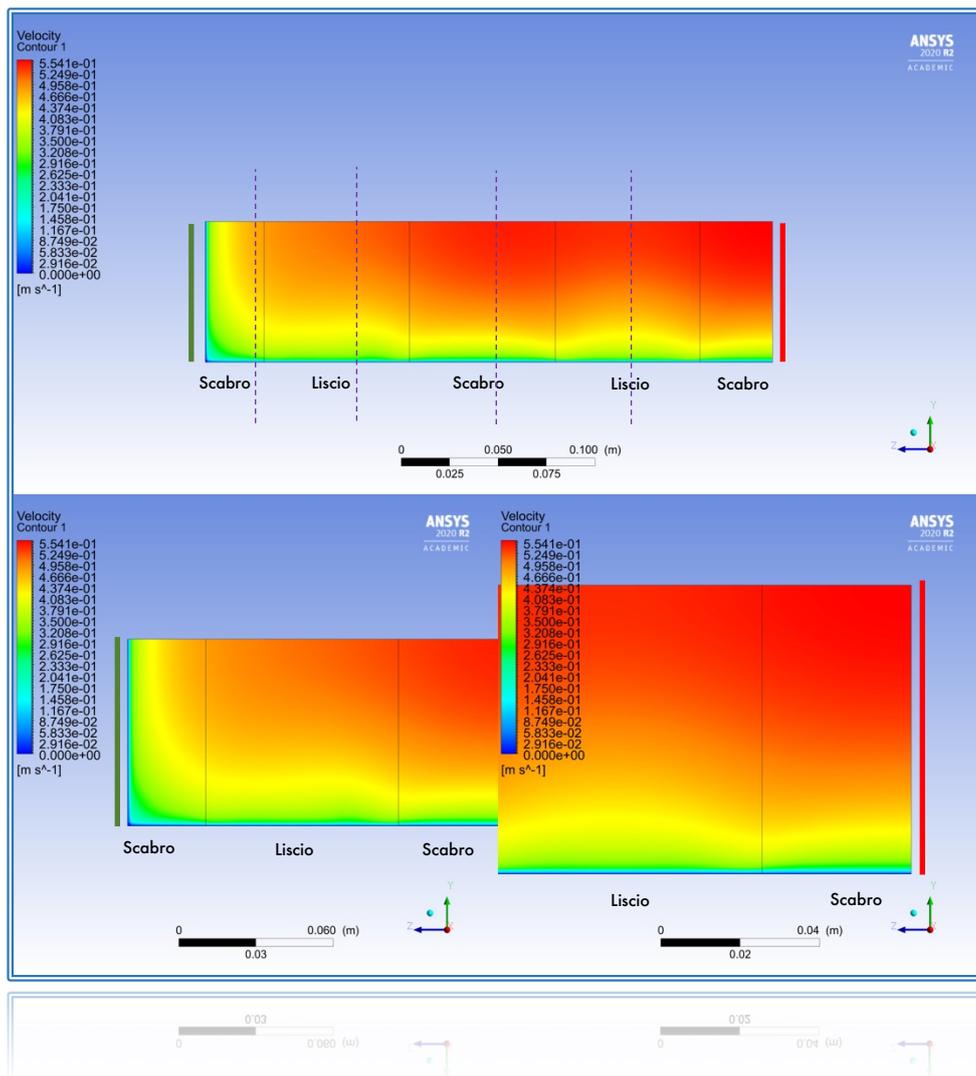


Fig. 4.42 – Distribuzione spaziale della velocità longitudinale – Velocity 1 (Rect_F8_90_00_Quadratic)

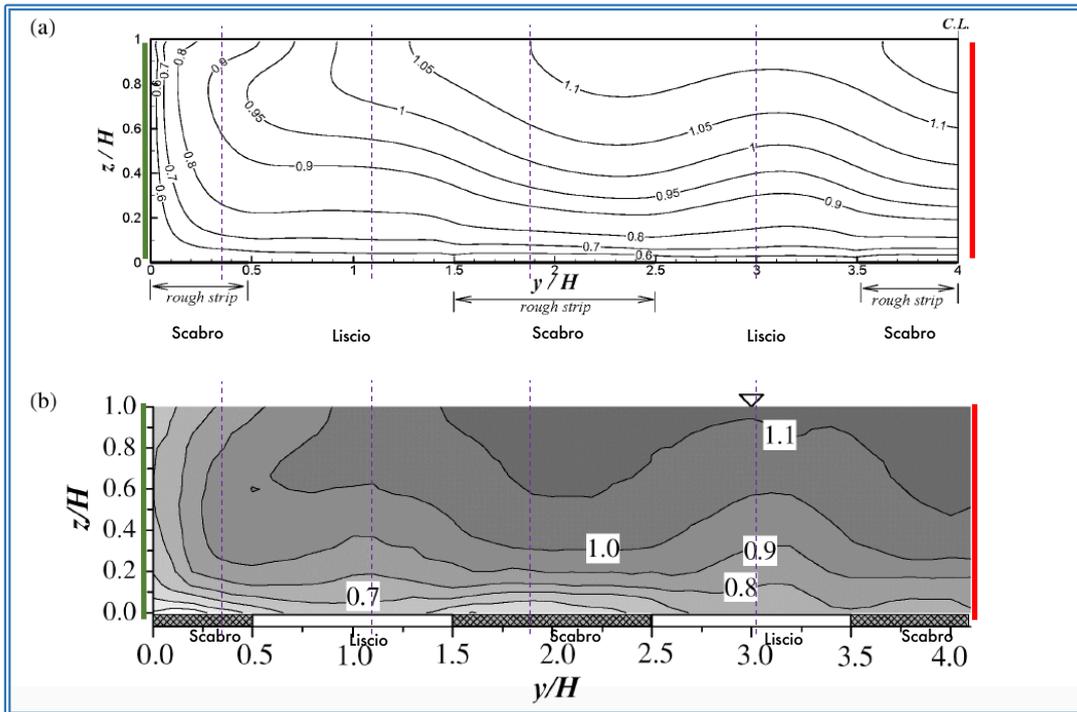


Fig. 4.43 – Distribuzione spaziale della velocità longitudinale – Velocity 1, secondo quanto riportato all'interno del lavoro di Sung-UK Choi et al., 2010 (Rect_F8_90_00_Quadratic)

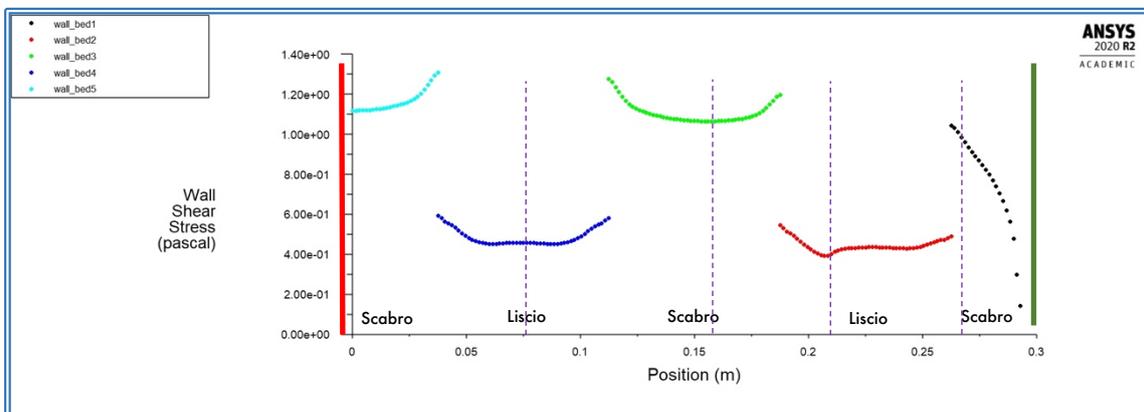


Fig. 4.44 – Distribuzione degli sforzi di taglio τ_w lungo l'estensione orizzontale della parete che costituisce il limite inferiore della sezione geometrica, corrispondente all'alveo di fondo (Rect_F8_90_00_Quadratic)

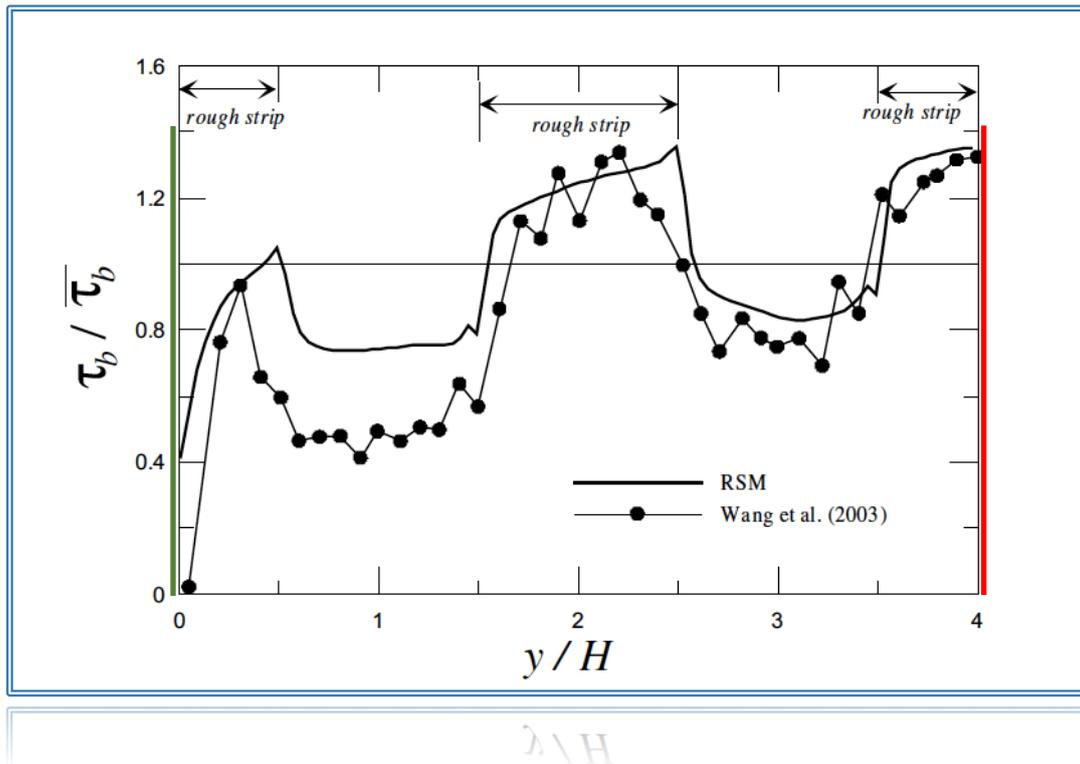


Fig. 4.45 – Distribuzione degli sforzi di taglio τ_b normalizzati lungo l'estensione orizzontale della parete che costituisce il limite inferiore della sezione nel lavoro di Sung–UK Choi et al., 2010 (Rect_F8_90_00_Quadratic)

Analizzando e ponendo a confronto gli esiti finali grafico-numeriche delle simulazioni rispettivamente eseguite in ambiente ANSYS Fluent e proposte da Sung–UK Choi et al., è possibile constatare una buona corrispondenza e concordanza relativamente alla distribuzione degli sforzi di taglio lungo l'alveo ed all'andamento delle velocità longitudinali nonché delle strutture a cella descrittive dell'andamento seguito dalle correnti secondarie. In particolar modo, risulta evidenziabile una tendenza da parte degli sforzi di taglio ad assumere valori più elevati in corrispondenza delle porzioni di alveo di fondo impostate come idraulicamente scabre e più ridotti invece in corrispondenza delle porzioni impostate come idraulicamente lisce. È possibile rilevare inoltre come, contestualmente alle porzioni idraulicamente lisce, le strutture a cella inducono un moto dell'acqua diretto verso la superficie libera, e cioè verso l'alto, mentre contestualmente alle porzioni idraulicamente scabre esse inducano un moto contrariamente diretto verso l'alveo di fondo, cioè verso il basso, indice di come l'imposizione di una possibile differente distribuzione della scabrezza, seppur uniformemente distribuita, sul medesimo alveo di fondo sia in grado di alterare e condizionare la natura propria delle correnti secondarie.

- Gruppo 4

Dall'analisi dei risultati grafici e numerici acquisiti in virtù delle simulazioni sopra raggruppate e riassunte, nonché grazie all'analisi, allo studio critico ed al confronto più o meno diretto con i dati e le informazioni utili disponibili nella letteratura scientifica concernente la materia oggetto di studio, alcune indagini aggiuntive sono state eseguite implementando delle ulteriori simulazioni sul software informatico ANSYS Fluent. Gli stessi metodi e gli stessi criteri in precedenza valutati e verificati sono stati applicati per ottenere dei risvolti addizionali in merito alle capacità di riproduzione modellistica delle correnti secondarie ed alla miglior comprensione scientifica delle stesse.

Più specificatamente, a partire dalle casistiche di base e di riferimento già esaminate, sono state ipotizzate delle variazioni mirate della morfologia e della scabrezza descrittiva degli alvei di fondo delle sezioni geometriche. Di seguito vengono brevemente riepilogati e commentati i risultati finali ottenuti.

- Rect_F11_90_00_SL_NA_Linear

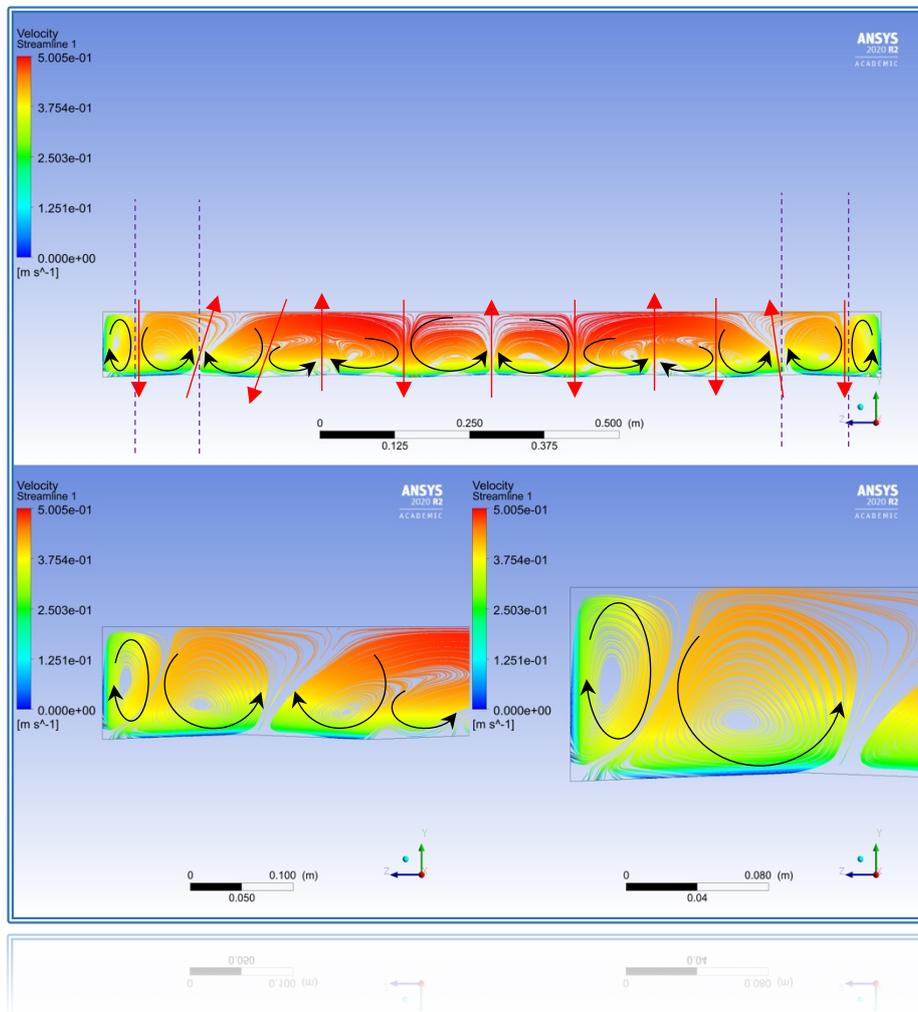


Fig. 4.46 – Configurazione delle linee di flusso che descrivono la struttura multicellulare delle correnti secondarie in relazione alla distribuzione spaziale della velocità longitudinale – Velocity 1 (Rect_F11_90_00_SL_NA_Linear)

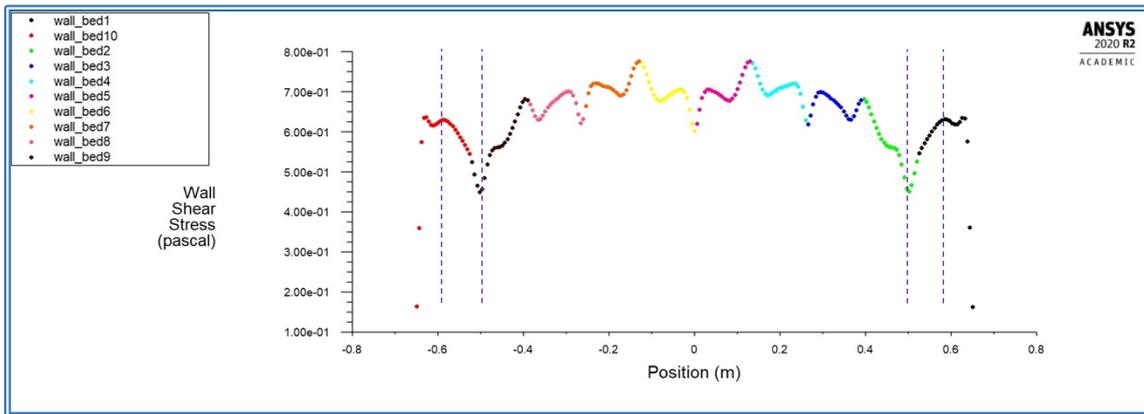


Fig. 4.47 – Distribuzione degli sforzi di taglio τ , lungo l'estensione orizzontale della parete che costituisce il limite inferiore della sezione geometrica, corrispondente all'alveo di fondo (Rect_F11_90_00_SL_NA_Linear)

- Rect_F11_90_00_SL_NA_Quadratic

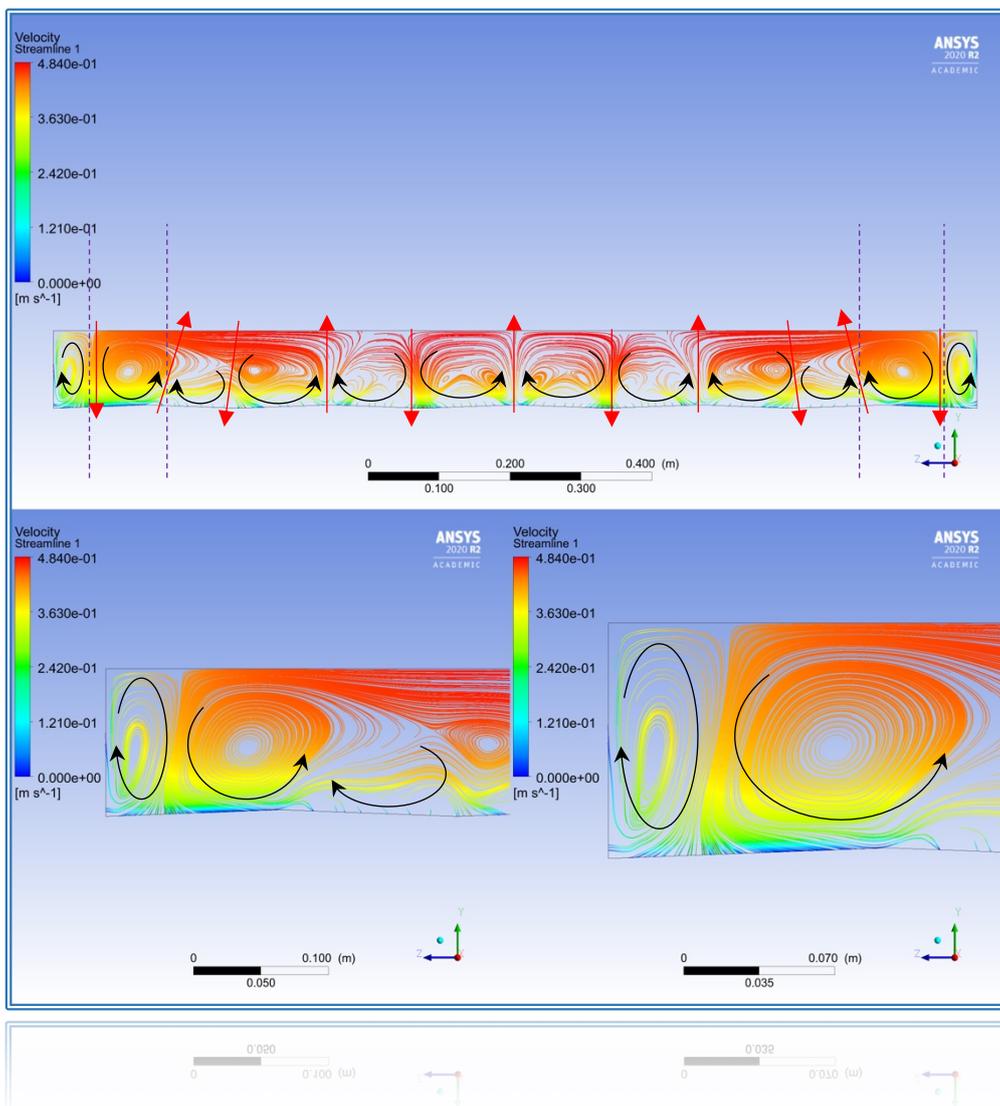


Fig. 4.48 – Configurazione delle linee di flusso che descrivono la struttura multicellulare delle correnti secondarie in relazione alla distribuzione spaziale della velocità longitudinale – Velocity 1 (Rect_F11_90_00_SL_NA_Quadratic)

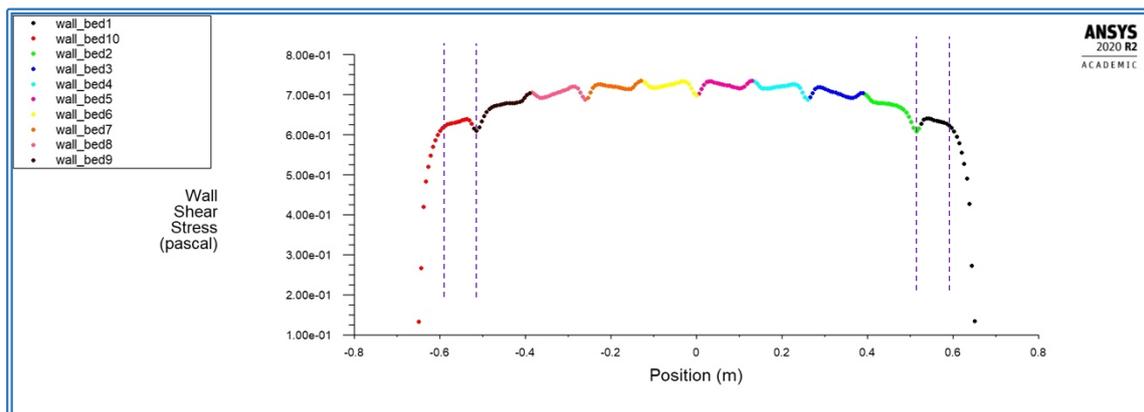


Fig. 4.49 – Distribuzione degli sforzi di taglio τ_b lungo l'estensione orizzontale della parete che costituisce il limite inferiore della sezione geometrica, corrispondente all'alveo di fondo (Rect_F11_90_00_SL_NA_Quadratic)

La variazione regolare, seppur molto contenuta, della geometria dell'alveo di fondo, coincidente con l'imposizione di lievi e ripetute pendenze positive e negative che definiscono la presenza di alcuni punti di massimo e minimo topografico, a parità di condizioni di scabrezza uniformemente distribuita sull'intero alveo stesso, produce una distribuzione degli sforzi di taglio che si configura parallelamente alla configurazione delle strutture a cella rappresentative delle correnti secondarie. La presenza delle alterazioni topografiche si dimostra condizionare piuttosto chiaramente l'andamento ed il numero complessivo delle strutture a cella associate alle correnti secondarie, ponendo dei vincoli al posizionamento dei settori spaziali in cui queste convergono sull'intera larghezza della sezione geometrica. Differentemente dalle casistiche in cui l'alveo di fondo è ipotizzato come perfettamente piano inoltre, l'impiego diversificato del termine di deformazione-pressione (Pressure-Strain Term), di tipo rispettivamente lineare o quadratico, genera dei responsi sia grafici che numerici piuttosto simili se confrontati fra loro. Nell'ipotesi di schema quadratico l'andamento delle strutture a cella alternate e degli sforzi di taglio lungo l'alveo di fondo risulta tuttavia meno marcato e ben visibile rispetto invece al caso di utilizzo dello schema di tipo lineare. Gli stessi sforzi di taglio generati in corrispondenza dell'alveo assumono in generale un andamento "a gobba", con una tendenza a diminuire in valore all'avvicinarsi progressivo alle pareti solide laterali.

- Rect_F11_90_00_SL_A_Linear

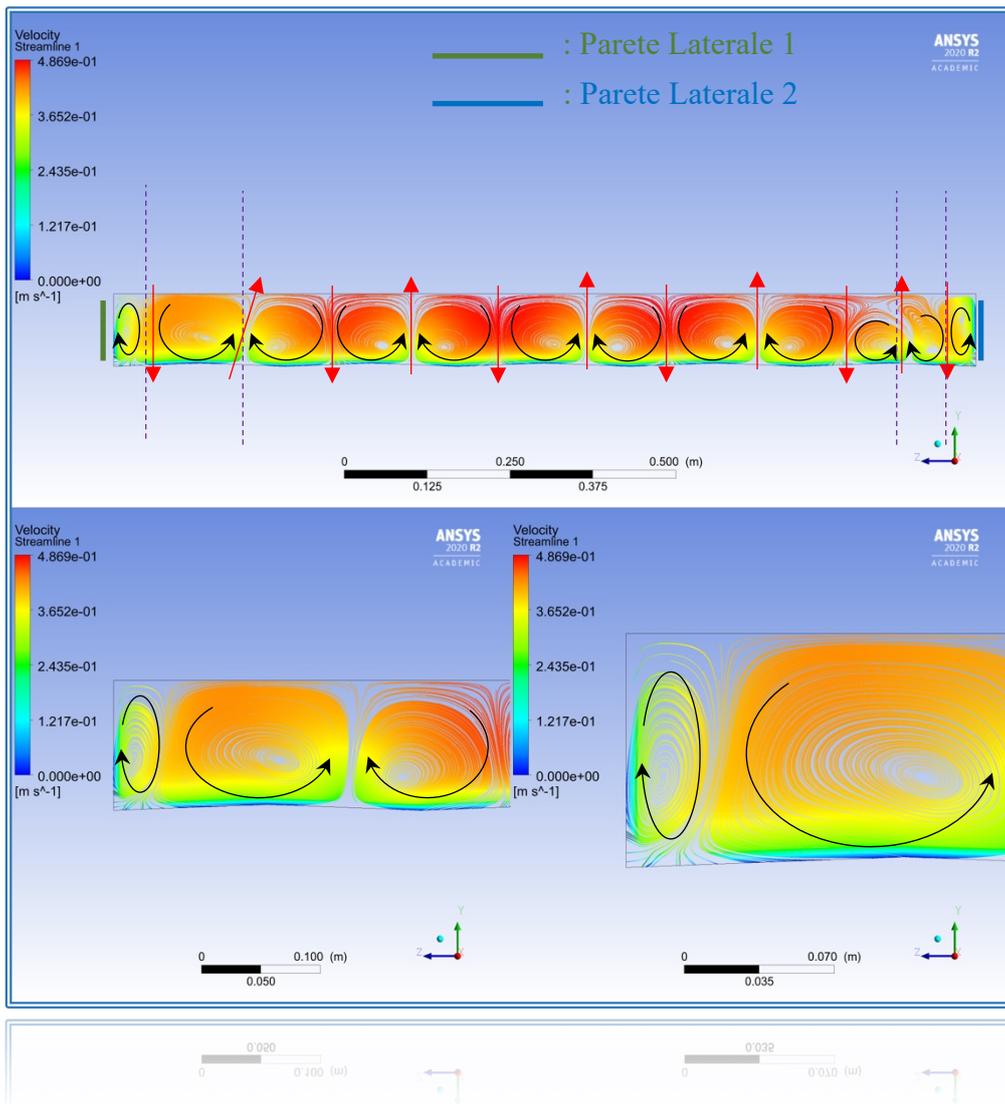


Fig. 4.50 – Configurazione delle linee di flusso che descrivono la struttura multicellulare delle correnti secondarie in relazione alla distribuzione spaziale della velocità longitudinale – Velocity 1 (Rect_F11_90_00_SL_A_Linear)

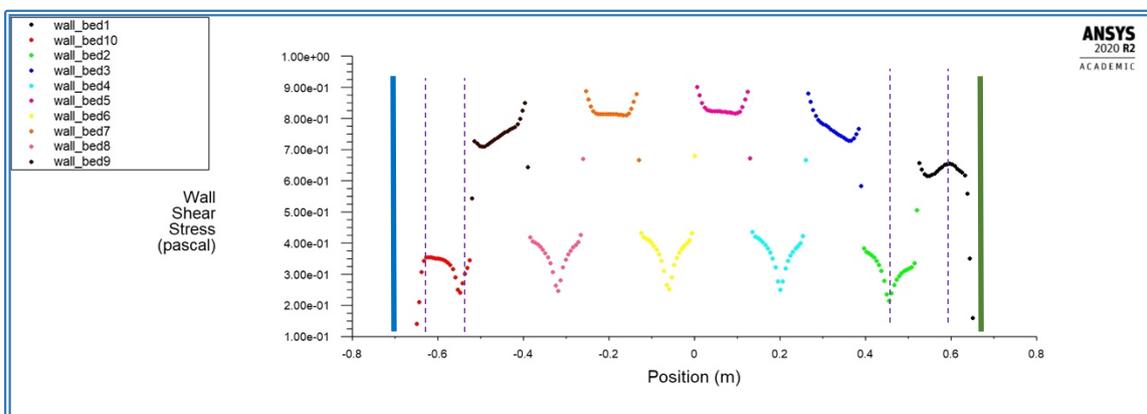


Fig. 4.51 – Distribuzione degli sforzi di taglio τ_w lungo l'estensione orizzontale della parete che costituisce il limite inferiore della sezione geometrica, corrispondente all'alveo di fondo (Rect_F11_90_00_SL_A_Linear)

- Rect_F11_90_00_SL_A_Quadratic

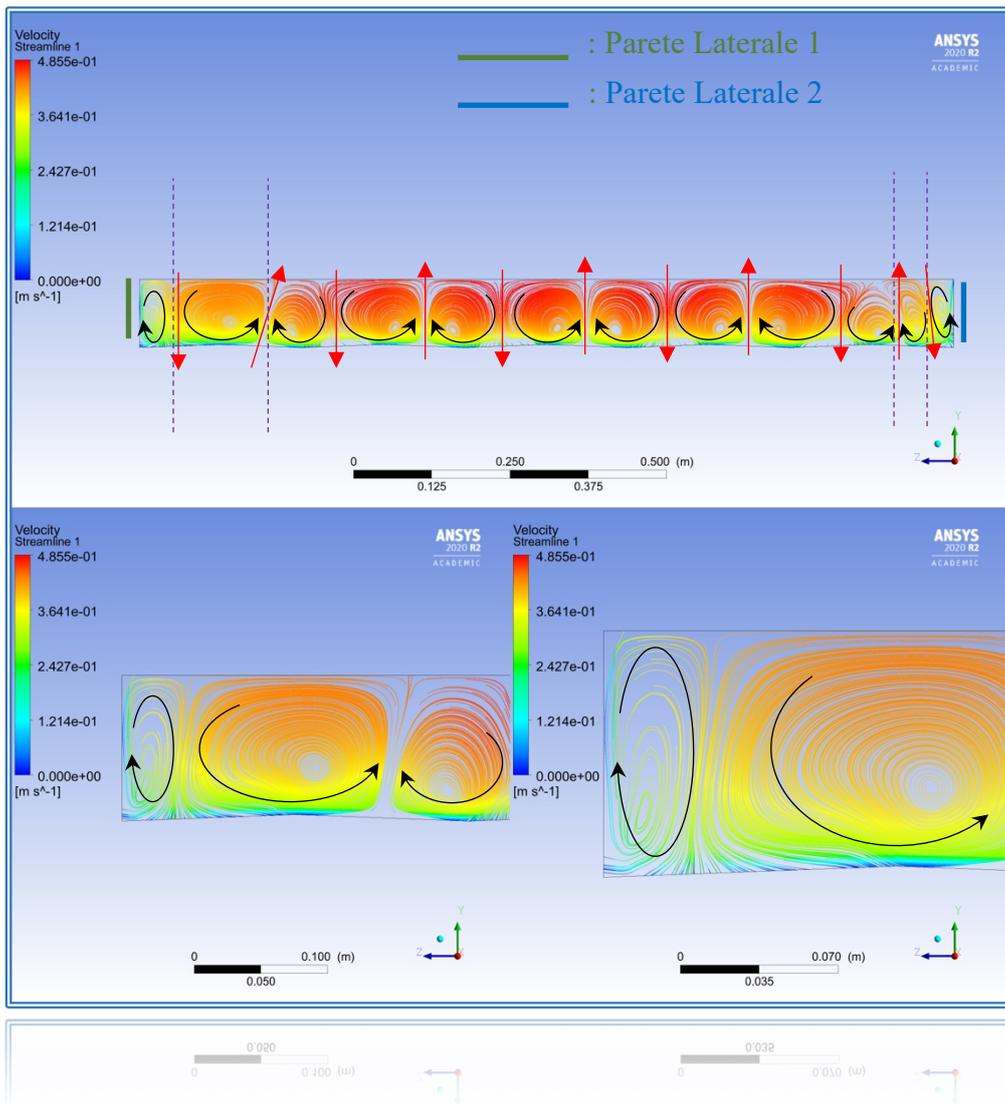


Fig. 4.52 – Configurazione delle linee di flusso che descrivono la struttura multicellulare delle correnti secondarie in relazione alla distribuzione spaziale della velocità longitudinale – Velocity 1 (Rect_F11_90_00_SL_A_Quadratic)

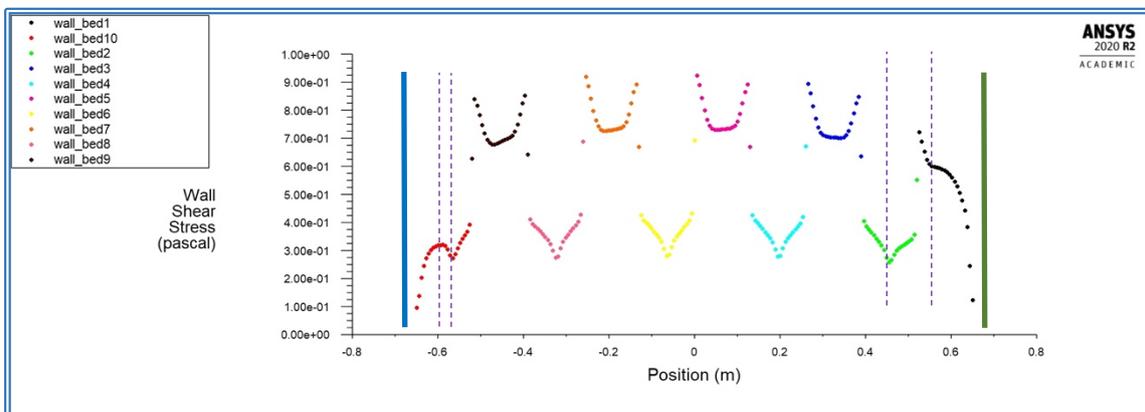


Fig. 4.53 – Distribuzione degli sforzi di taglio τ_b lungo l'estensione orizzontale della parete che costituisce il limite inferiore della sezione geometrica, corrispondente all'alveo di fondo (Rect_F11_90_00_SL_A_Quadratic)

L'ulteriore imposizione, in aggiunta alla presenza di lievi pendenze in precedenza ipotizzata, di un'alternanza congiunta tra porzioni dell'alveo di fondo rispettivamente scabre o lisce dal punto di vista idraulico, separate fra loro proprio in corrispondenza dei punti di variazione della pendenza da positiva a negativa e viceversa, tende a produrre un effetto di ridefinizione delle strutture a cella che descrivono l'andamento delle correnti secondarie, le quali appaiono ancor meglio visibili e ben definite, sia nel caso di impiego dello schema lineare che quadratico per il termine di correlazione deformazione–pressione (Pressure–Strain Term). Le distribuzioni degli sforzi di taglio lungo lo stesso alveo di fondo risultano inoltre modificate ed affette da una più accentuata differenziazione in termini di valori assoluti massimi e minimi associati agli sforzi stessi, rispettivamente in corrispondenza dei tratti idraulicamente scabri o lisci.

In generale, l'imposizione di un'alternanza fra porzioni di alveo di fondo idraulicamente scabre e lisce non sembra influire tuttavia in maniera significativa sul numero totale delle strutture a cella secondarie distribuite lungo l'intera larghezza della sezione.

- Rect_F11_90_00_2mm_Linear

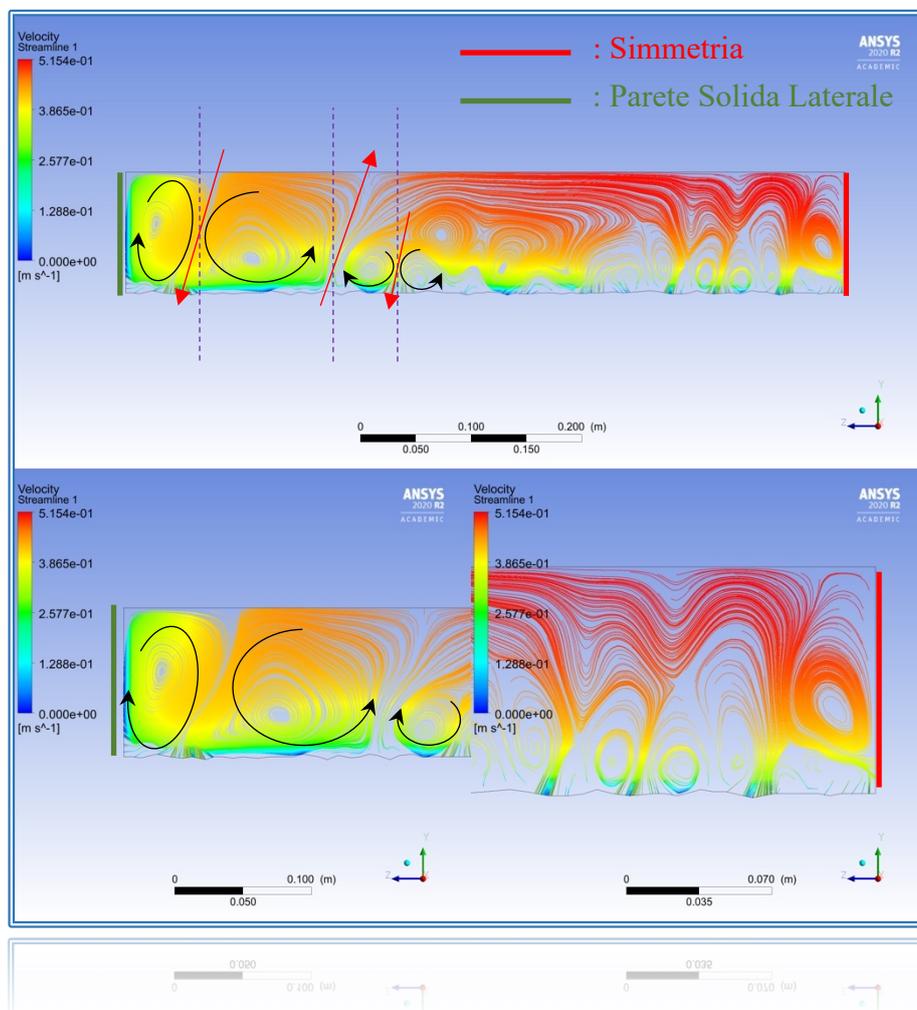


Fig. 4 – Configurazione delle linee di flusso che descrivono la struttura multicellulare delle correnti secondarie in relazione alla distribuzione spaziale della velocità longitudinale – Velocity 1 (Rect_F11_90_00_2mm_Linear)

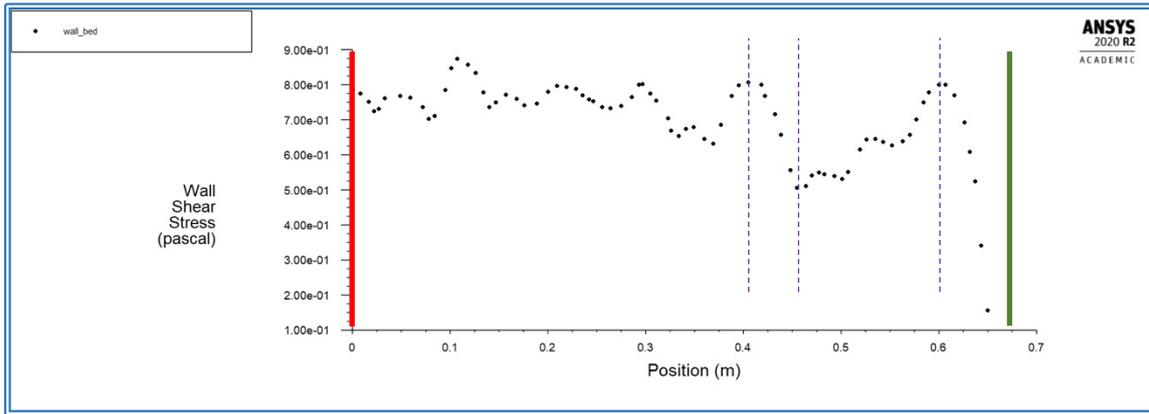


Fig. 4 – Distribuzione degli sforzi di taglio τ_b lungo l'estensione orizzontale della parete che costituisce il limite inferiore della sezione geometrica, corrispondente all'alveo di fondo (Rect_F11_90_00_2mm_Linear)

- Rect_F11_90_00_2mm_Quadratic

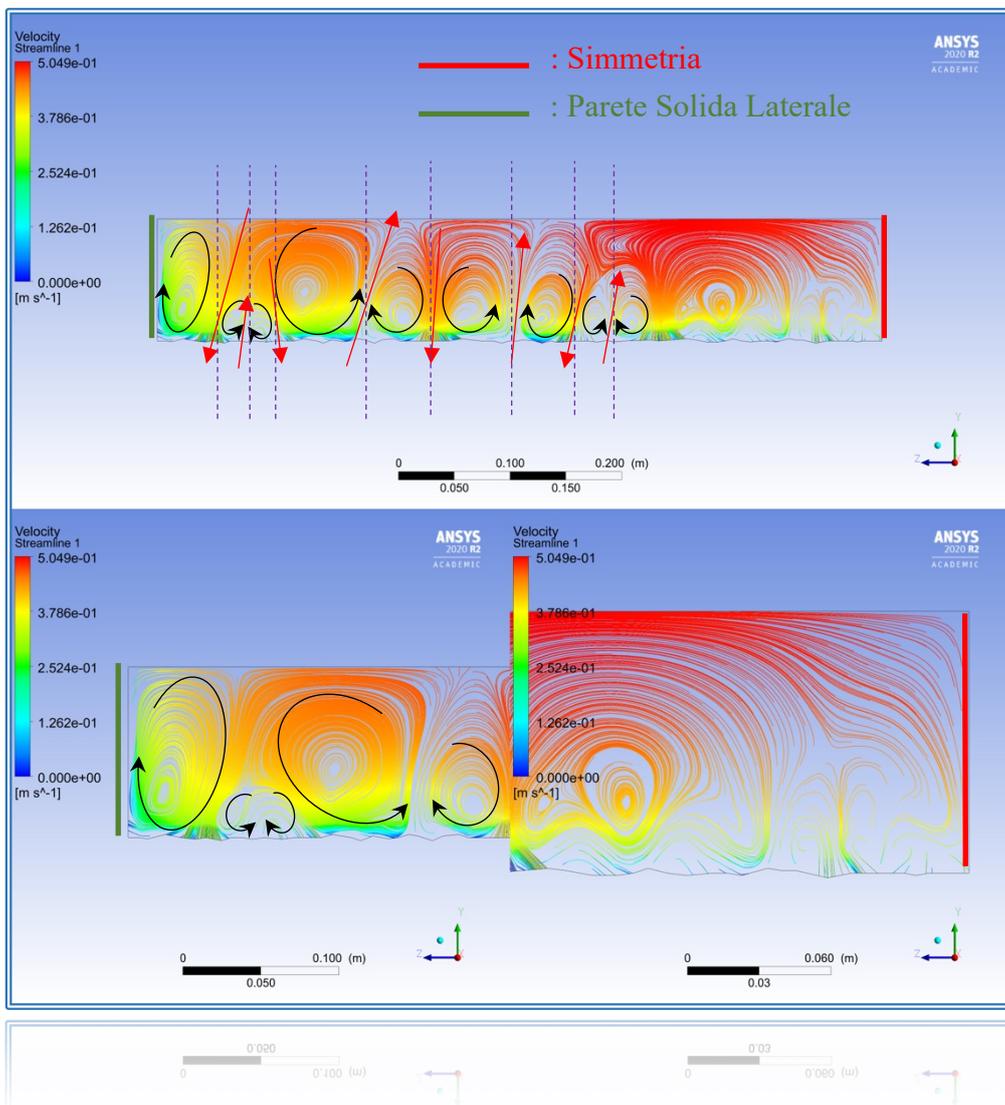


Fig. 4 – Configurazione delle linee di flusso che descrivono la struttura multicellulare delle correnti secondarie in relazione alla distribuzione spaziale della velocità longitudinale – Velocity 1 (Rect_F11_90_00_2mm_Quadratic)

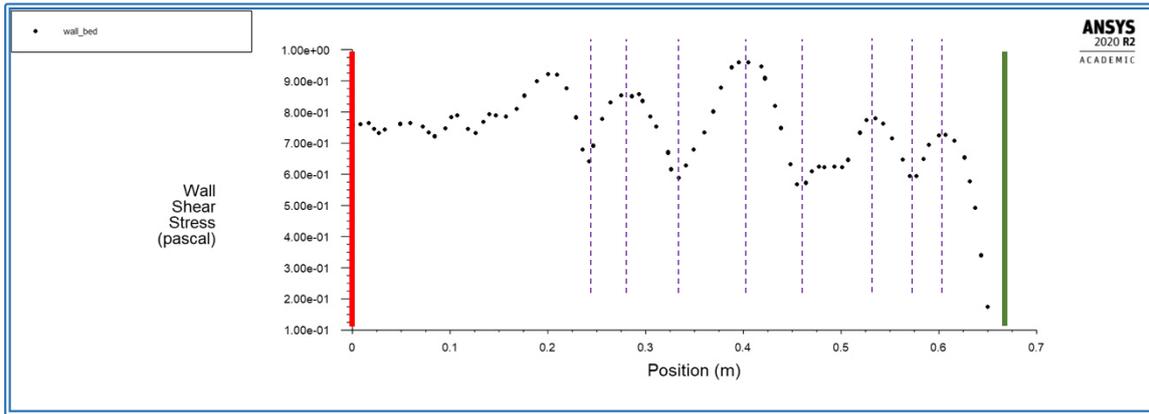


Fig. 4 – Distribuzione degli sforzi di taglio τ_b lungo l'estensione orizzontale della parete che costituisce il limite inferiore della sezione geometrica, corrispondente all'alveo di fondo (Rect_F11_90_00_2mm_Quadratic)

- Rect_F16_90_00_2mm_Linear

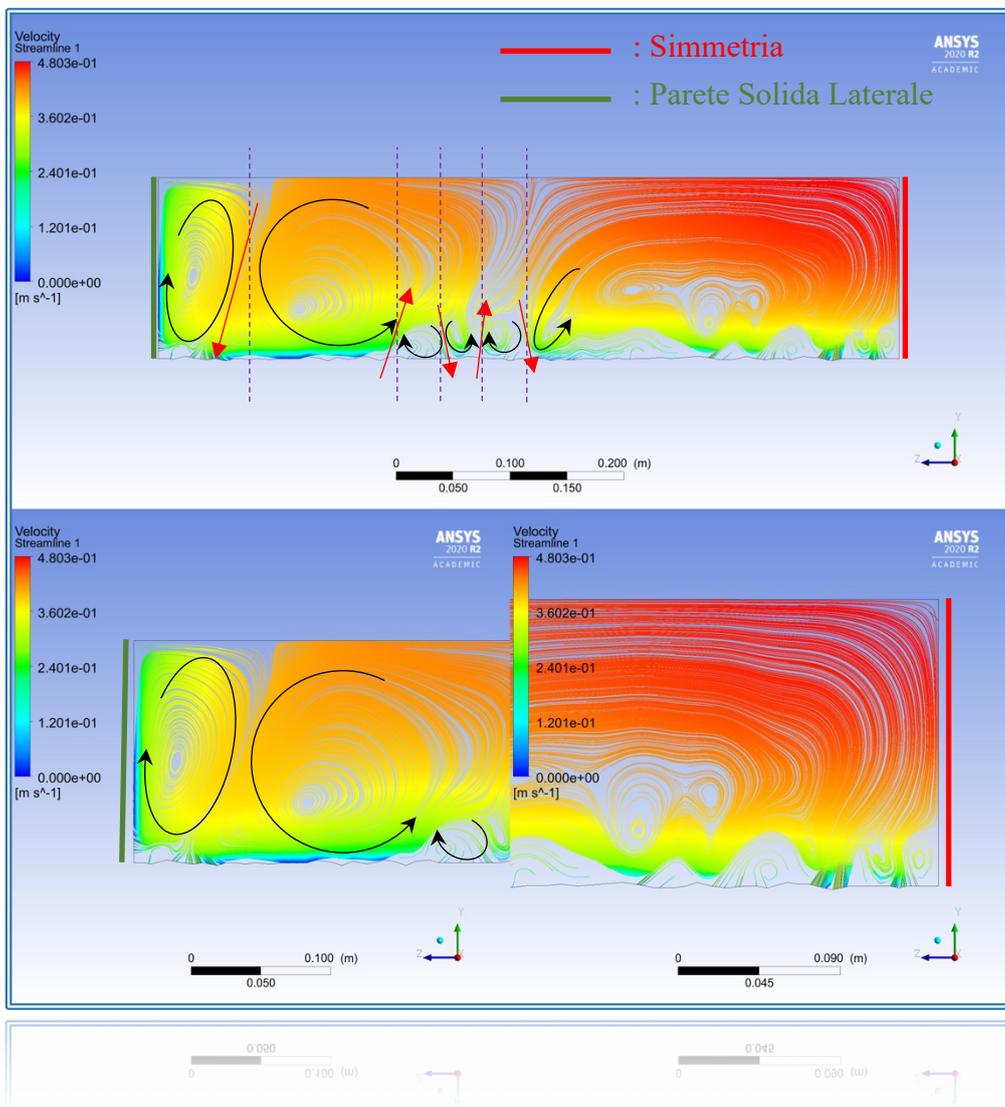


Fig. 4 – Configurazione delle linee di flusso che descrivono la struttura multicellulare delle correnti secondarie in relazione alla distribuzione spaziale della velocità longitudinale – Velocity 1 (Rect_F16_90_00_2mm_Linear)

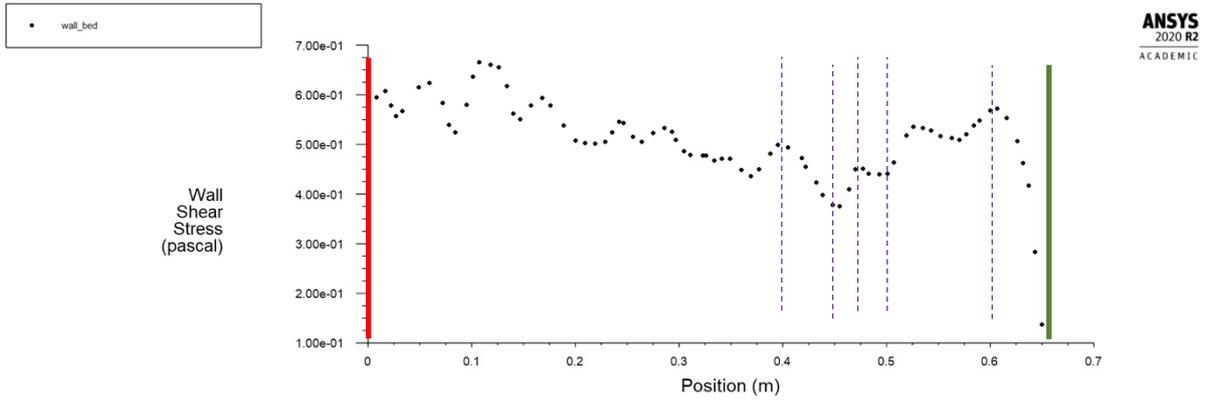


Fig. 4 – Distribuzione degli sforzi di taglio τ_b lungo l'estensione orizzontale della parete che costituisce il limite inferiore della sezione geometrica, corrispondente all'alveo di fondo (Rect_F16_90_00_2mm_Linear)

- Rect_F16_90_00_2mm_Quadratic

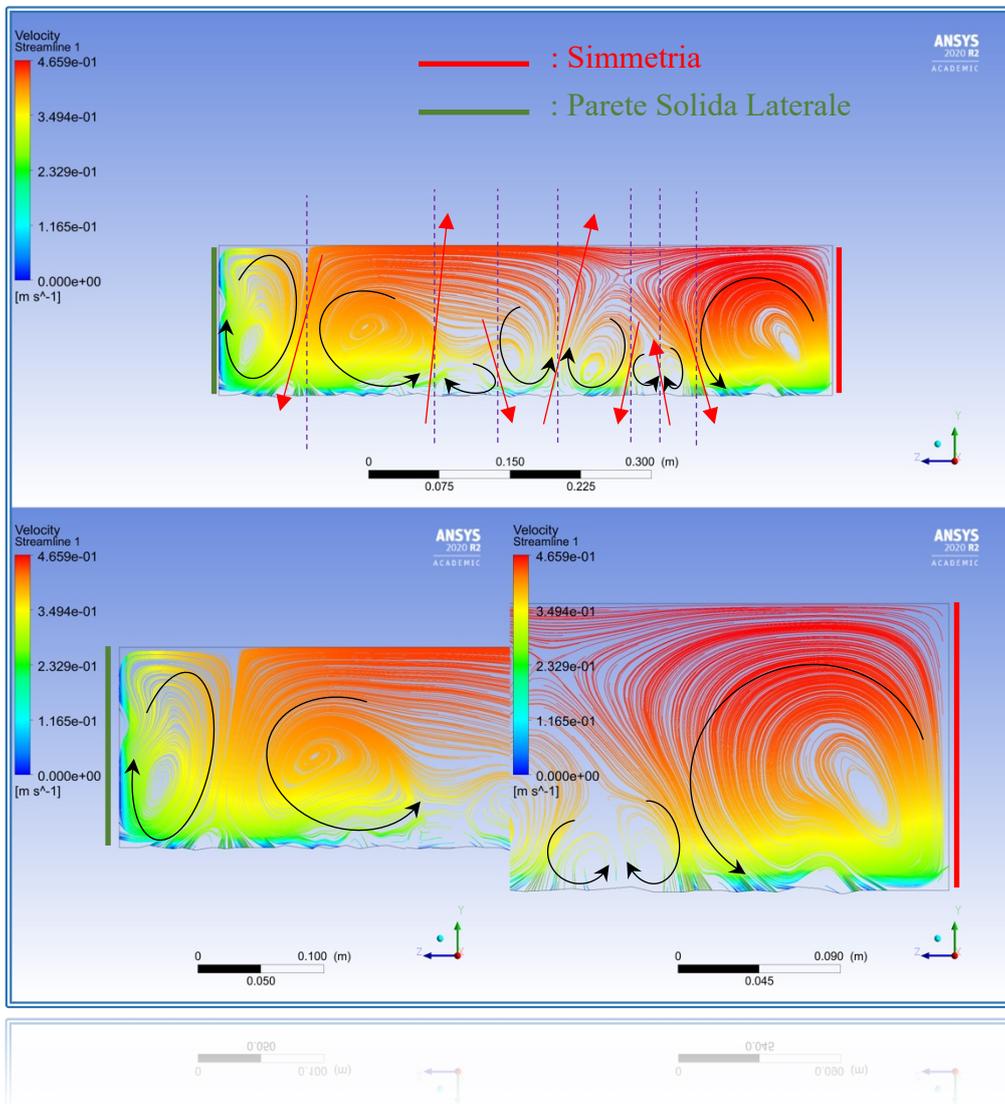


Fig. 4 – Configurazione delle linee di flusso che descrivono la struttura multicellulare delle correnti secondarie in relazione alla distribuzione spaziale della velocità longitudinale – Velocity 1 (Rect_F16_90_00_2mm_Quadratic)



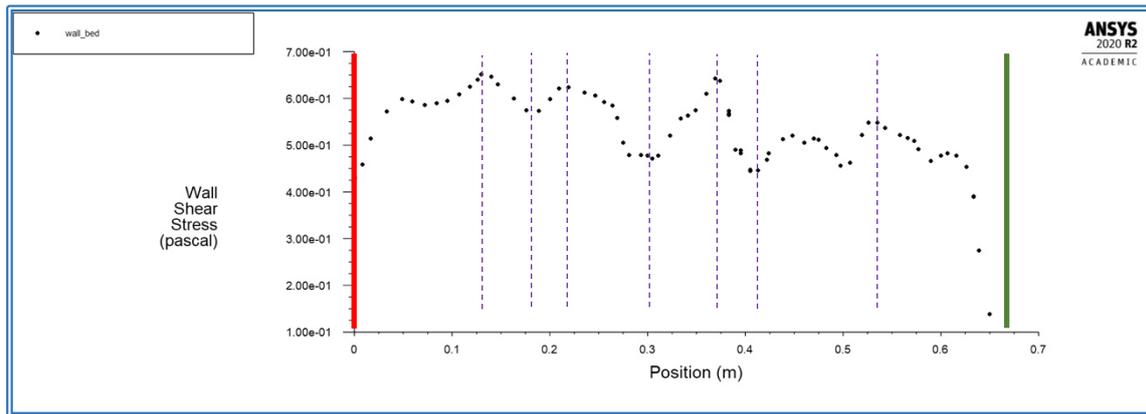


Fig. 4 – Distribuzione degli sforzi di taglio τ_b lungo l'estensione orizzontale della parete che costituisce il limite inferiore della sezione geometrica, corrispondente all'alveo di fondo (Rect_F16_90_00_2mm_Quadratic)

Le simulazioni conclusive sono state impostate ricercando ed ipotizzando una condizione morfologica dell'alveo di fondo, geometricamente vicina e simile alle possibili condizioni reali di conformazione morfologica dello stesso. Più nello specifico ed a tal proposito, tralasciando l'ipotesi di perfetta ed ideale planarità orizzontale, l'alveo è stato modellato nello spazio bidimensionale imponendo delle variazioni topografiche casuali ma comunque non superiori ai 5 mm in direzione verticale, ovvero tra i 2 mm al di sopra ed i 2 mm al di sotto della linea immaginaria rappresentativa della condizione di perfetta planarità. È stata sempre mantenuta una distribuzione uniforme della scabrezza per l'intera larghezza della sezione.

Dall'analisi dei risultati ottenuti è possibile osservare come, sia nel caso di impiego dello schema lineare che quadratico per la stima del termine di deformazione–pressione (Pressure–Strain Term), le configurazioni assunte dalle strutture a cella, rappresentative delle correnti secondarie di secondo tipo, risultano essere notevolmente differenti rispetto a quelle ottenute nell'ipotesi di alveo di fondo perfettamente piano, a parità di condizioni di scabrezza. In particolar modo le strutture medesime si dimostrano significativamente influenzate, in numero, forma e posizione dalle variazioni topografiche imposte sull'alveo di fondo, seppur queste siano di entità relativamente ridotta, soprattutto all'allontanarsi dai limiti di dominio costituiti dalle pareti solide laterali, pur mantenendo però sempre valida ed inalterata la logica d'alternanza di sensi orari ed antiorari nei punti di accostamento e convergenza, dove l'acqua tende a muoversi rispettivamente verso la superficie libera, in o verso l'alveo di fondo.

Tale influenza delle alterazioni topografiche imposte si ripercuote ed identifica chiaramente anche in merito ai valori assunti dagli sforzi di taglio, i quali appaiono distribuiti in modo piuttosto irregolare ma comunque coerente alle modalità di manifestazione delle correnti secondarie, con la presenza di picchi di massimo e di minimo rispettivamente allineati e coincidenti con le posizioni dei punti di convergenza tra celle appena sopra citati.

È possibile notare inoltre come i picchi di minimo più significativi ed evidenti degli sforzi di taglio sull'alveo siano comunque collocati generalmente, nonostante le possibili variazioni del battente idraulico, ad una data distanza in prossimità dalle pareti laterali, dato indicativo di una graduale e crescente intensità delle correnti secondarie all'avvicinarsi progressivo alle pareti stesse.



5. Conclusioni

Richiamando gli obiettivi e le finalità principali relative al lavoro di tesi qui presentato e discusso viene di seguito elaborata in battuta finale una serie di interessanti valutazioni ed ipotesi conclusive derivanti dall'analisi dei risultati ottenuti per mezzo delle simulazioni numeriche e dal confronto mirato e contestualizzato con i dati noti in letteratura esistente. Innanzitutto, gli esiti delle procedure svoltesi all'interno dell'ambiente per il calcolo fluidodinamico fornito dal software commerciale ANSYS Fluent hanno evidenziato una buona concordanza con i risultati di simulazione numerica pregressi ottenuti tramite ricorso al modello degli stress di Reynolds (RSM - Reynolds Stress Model) per le casistiche di studio inerenti ai canali rettilinei aperti a pelo libero. È stata riconosciuta in particolar modo una buona affidabilità ed efficacia nell'investigazione della struttura spaziale associata alle correnti secondarie all'interno di sezioni trasversali bidimensionali di forma regolare rettangolare e trapezoidale, nonché dei potenziali legami delle stesse con le distribuzioni degli sforzi di taglio sull'alveo di fondo e con le velocità longitudinali parallele alla direzione principale di avanzamento dell'acqua.

Il confronto integrato con alcuni risultati sperimentali derivanti da misurazioni nell'ambito di alcune casistiche sperimentali reali di laboratorio, sempre per il caso di sezioni regolari, ha evidenziato invece una parziale dissomiglianza e difformità comunque non trascurabile. Nello specifico, le distribuzioni tipicamente multicellulari delle correnti secondarie ricavate al termine delle procedure di calcolo tramite software ANSYS Fluent, con un'alternanza sempre presente dei sensi di rotazione orari e antiorari, hanno evidenziato un numero di "celle" complessivo sempre inferiore rispetto a quello ipotizzato e riconosciuto in virtù delle misurazioni di laboratorio sperimentali (Blanckaert et al. (2010): Influence of shallowness, bank inclination and bank roughness on the variability of flow patterns and boundary shear stress due to secondary currents in straight open-channels). L'impiego dello schema di tipo quadratico per la valutazione della correlazione tra deformazione e pressione nel modello degli stress di Reynolds (RSM - Reynolds Stress Model) ha restituito in particolar modo delle configurazioni delle correnti secondarie completamente difformi rispetto ai risultati di laboratorio. Gli effetti idrodinamici legati alle correnti secondarie sugli sforzi di taglio al fondo e sulle velocità longitudinali nelle sezioni esaminate tuttavia, sia in virtù delle simulazioni numeriche che delle misurazioni sperimentali di laboratorio, una tendenza comune ad apparire con intensità maggior in prossimità delle sponde laterali piuttosto che all'allontanarsi progressivo da queste.

L'interesse specificatamente rivolto all'analisi dei responsi comportamentali delle anguille europee durante i processi di spostamento migratorio verso valle, a partire dai risultati sperimentali di Piper et. al (2010) ha lasciato spazio ad un insieme di simulazioni numeriche aggiuntive svolte separatamente sul software ANSYS Fluent (Gruppo 4) con lo scopo di acquisire un punto di vista più completo e dettagliato in merito a tale argomentazione, una volta valutata in maniera il più coerente e contestuale possibile l'efficacia e la correttezza di impiego del modello degli stress di Reynolds (RSM - Reynolds Stress Model).

L'introduzione di una condizione più realistica di alveo con topografia irregolare, seppur caratterizzata da variazioni morfologiche contenute, ha fatto registrare una sostanziale ed importante differenza nei risultati finali rispetto alle casistiche di riferimento inerenti a condizioni ideali di perfetta regolarità geometrica dell'alveo stesso. Indipendentemente infatti dall'impiego diversificato dello schema lineare piuttosto che quadratico per la stima



del termine modellistico di correlazione tra deformazione e pressione, le strutture a cella rappresentative delle correnti secondarie sono risultate notevolmente alterate e meno prevedibili in termini di numero, posizione, dimensione e forma all'interno delle sezioni di interesse studiate. L'intensità delle correnti secondarie e degli effetti idrodinamici che ne conseguono è porsa comunque più elevata in prossimità delle pareti di sponda laterali che all'avvicinarsi della mezzera delle medesime sezioni, una tendenza comune ed in ogni caso già riscontrata nell'ipotesi di alvei di fondo perfettamente regolari dal punto di vista geometrico. Il legame tra i punti di massimo e minimo nelle distribuzioni dei valori degli sforzi di taglio sull'alveo di fondo ed i settori di convergenza tra celle rappresentative delle correnti secondarie già osservato, con i conseguenti movimenti imposti dell'acqua verso la superficie libera o verso l'alveo stesso, è stato riconosciuto e confermato.

In linea generale i valori di minimo degli sforzi di taglio sono stati sempre individuati contestualmente a punti dove si manifestano movimenti indotti dalle correnti secondarie dell'acqua verso la superficie libera, ovvero verso l'alto, e gradienti verticali ridotti delle velocità longitudinali. Tali punti risultano concentrati negli alvei irregolari esaminati all'interno di porzioni degli stessi individuabili come delle fasce abbastanza ristrette e comunque delimitate in prossimità delle pareti di sponda laterali.

A tal proposito, considerata la tendenza strumentalmente registrata di movimento da parte delle anguille stesse lungo due corridoi esterni in vicinanza delle sponde laterali (Piper et al., 2010), e considerata congiuntamente l'attitudine di avanzamento tipicamente advettiva e semi-passiva in prossimità del fondale di questi pesci, è stato ipotizzato che gli esemplari di questa specie ittica possano effettivamente sfruttare, grazie anche al loro sistema mecano-sensoriale interno, le porzioni di alveo più esterne e vicine alle sponde in corrispondenza delle quali gli sforzi di taglio risultano minimi ed i gradienti delle velocità longitudinali verso valle risultano maggiormente smorzati.

Tale contesto idrodinamico sarebbe in grado di giustificare infatti, quantomeno in linea teorica, un minor dispendio energetico ed una maggiore capacità di controllo nella fase di nuoto e di definizione delle traiettorie di spostamento da parte degli esemplari di questa specie ittica, senza la necessità di dover forzare dei contatti fisici diretti con gli ostacoli che li circondano e con le sponde per determinare il percorso migratorio migliore da seguire. Questo tipo di ipotesi si identifica come un possibile punto di partenza e spunto utile per l'esecuzione di ulteriori indagini più mirate da far proseguire in futuro, sia attraverso misurazioni strumentali in sito ed in laboratorio che per mezzo di ulteriori simulazioni numeriche su supporti software informatici adeguati. La valutazione ed il monitoraggio dei percorsi di migrazione delle anguille assieme all'analisi combinata della configurazione delle correnti secondarie in contesto di ricerca multidisciplinare ed unificato, potrebbe sicuramente fornire un valido contributo in tal senso.

6. Bibliografia e Sitografia

Viene di seguito riportato un elenco di insieme contenente le fonti utili bibliografiche e sitografiche richiamate e consultate ai fini dello sviluppo e redazione del lavoro di tesi:

- Bengt Andersson, R. Andersson, L. Håkansson, M. Mortensen, R. Sudiyo, B. vanWachem, L. Hellström, *Computational Fluid Dynamics for Engineers*, Cambridge, 2012
- Michael Church, Pascale Biron, Andre Roy, *Gravel Bed Rivers: Processes, Tools, Environments (2nd Edition)*, John Wiley & Sons, 2012
- K. Blanckaert, A. Duarte, A.J. Schleiss, *Influence of shallowness, bank inclination and bank roughness on the variability of flow patterns and boundary shear stress due to secondary currents in straight open-channels*, *Advances in Water Resources*, Elsevier, 2010
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0309170810001247?via%3Dihub>)
- D.M. Hargreaves, K. Ansari, H.P. Morvan, *Numerical Investigation into Secondary Currents and Wall Shear in Trapezoidal Channels*, *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers, 2011
(<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HY.1943-7900.0000317>)
- Piper AT., Manes C., Siniscalchi F., Marion A., Wright RM, Kemp PS., *Response of seaward-migrating European eel (*Anguilla anguilla*) to manipulated flow fields*, *Proc. R. Soc. B* 282: 20151098., 2015
(<http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2015.1098>)
- Sung-Uk Choi, Moonhyeong Park & Hyeongsik Kang, *Numerical simulations of cellular secondary currents and suspended sediment transport in open-channel flows over smooth-rough bed strips*, *Journal of Hydraulic Research*, 45:6, 829-840,
(<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00221686.2007.9521820>)
- N. De Cacqueray, H.P. Morvan, D.M. Hargreaves, *A computational study of shear stress in smooth rectangular channels*, *Journal of Hydraulic Research* Vol. 47, No. 1 pp. 50-57, International Association of Hydraulic Engineering and Research, 2009 (doi:10.3826/jhr.2009.3271)
- T. Stoesser, R. McSherry, B. Fraga, *Secondary Currents and Turbulence over a Non-Uniformly Roughened Open-Channel Bed*, 2015
(<https://www.mdpi.com/2073-4441/7/9/4896>)
- <https://www.computationalfluidynamics.com.au/tips-tricks-cfd-estimate-first-cell-height/>
- <https://www.simscale.com/forum/t/what-is-y-plus/82394>

- 
- <http://www-3.unipv.it/webidra/materialeDidattico/natale/tab13.pdf>
 - <https://waronwildlife.co.uk/2020/02/11/eels-slipping-towards-extinction/>
 - <https://www.iucnredlist.org/species/60344/45833138>
 - <https://www.biopills.net/migrazione-anguille/>
 - <https://www.google.it/maps/place/Longham,+Ferndown,+Regno+Unito/@50.775559,1.9110314,132m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x4873a254de06dae3:0xc410a6b08c02fdf!8m2!3d50.7861757!4d-1.9088135>
 - https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/main_pre.htm