

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II

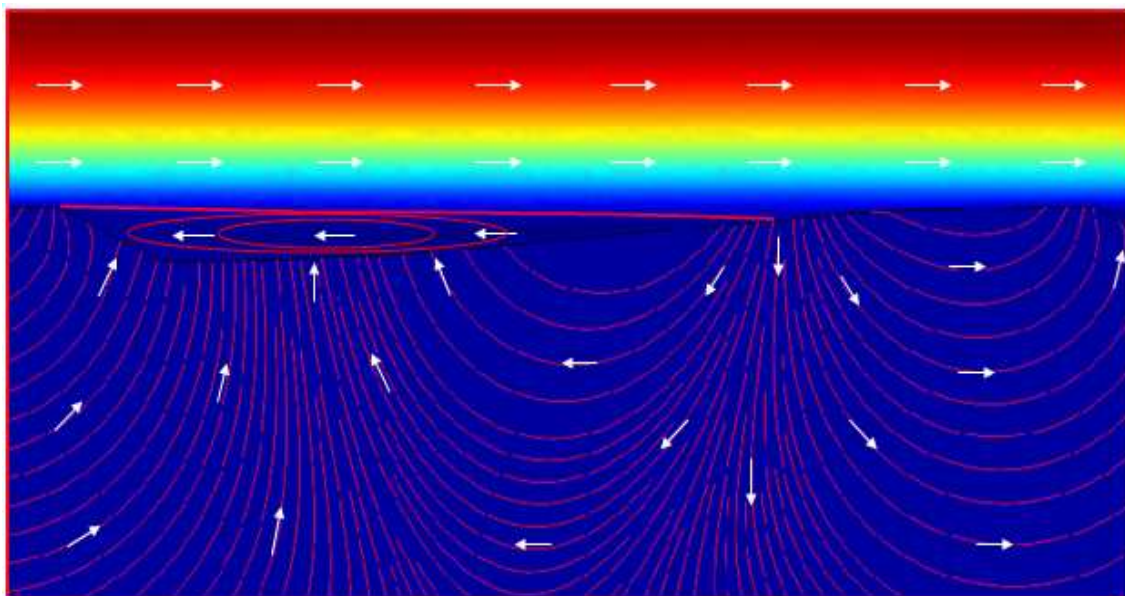


FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN
INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

ABSTRACT

SIMULAZIONE NUMERICA DEL MOTO ATTRAVERSO L'INTERFACCIA COLONNA IDRICA – MEZZO POROSO CON FORME DI FONDO



Relatore:

Ch.mo prof. ing.
Carlo Gualtieri

Candidata:

Chiara De Martino
matr. 324/199



Abstract

Il presente lavoro di tesi ha come oggetto la simulazione numerica del campo di moto che si instaura in presenza di un'interfaccia colonna idrica – mezzo poroso schematizzata con una successione di dune di forma irregolare. Lo scopo è studiare l'interazione tra una corrente idrica e le forme di fondo che determina significative variazioni del campo di moto in prossimità dell'interfaccia ed induce uno scambio advettivo di fluido con il sottostante mezzo poroso.

Trasportate dal fluido, sostanze quali nutrienti, ossigeno disciolto e contaminanti attraversano l'interfaccia, passando dalla corrente idrica al mezzo poroso o viceversa per desorbimento da uno strato di sedimenti, incidendo sulla qualità sia delle acque superficiali che delle acque sotterranee. Lo strato di sedimenti all'interfaccia, interessato da tali scambi advettivi, prende il nome di “zona iporeica” e i processi fisici e biogeochimici che in esso hanno luogo rivestono un ruolo cruciale nella conservazione della risorsa idrica e nell'ecologia del corso d'acqua.

L'attività sperimentale è stata preceduta da un lavoro di ricerca bibliografica, confluito nel primo capitolo della tesi, in cui vengono illustrati i risultati degli studi effettuati sull'interazione tra una corrente idrica e il sottostante mezzo poroso in presenza di forme di fondo. I risultati più interessanti scaturiscono da lavori di modellazione matematica e simulazione numerica che consentono di studiare il sistema naturale su scala locale al variare delle condizioni fisiche e idrodinamiche; questo approccio,

seguito nel presente lavoro di tesi, è frequentemente impiegato per verificare e riprodurre i dati empirici derivanti da osservazioni di campo e di laboratorio.

A tal proposito sono stati presi in esame gli esperimenti di van Mierlo e de Ruiter (1988) effettuati, presso il Delft Hydraulics Laboratory, su un canale artificiale che presenta una superficie di fondo di geometria complessa costituita da una serie di dune fisse, identiche per forma e dimensioni (Fig. 1). La misura delle grandezze del campo di moto turbolento è stata effettuata con un velocimetro laser Doppler (LDV) a due componenti per 16 sezioni trasversali lungo la duna centrale del canale.

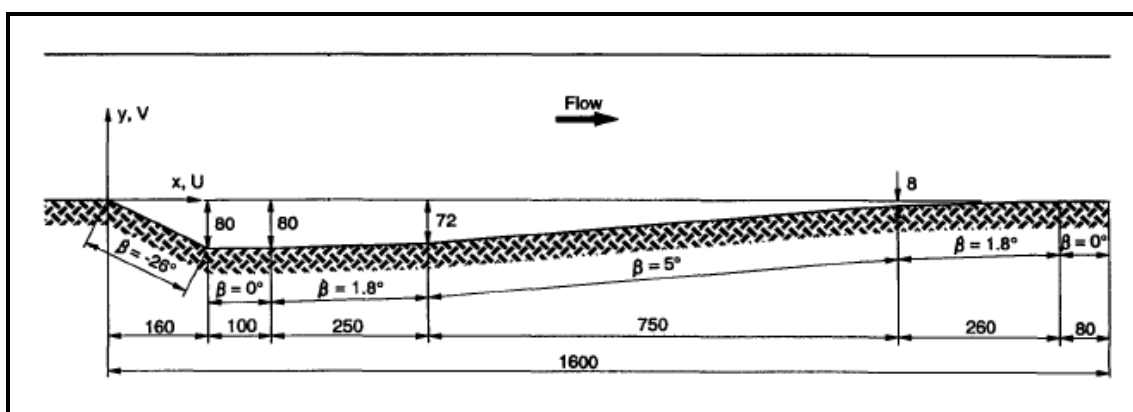


Figura 1
Profilo della duna di van Mierlo-de Ruiter (1988)
(dimensioni in mm, β = pendenza locale)

Il lavoro di modellazione matematica del sistema fisico naturale e simulazione numerica del campo di moto è stato condotto utilizzando il software di fluidodinamica computazionale COMSOL Multiphysics 3.5a.

Il secondo capitolo presenta i risultati delle simulazioni numeriche effettuate, in un regime idrodinamico di tipo laminare, per un dominio accoppiato colonna d'acqua – mezzo poroso (Fig. 2); l'interfaccia è schematizzata con una successione di cinque dune caratterizzate dalla geometria di van Mierlo e de Ruiter (1988) di Fig. 1.

Il flusso nella colonna d'acqua è governato dall'equazione di Navier-Stokes, mentre per il mezzo poroso il flusso delle acque sotterranee è governato dalla legge di Darcy. Il software risolve numericamente il sistema di equazioni differenziali, cioè fornisce i valori delle grandezze che descrivono il campo di moto del fluido, in ogni nodo della

griglia di calcolo (Fig. 2 e Fig. 3) resa più fitta in corrispondenza dell'interfaccia acqua – sedimenti, che è la zona di studio più interessante.

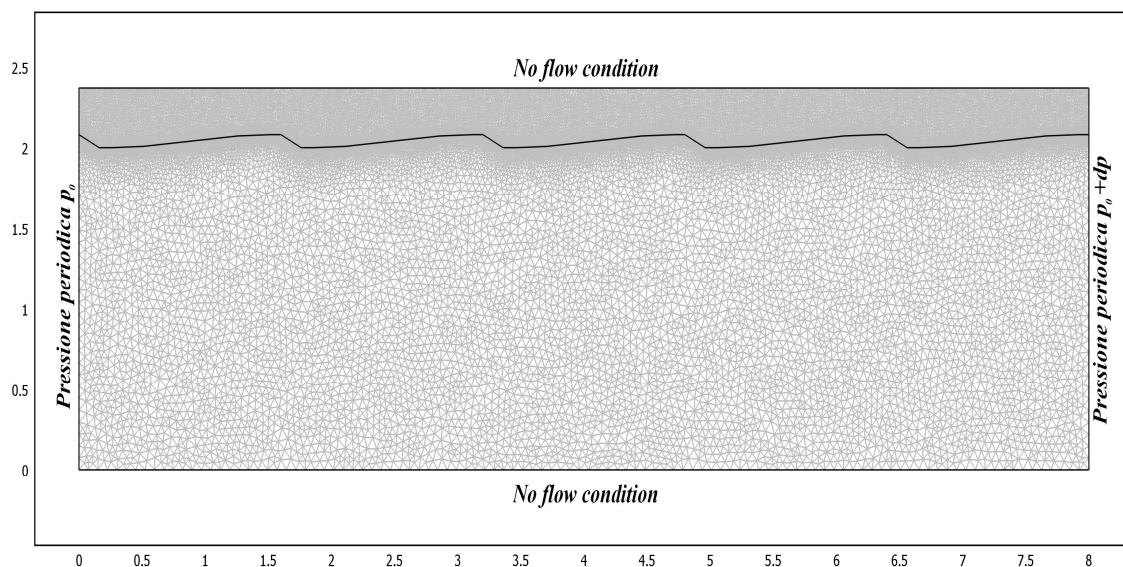


Figura 2
Dominio e griglia di calcolo del modello matematico

L'accoppiamento dei due sottodomini è stato ottenuto imponendo, come condizione al contorno all'interfaccia per l'equazione del flusso delle acque sotterranee, la distribuzione di pressione ricavata, sulla superficie della duna, dalla risoluzione delle equazioni di Navier-Stokes.

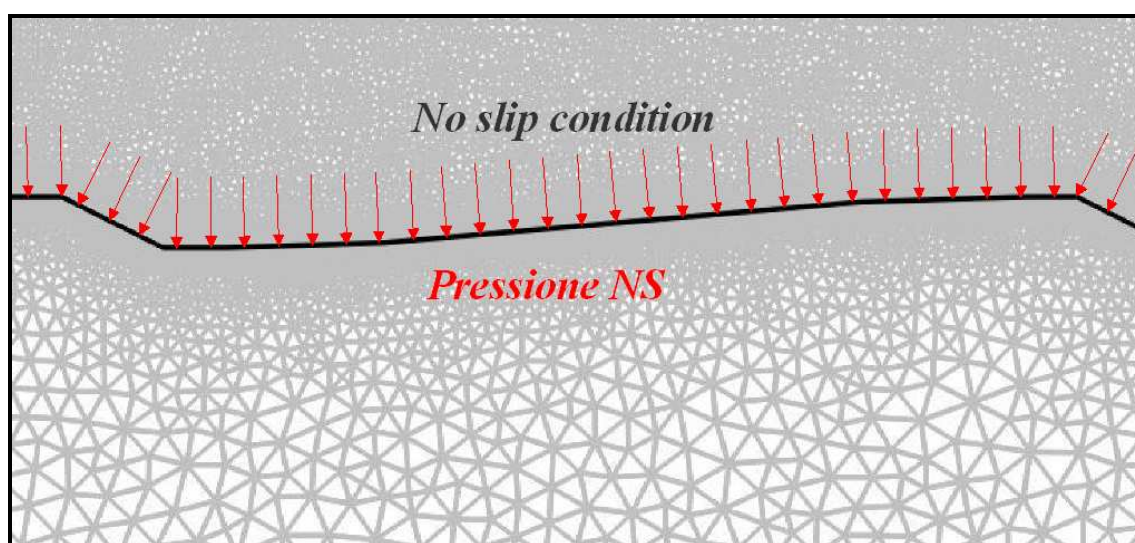


Figura 3
Condizioni all'interfaccia acqua – sedimenti

La risoluzione numerica del modello matematico fornisce un campo di moto nella colonna d'acqua che risente della presenza delle forme di fondo: in prossimità dell'interfaccia, l'interazione tra la corrente idrica e la duna determina la formazione di una zona di ricircolo caratterizzata dall'inversione del moto; i filetti fluidi si distaccano dalla superficie della duna in prossimità della cresta e la raggiungono dopo una distanza L_e chiamato lunghezza di separazione.

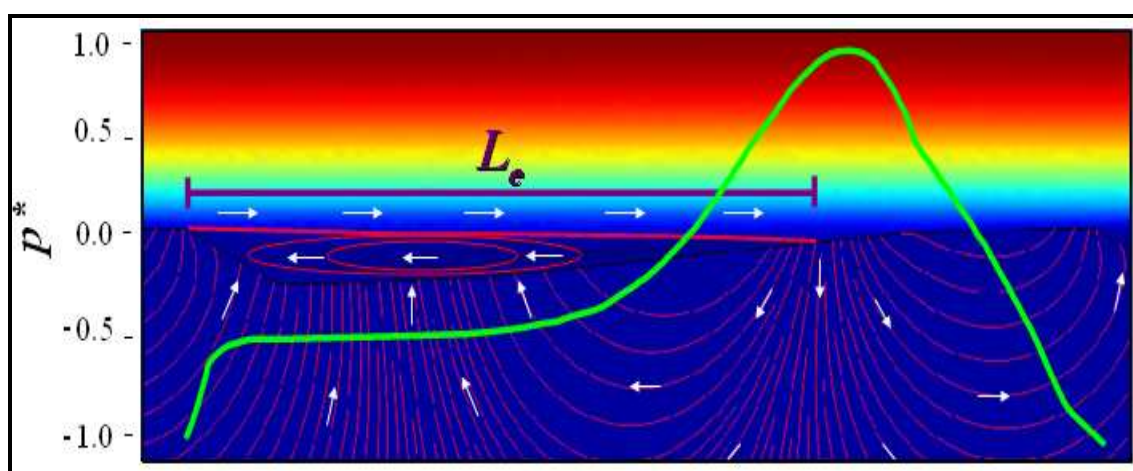


Figura 4
Zona di separazione e distribuzione di pressione all'interfaccia

La configurazione della zona di separazione è strettamente correlata alla distribuzione di pressione all'interfaccia: il punto di distacco corrisponde al punto di minima pressione sulla superficie della duna, mentre il punto di riattacco si trova poco a monte del punto di massima pressione.

Dunque, nella zona di separazione si rileva il massimo gradiente di pressione che controlla l'interazione tra colonna idrica e i sedimenti sottostanti: infatti, nel punto di massima pressione si riscontra un flusso di fluido dalla colonna idrica al mezzo poroso, mentre nel punto di minima pressione il fluido passa dal mezzo poroso alla colonna idrica. Ciò determina la formazione, nello strato di sedimenti in prossimità dell'interfaccia, di una zona di scambio di area A_z e profondità d_z in cui il flusso delle acque sotterranee è disturbato dai flussi di scambio advettivo indotti dalla presenza di forme di fondo.

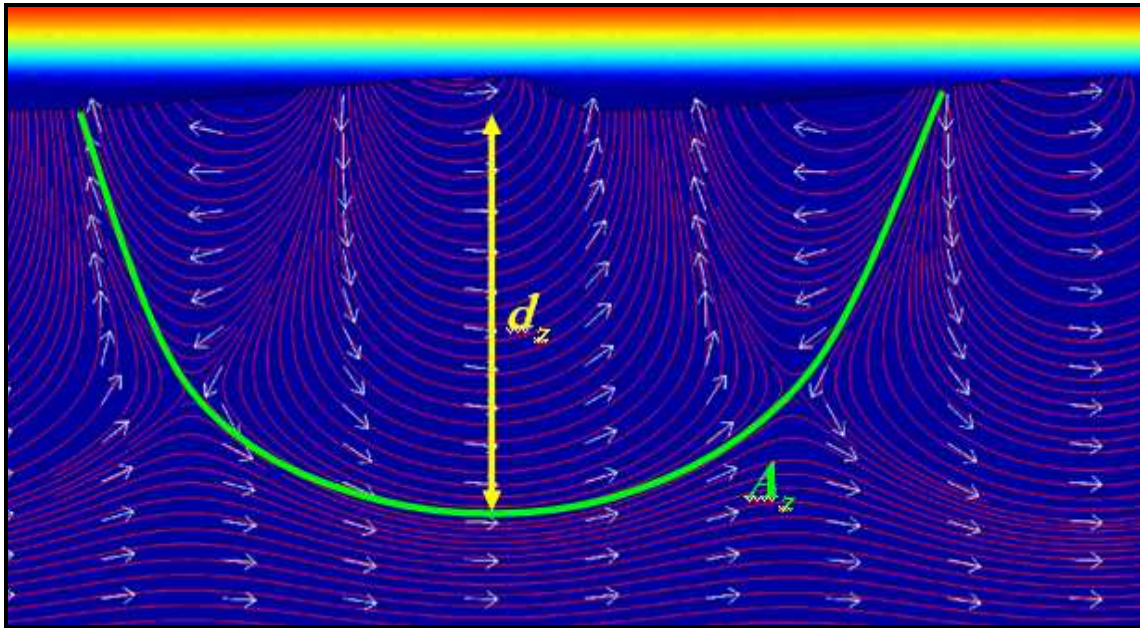


Figura 5
Zona di scambio interfacciale

I risultati delle simulazioni numeriche in regime di moto laminare condotte per diverso numero di Reynolds

$$Re_H = \frac{u_{avg} \cdot H_{bedform}}{\nu}$$

sono stati, in seguito, elaborati per comprendere come risponde il sistema fisico in esame a variazioni delle condizioni idrodinamiche.

All'aumentare del numero di Reynolds la lunghezza di separazione L_e (Fig. 4), la profondità d_z e l'area A_z della zona di scambio interfacciale (Fig. 5) crescono fino a tendere ad un asintoto orizzontale, come si osserva in Fig. 6; ciò testimonia che il sistema è maggiormente sensibile ai bassi numeri di Reynolds. In particolare la profondità d_z segue un modello di crescita del tipo Michaelis – Menten:

$$\frac{d_z}{L} = \frac{Re^{0,2028}}{2,8103 + Re^{0,2028}}$$

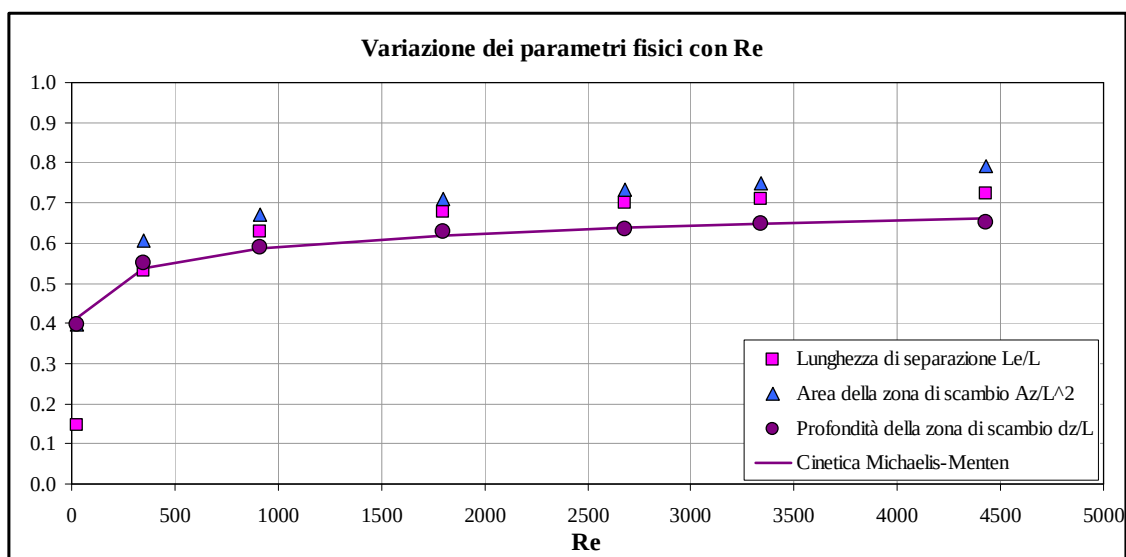


Figura 6
Effetto del numero di Reynolds sui parametri del sistema

L'aumento delle dimensioni della zona di separazione è confermato dall'analisi dei profili di velocità nella colonna d'acqua e della distribuzione di pressione sulla superficie della duna. All'aumentare di Re il punto di massima pressione si sposta verso valle lungo l'interfaccia, mentre il punto di minima pressione resta confinato in prossimità della cresta della duna; parimenti, nei profili di velocità l'inversione del moto della zona di ricircolo, si osserva per sezioni trasversali spostate verso ascisse crescenti.

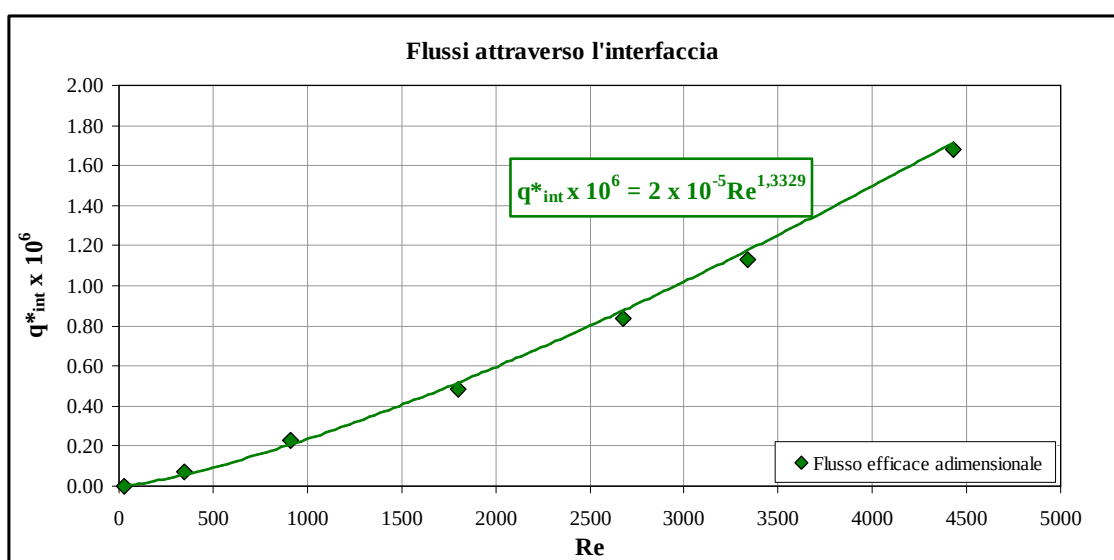


Figura 7
Effetto del numero di Reynolds sul flusso di scambio advettivo

Il flusso efficace adimensionale q^*_{int} che attraversa l'interfaccia acqua – sedimenti aumenta con il numero di Reynolds secondo una legge di potenza; il forte aumento dei flussi attraverso l'interfaccia corrisponde, tuttavia, ad un minor tempo di contatto tra i sedimenti del mezzo poroso e i soluti trasportati dal fluido che hanno, dunque, una minor incidenza sui processi fisici e biogeochimici iporeici.

Un'opportuna adimensionalizzazione dei parametri del sistema rispetto alla lunghezza della duna L ha consentito, inoltre, il confronto con i risultati di analoghe simulazioni numeriche eseguite per una duna triangolare. Le differenze riscontrate nei valori di L_e , ma soprattutto nelle dimensioni della zona di scambio interfacciale (Fig. 8) rivelano che il fenomeno di interazione di una corrente idrica con le forme di fondo è influenzato dalla geometria della duna; per cui, futuri studi dovranno essere indirizzati a prevedere l'effetto che hanno sui processi di scambio advettivo eventuali variazioni della geometria della forma di fondo.

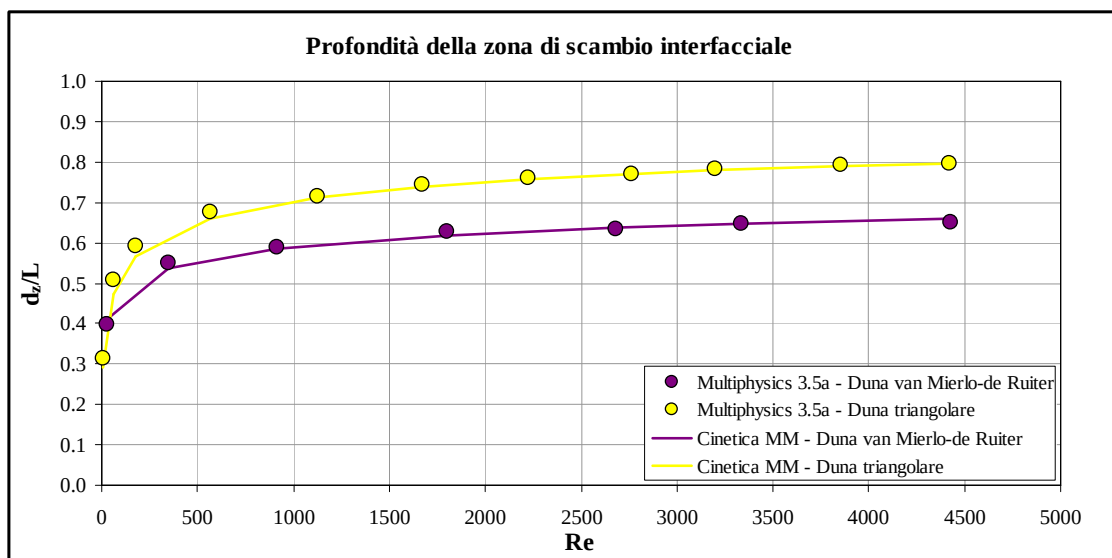


Figura 8
Effetto della geometria della duna sulla profondità della zona di scambio

L'ultimo risultato ottenuto dalla sperimentazione numerica, illustrato nel terzo capitolo, è la validazione di un modello matematico per descrivere il campo di moto turbolento di una colonna d'acqua con dune sul fondo, attraverso il confronto tra i valori simulati delle principali grandezze del campo di moto e i dati sperimentali di van Mierlo – de Ruiter (1988).



Nel lavoro di simulazione numerica in regime di moto turbolento, il modello matematico è stato risolto ignorando la presenza del mezzo poroso. Il sistema di equazioni che governa il flusso nella colonna d'acqua è costituito dall'equazione di continuità e dalle equazioni di Navier-Stokes mediate alla Reynolds; la stima della viscosità cinematica turbolenta ν_t è stata ottenuta grazie al modello di turbolenza $k-\omega$.

Il campo di moto turbolento al di sopra delle dune è stato simulato imponendo una velocità di ingresso della corrente idrica u_0 coincidente con il valore 0.633 m/s di velocità utilizzato da van Mierlo e de Ruiter (1988) nel caso T6 dell'esperimento su canale artificiale ed è stato imposto al software di "fermarsi", nella risoluzione numerica, ad una distanza dalla parete pari alla distanza di offset adimensionale δ_w^+ . I risultati, ottenuti per tre diverse distanze δ_w^+ , sono stati confrontati con i dati sperimentali forniti nelle 16 sezioni trasversali di Fig. 9, rilevate lungo la duna centrale del canale.

Il modello matematico che riproduce meglio i risultati dell'esperimento di van Mierlo – de Ruiter (1988) è quello per $\delta_w^+=200$: l'errore relativo tra dato numerico e dato sperimentale per la componente di velocità u varia tra un massimo di 8.29% e un minimo di 3.43%, per un valore medio di 6.24%; il valore simulato di lunghezza della zona di separazione $L_e=0.418\text{m}$ si avvicina molto al valore 0.423m stimato sperimentalmente.

Infine, nella pagina seguente si riporta, per alcune sezioni significative, il confronto tra i dati sperimentali della componente u del vettore velocità, i risultati della simulazione numerica effettuata per $\delta_w^+=200$ e i risultati della simulazione numerica di Cardenas e Wilson (2007). Nelle sezioni 2 e 4, rappresentative della zona di separazione della vena fluida dalla superficie della duna, le simulazioni con Multiphysics 3.5a riescono a riprodurre meglio i valori di velocità ricavati sperimentalmente; mentre nella parte superiore della colonna idrica e nelle sezioni 8 e 16, rappresentative rispettivamente della zona in cui la vena fluida ritrova il riattacco e della zona di flusso indisturbato, le simulazioni di Cardenas e Wilson dimostrano un miglior accordo con i dati sperimentali.

.

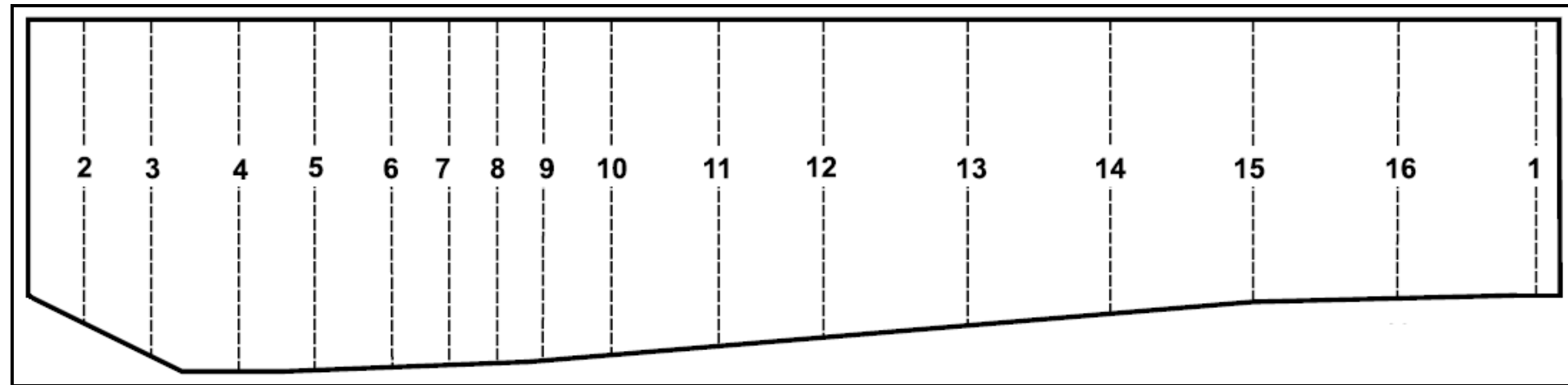
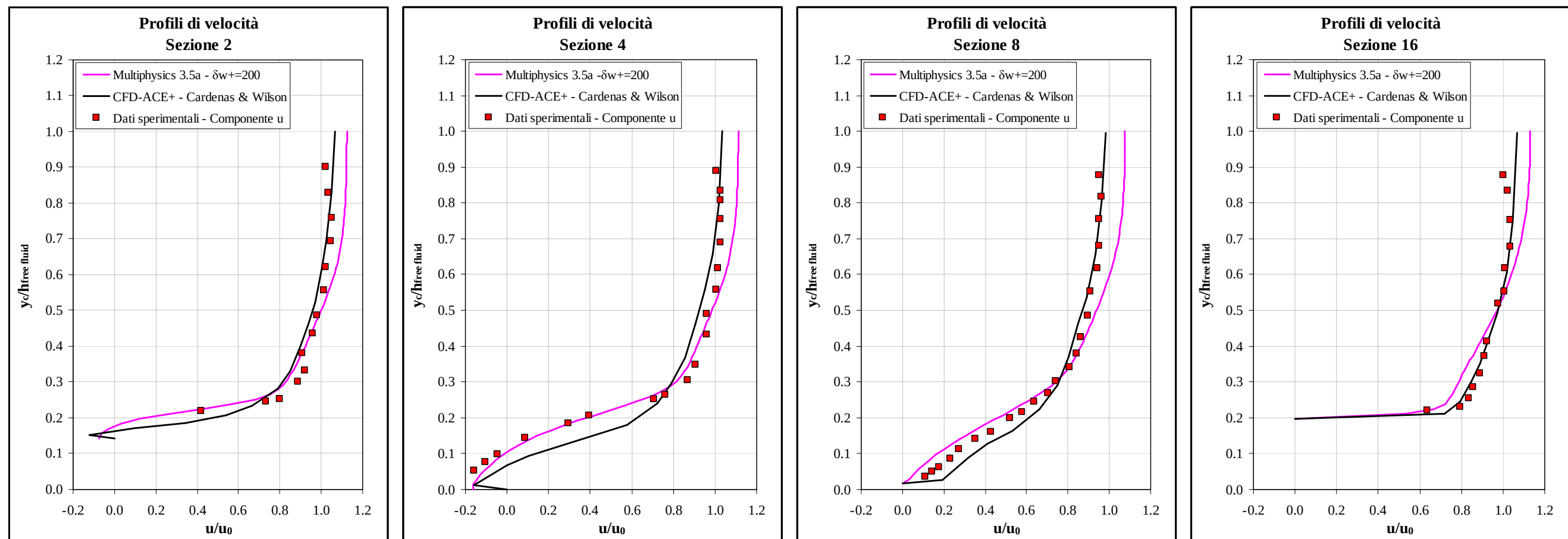


Figura 9
Sezioni della colonna d'acqua



Dall'analisi dei profili di velocità si può concludere che il modello matematico adottato riesce a simulare in modo adeguato il fenomeno di interazione tra una corrente idrica in regime di moto turbolento e una serie di dune presenti sul fondo del canale. Essendo rilevante l'incidenza che tale fenomeno ha sui processi di scambio advettivo che si hanno all'interfaccia acqua – sedimenti, si prospetta che futuri lavori di simulazione numerica, condotti sul dominio accoppiato colonna d'acqua - mezzo poroso, possano riprodurre con successo la fisica del sistema naturale studiato.