

Il tema di ricerca sviluppato nel presente lavoro, riguarda lo studio degli effetti che nascono all'interno del campo di moto al variare sia delle condizioni di moto sia delle diverse tipologie di fondali marini.

L'interazione tra onde e correnti influenza in modo rilevante l'idrodinamica costiera, modificandone sia lo strato limite al fondo che il campo di moto esterno. La complessità del fenomeno obbliga la classificazione di tale interazione in funzione dell'angolo d'attacco tra le forzanti: collineari, ortogonali e con angolo variabile. Tale interazione incide in maniera rilevante anche sulle dinamiche del trasporto solido al variare della scabrezza al fondo.

Per tali motivi, obiettivo di tale studio è stato quello di analizzare l'interazione di onde e correnti nei due casi limite (collinare e ortogonale) in presenza di fondali marini aventi differenti scabrezze.

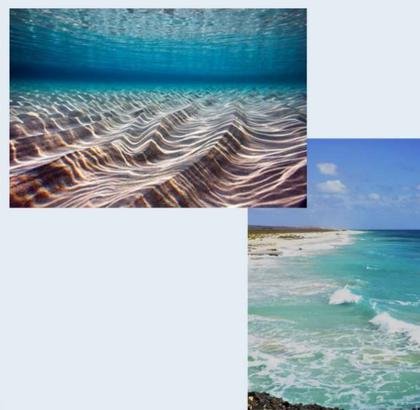
Il presente lavoro ha visto la realizzazione di due campagne sperimentali effettuate presso la Shallow Water Tank del DHI (Hørsholm, Danimarca) e il Laboratorio di Idraulica e Costruzioni Idrauliche dell'Università di Messina, rispettivamente per lo studio dell'interazione tra onde e correnti ortogonali e collineari. Per entrambe le campagne sono state realizzate tre diverse tipologie di fondale (sabbia, ghiaia e ripples), in corrispondenza dei quali sono stati estrapolati, con l'ausilio di velocimetri acustici e sonde di livello, dati di velocità e dati inerenti la superficie libera.

Le analisi effettuate sui dati sperimentali si sono focalizzate sui profili di velocità media e sugli sforzi tangenziali al fondo per tutte e tre le tipologie di scabrezza; in presenza di ripples è stato effettuato un ulteriore studio riguardante l'evoluzione delle celle di ricircolo e della vorticità. Più specificamente, per il caso di onde e correnti ortogonali, i profili di velocità mostrano che il rapporto tra la velocità dell'onda e della corrente e la scabrezza del fondo giocano un ruolo chiave ai fini della determinazione della scabrezza apparente e della velocità d'attrito. Infatti si è riscontrato, in regime dominato dalla corrente, che la sovrapposizione dell'onda sulla corrente aumenta la resistenza del flusso. Indipendentemente dal tipo di scabrezza del fondo, in regime dominato dall'onda invece, il caso di onde e corrente e il caso di sola corrente non mostrano particolari differenze.

In presenza di onde e correnti collineari, in regime dominato dalle onde la velocità media misurata in presenza di sola corrente assume sempre valori superiori rispetto al caso di onde e corrente indipendentemente dalle tipologie di fondali.

L'analisi delle componenti stazionarie mostra che sono individuabili celle di ricircolo sia in condizioni di sola onda che in condizioni di onda più corrente, in modo più o meno evidente in funzione dei parametri idrodinamici. È risultato che tali celle si appiattiscono quando la corrente si sovrappone all'onda. Si è riscontrato che la sovrapposizione della corrente riduce la corrente di ritorno o undertow presente nel caso di sole onde e porta ad un aumento della vorticità al di fuori dello strato limite. Invece, all'interno dello strato limite, la vorticità si riduce per effetto della corrente.

DOTTORATO di RICERCA in INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE e della SICUREZZA



Dottorato consorzio tra
Università degli Studi di Messina
Università degli Studi *Mediterranea* di Reggio Calabria

Coordinatore: Prof. Ing. Gaetano Bosurgi

Ing. Alessia Ruggeri

Effetti della scabrezza di fondali marini su campi di moto generati da onde e correnti

Tutor: Prof. Ing. Carla Faraci

Curriculum "Ingegneria Idraulica,
Costruzioni Idrauliche e Marittime,
Idrologia ed Energia delle Acque"





**Corso di Dottorato di Ricerca in
“Ingegneria Civile, Ambientale e della Sicurezza”
Ciclo XXXIV**

Curriculum “Ingegneria Idraulica, Costruzioni Idrauliche e
Marittime, Idrologia ed Energia delle Acque”
SSD ICAR/01

**Effetti della scabrezza di fondali
marini su campi di moto generati
da onde e correnti**

Dottoranda:
Ing. Alessia Ruggeri

Tutor:
Prof. essa Carla Faraci

Coordinatore del Corso di Dottorato:
Prof. Gaetano Bosurgi

Dipartimento di Ingegneria - Università degli Studi di Messina

Anno Accademico 2020/2021

**Sii sempre come il mare che infrangendosi
contro gli scogli, trova sempre la forza di
riprovarci.**

((Jim Morrison))

A mio marito

Indice

Sommario

Abstract

Capitolo 1	Introduzione	1
1.1	Premessa	1
1.2	Posizione del problema	2
1.3	Obiettivi	3
1.4	Metodologia	4
1.5	Limiti	5
1.6	Fasi del lavoro svolto	5
Capitolo 2	Stato dell'Arte.....	9
2.1	Generalità.....	9
2.2	Correnti generate dalle Onde	10
2.2.1	Radiation Stress.....	12
2.3	Trasporto di Massa.....	16
2.4	Strato Limite	17
2.5	Azioni del campo di moto sulla dinamica dei sedimenti	21
2.5.1	Interazione di Onde e Correnti su Fondali Scabri	23
2.5.1.1	Onde e Correnti Collineari.....	24
2.5.1.2	Onde e Correnti Ortogonali	26
2.5.2	Formazione Forme di Fondo.....	28
2.5.3	Interazione di onde e correnti in presenza di ripples.....	33
Capitolo 3	Modellazione fisica dell'interazione di onde e correnti su fondali scabri 39	
3.1	Generalità.....	39
3.2	Principi di similitudine e Modellazione fisica	40
3.2.1	Generazione Moto Ondoso	42
3.2.2	Modelli costieri: fondo fisso e fondo mobile	42
3.2.2.1	Modelli a fondo fisso	43
3.2.2.2	Modello a fondo mobile.....	44
3.2.3	Modelli utilizzati nel presente lavoro.....	46
3.3	Apparato sperimentale per lo studio dell'interazione di onde e correnti ortogonali	47
3.3.1	Generazione delle Forzanti	49
3.3.2	Preparazione dei fondi	50

3.4	Apparato sperimentale per lo studio dell'interazione di onde e correnti collineari	51
3.4.1	Generazione delle Forzanti	54
3.4.2	Preparazione dei fondi	55
3.5	Strumentazione adottata.....	56
3.5.1	Sonde di Livello.....	56
3.5.2	Acustic Doppler Velocimeter	56
3.5.3	Telecamera.....	58
3.5.4	Disposizione della strumentazione adottata all'interno della Shallow Water Basin	59
3.5.4.1	Calibrazione e Posizionamento Sonde di Livello.....	59
3.5.4.2	Tipologia e Disposizione dei Vectrino al variare del fondo	60
3.5.5	Disposizione della strumentazione adottata all'interno del "Tubo a U"	63
Capitolo 4	Campagna sperimentale e risultati ottenuti nel caso di onde e correnti ortogonali	65
4.1	Generalità.....	65
4.2	Campagna Condotta.....	66
4.2.1	Esperimenti Preliminari	66
4.2.1.1	Risultati degli esperimenti preliminari e discussione	68
4.2.2	Esperimenti Condotti	69
4.3	Analisi dei risultati.....	71
4.3.1	Oscillazione del pelo libero e analisi di riflessione.....	71
4.3.2	Profili di Velocità.....	77
4.3.3	Strato Logaritmico e Sforzi tangenziali	93
4.3.4	Celle di Ricircolo	100
4.3.5	Vorticità	107
Capitolo 5	Campagna sperimentale e risultati ottenuti nel caso di onde e correnti collineari	115
5.1	Generalità.....	115
5.2	Campagna condotta	116
5.2.1	Esperimenti preliminari	116
5.2.2	Esperimenti Condotti	118
5.3	Analisi dei Risultati	120
5.3.1	Fondo Mobile.....	120
5.3.1.1	Generazione delle forme di fondo	120
5.3.1.2	Formazione di vortici su ripples	125

5.3.2	Fondo Fisso.....	129
5.3.2.1	Moto stazionario.....	129
5.3.2.2	Interazione onde-correnti collineari.....	137
Capitolo 6	Conclusioni.....	143
Lista Tabelle	149
Lista Figure	151
Lista Simboli	157
Bibliografia	161

Sommario

Il tema di ricerca sviluppato nel presente lavoro, riguarda lo studio degli effetti che nascono all'interno del campo di moto al variare sia delle condizioni di moto sia delle diverse tipologie di fondali marini.

L'interazione tra onde e correnti influenza in modo rilevante l'idrodinamica costiera, modificandone sia lo strato limite al fondo che il campo di moto esterno. La complessità del fenomeno obbliga la classificazione di tale interazione in funzione dell'angolo d'attacco tra le forzanti: collineari, ortogonali e con angolo variabile. Tale interazione incide in maniera rilevante anche sulle dinamiche del trasporto solido al variare della scabrezza al fondo.

Per tali motivi, obiettivo di tale studio è stato quello di analizzare l'interazione di onde e correnti nei due casi limite (collinare e ortogonale) in presenza di fondali marini aventi differenti scabrezze.

Il presente lavoro ha visto la realizzazione di due campagne sperimentali effettuate presso la Shallow Water Tank del DHI (Hørsholm, Danimarca) e il Laboratorio di Idraulica e Costruzioni Idrauliche dell'Università di Messina, rispettivamente per lo studio dell'interazione tra onde e correnti ortogonali e collineari. Per entrambe le campagne sono state realizzate tre diverse tipologie di fondale (sabbia, ghiaia e ripples), in corrispondenza dei quali sono stati estrapolati, con l'ausilio di velocimetri acustici e sonde di livello, dati di velocità e dati inerenti la superficie libera.

Le analisi effettuate sui dati sperimentali si sono focalizzate sui profili di velocità media e sugli sforzi tangenziali al fondo per tutte e tre le tipologie di scabrezza; in presenza di ripples è stato effettuato un ulteriore studio riguardante l'evoluzione delle celle di ricircolo e della vorticità.

Più specificamente, per il caso di onde e correnti ortogonali, i profili di velocità mostrano che il rapporto tra la velocità dell'onda e della corrente e la scabrezza del fondo giocano un ruolo chiave ai fini della determinazione della scabrezza apparente e della velocità d'attrito. Infatti si è riscontrato, in regime dominato dalla corrente, che la sovrapposizione dell'onda sulla corrente aumenta la resistenza del flusso. Indipendentemente dal tipo di scabrezza del fondo, in regime dominato dall'onda invece, il caso di onde e corrente e il caso di sola corrente non mostrano particolari differenze.

In presenza di onde e correnti collineari, in regime dominato dalle onde la velocità media misurata in presenza di sola corrente assume sempre valori superiori rispetto al caso di onde e corrente indipendentemente dalle tipologie di fondali.

L'analisi delle componenti stazionarie mostra che sono individuabili celle di ricircolo sia in condizioni di sola onda che in condizioni di onda più corrente, in modo più o meno evidente in funzione dei parametri idrodinamici. È risultato che tali celle si appiattiscono quando la corrente si sovrappone all'onda. Si è riscontrato che la sovrapposizione della corrente riduce la corrente di ritorno o undertow presente nel caso di sole onde e porta ad un aumento della vorticità al di fuori dello strato limite. Invece, all'interno dello strato limite, la vorticità si riduce per effetto della corrente.

Abstract

The research theme developed in this work concerns the study of the effects that arise within the flow field, when both the flow field and the bed roughness vary.

The interaction between waves and currents influences in a relevant way coastal hydrodynamics, modifying both the boundary layer at the bottom and the external flow field.

The complexity of the phenomena forces the classification of such interaction as a function of the angle of attack between the forcings: collinear, orthogonal and with nonzero angle. Such interaction affects in a relevant manner also the dynamics of sediment transport as the bed roughness varies.

For these reasons, aim of this study was to analyse the interaction of waves and currents, in the presence of sea beds with different roughness, in the two-limiting case (collinear and orthogonal).

The present work concerned the performances of two experimental campaigns carried out at the Shallow Water Tank of DHI (Hørsholm, Denmark) and the Laboratory of Hydraulics and Hydraulic Constructions of the University of Messina, respectively for the study of the orthogonal and collinear interaction of waves and currents. For both campaigns, three different types of seabed were realized (sand, gravel and rippled), and velocity and the free surface data were measured with acoustic velocimeters and level probes.

The analyses carried out on the experimental data focused on the mean velocity profiles and shear stress for all the three types of bed; in the presence of ripples, a further analysis was carried out concerning the evolution of recirculation cells and the vorticity.

More specifically, for orthogonal waves and currents case, observation of the velocity profiles showed that the ratio between the wave and current velocity and the bed roughness plays a key role for apparent roughness and friction velocity. Indeed, it was found that, in current-dominated regime, the superposition of the wave on the current increases the flow resistance. Regardless of bed roughness, in a wave-dominated regime, the superposition of waves and current and the current only case are pretty similar.

In the presence of collinear waves and currents, in wave-dominated regime, the mean velocity in the current only case always shows higher values than those of waves and currents case for all three types of seabed.

Steady recirculation cells can be identified both in wave only and in wave plus current conditions, in a way more or less evident as a function of the hydrodynamic parameters. These cells were found to flatten when the current superimpose to the wave. It has been found that the superposition of the current reduces the undertow in the case of waves only and leads to an increase in vorticity outside the boundary layer. On the contrary, inside the boundary layer, the vorticity reduces due to the current effect.

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Premessa

Negli ultimi decenni si è riscontrata una maggiore sensibilità riguardo la difesa dei litorali dall'erosione costiera, problema che è diventato fortemente attuale a causa dell'importanza naturalistica, paesaggistica e ambientale delle spiagge. Le aree costiere hanno da sempre attratto l'uomo e le ragioni di tanto interesse vanno ricercate sia per le caratteristiche di natura ambientale, i.e. clima naturalmente temperato in presenza del mare, pescosità etc., sia per fattori di natura economica. Il mare ha costituito per secoli la via di comunicazione più efficace per il trasporto di merci e al giorno d'oggi rimane una via privilegiata per tale tipologia di trasporto, basti pensare a titolo d'esempio ai soli traffici petroliferi. Oltre a questi aspetti non va tralasciata la redditività turistica per mezzo di balneazione e attività ricreativa, che comporta un incremento turistico e quindi economico.

In altri termini, vi è un largo sfruttamento di tali aree costiere; per questo, nel tempo, tale utilizzo è risultato antitesi di sviluppo sostenibile, concetto ad oggi invece di particolare rilievo nella nostra cultura ambientale. Per sviluppo sostenibile si intende un processo in grado di soddisfare i bisogni della generazione attuale senza che questa comprometta il soddisfacimento di quelli delle generazioni future (Basili et al. (1998)). Pertanto, per assicurare ciò, non è possibile prescindere da una approfondita conoscenza dei fenomeni che sono causa principale di alterazioni su importanti fenomeni naturali come il trasporto di sedimenti lungo costa. Modifiche del naturale ciclo del trasporto dei sedimenti possono innescare significativi processi erosivi e indurre quindi il ritiro del litorale, che, a sua volta, può minacciare gli habitat naturali ed esporre comunità costiere ad un aumento del rischio di tempeste marine (Nicholls e Cazenave (2010)).

1.2 Posizione del problema

I fattori scatenanti i fenomeni come il trasporto di sedimenti sono di natura molteplice e complessa, ma al fine di contribuire ad una più approfondita comprensione dei processi, appare estremamente importante lo studio dell'idrodinamica in prossimità della costa, più specificamente laddove la contemporanea presenza di onde e correnti può interagire con la terra emersa modificandone gli equilibri. La conoscenza di tale argomento, certamente interessante dal punto di vista scientifico, risulta indispensabile per la risoluzione di svariati problemi specifici connessi alla morfodinamica dei litorali. Onde e correnti di solito coesistono nell'ambiente costiero, e la loro interazione, essenzialmente non lineare, genera un flusso combinato che dà luogo a un'idrodinamica piuttosto complessa. Nello specifico, se da un lato i sedimenti vengono facilmente mobilitati e posti in sospensione dall'azione del moto ondoso, dall'altro la corrente consente il facile trasporto delle particelle.

Ruolo chiave risulta essere l'angolo d'attacco tra queste due forzanti in quanto motivo di importanti variazioni nel campo di moto. A tal riguardo è possibile individuare i due casi limiti rappresentativi del moto combinato: onde e correnti ortogonali e collineari. Il primo caso, risulta essere il caso più comune da riscontrare nella regione vicino alla costa: basti pensare agli effetti indotti da un attacco del moto ondoso non ortogonale alla riva, il quale, per via di fenomeni noti come "radiation stress" (si veda il Capitolo 2) inducono la formazione di una corrente litoranea. Il secondo caso, può essere invece individuato quando un'onda di mare si sovrappone ad un'onda di marea, con periodi molto maggiori e quindi tale da poter essere modellata come una corrente codirezionale alla propagazione dell'onda stessa.

L'effetto della presenza delle onde su una corrente stazionaria è fortemente influenzato dai processi che avvengono all'interno dello strato limite, quella regione prossima al fondo che svolge un ruolo importante nella determinazione delle caratteristiche del campo di moto. Inoltre, occorre approfondire lo studio delle dissipazioni di natura viscosa e della vorticità all'interno di tale strato per quantificare le dissipazioni di energia che avvengono al di sotto di un'onda di mare, essendo tale zona particolarmente interessata dal trasporto di sedimenti.

Il problema è ulteriormente complicato dalle caratteristiche del fondale, che può presentare diverse scabrezze o essere modellato con forme di fondo, ad esempio i ripples, che influenzano notevolmente i processi di trasporto solido. Difatti il flusso si separa in corrispondenza di tali forme di fondo, generando dei vortici che incrementano la quantità di materiale sedimentario non coesivo movimentato, comportando altresì un incremento sostanziale della scabrezza al fondo.

Il presente lavoro mira a contribuire alla conoscenza scientifica e tecnica sull'interazione tra corrente e onde in presenza di diverse tipologie di fondali al fine di individuare come e quanto la presenza di entrambe le forzanti, nei due casi limite sopra citati (interazione ortogonale e collineare tra onde e correnti), alteri la distribuzione verticale della velocità del campo di moto, con effetti, di conseguenza, sulla capacità di trasporto dei sedimenti.

1.3 Obiettivi

Negli ultimi decenni molti studi hanno contribuito alle conoscenze riguardo l'interazione onda-corrente, tuttavia l'attuale stato dell'arte mostra ancora alcune criticità.

In tale contesto, le indagini di campo ancora oggi risultano essere particolarmente complesse a causa sia della continua variazione delle condizioni di flusso, sia per via delle numerose incognite che potrebbero influenzare il campo di misurazioni, potendo in tal caso determinare con precisione solo alcuni parametri come le batimetrie e l'elevazione della superficie delle onde. Considerare le condizioni naturali prevalenti e riprodurle in un ambiente più controllato come il laboratorio, che è il contesto più adatto per realizzare una configurazione corretta e ottenere misurazioni accurate, appare dunque una metodologia ragionevole.

Sebbene molti studi sperimentali abbiano fatto luce sulle attuali conoscenze del fenomeno, vi è una significativa mancanza di dati sperimentali in presenza di onde e correnti sia collineari (Kemp e Simons (1982,1983), Visser (1987), Lodahl et al. (1998)), che ortogonali (Musumeci et al. (2006), Faraci et al. (2008), Lim et al. (2012)) o con angolo d'attacco variabile (Lim e Madsen, 2016).

Inoltre, le strutture di laboratorio che sono in grado di simulare il flusso combinato onda-corrente sono limitate, e gli studi su questo specifico campo di ricerca poco numerosi (Fredsoe et al. (1999), Faraci et al. (2018) e Lim e Madsen (2016)). Inoltre, le opere esistenti presentano un focus di studio abbastanza eterogeneo, con indagini incentrate sul trasporto dei sedimenti, sull'evoluzione delle forme di fondo, sull'effetto del trasporto di massa delle onde ecc.

È proprio in questo contesto che si inserisce il presente lavoro di tesi che ha visto lo sviluppo di due campagne sperimentali atte allo studio dell'interazione di onde e correnti nei due casi limite: onde e correnti ortogonali e onde e correnti collineari. Alla luce di quanto finora detto, tale lavoro si propone come primo obiettivo quello di fornire nuovi set di dati sperimentali comparabili tra loro per l'interazione di onde e correnti ortogonali e collineari in presenza di diverse tipologie di fondali, atti alle validazioni di eventuali modelli analitici e numerici che finora sono stati per lo più validati con un numero ridotto di prove effettuate in canali, cioè con onde e correnti che si propagano nella stessa direzione o in direzione opposta ed inoltre tralasciando spesso l'importante aspetto della scabrezza al fondo.

In presenza di entrambe le tipologie di interazioni tra le forzanti, è risultato di particolare interesse indagare:

- le modifiche del profilo di velocità nella direzione della corrente e/o dell'onda in presenza di flusso combinato;
- le variazioni che dipendono oltre che dall'angolo di attacco anche dalla scabrezza al fondo, fatta variare nel corso delle sperimentazioni;
- il rapporto tra velocità media della corrente e dell'onda.

In relazione a tale rapporto, gli studi precedenti presenti in letteratura riproducevano nello stesso apparato sperimentale per lo più una sola delle due condizioni o quella dominata dalla corrente (current dominated, CD) dove il rapporto tra la velocità della corrente e dell'onda è maggiore di uno o quella dominata dall'onda (wave dominated WD), con rapporto minore di uno. Nel corso del presente lavoro, in presenza di onde e correnti ortogonali grazie all'apparecchiatura adottata è stato possibile generare svariati campi di moto al fine di indagare entrambi i casi (CD e WD), ampliando ulteriormente il

range di dati investigati. Lo sviluppo di tali campagne sperimentali ha fornito i dati necessari allo studio del comportamento degli sforzi tangenziali al fondo responsabili oltre che del trasporto solido al fondo anche della formazione di forme di fondo, altro aspetto studiato nel presente lavoro.

Un ulteriore obiettivo che ci si è proposto di perseguire è stato lo studio del campo di moto medio e la formazione di vortici che si generano in presenza di tali forme di fondo al variare delle condizioni al contorno. A tale scopo col presente lavoro si sono inoltre analizzate le variazioni nelle condizioni di innesco di tali vortici in presenza di fondo fisso e mobile e in presenza sia di sole onde che di interazione onde-correnti sia ortogonali che collineari.

1.4 Metodologia

Come precedentemente annunciato, il presente lavoro ha riguardato l'acquisizione e l'analisi di dati ottenuti per mezzo di due campagne sperimentali.

La prima, volta allo studio dell'interazione di onde e correnti ortogonali denominata come WINGS (Waves plus currents INTERacting at a right anGLE over rough bedS) è stata condotta presso la Shallow Water Tank del Danish Hydraulic Institute DHI (Hørsholm, Danimarca), adatta per lo studio degli effetti combinati dovuti ad onde e correnti in differenti regimi. Durante questa campagna sono stati acquisiti dati di velocità e dati relativi all'elevazione della superficie libera in presenza di tre diverse tipologie di fondali fissi (sabbia, ghiaia e ripples). All'interno della vasca è stato possibile disporre una serie di velocimetri acustici e sonde resistive atte all'individuazione dei profili di velocità e all'evoluzione della superficie libera.

La seconda campagna sperimentale è stata condotta presso il Laboratorio di Idraulica e Costruzioni Idrauliche del Dipartimento di Ingegneria di Messina all'interno di un'apparecchiatura denominata "Tubo a U" a seguito della sua forma, che consente la simultanea generazione di un moto oscillante, per mezzo di un pistone, e di un moto stazionario codirezionale, per mezzo di una pompa. Durante questa campagna sono state effettuate prove in presenza di fondo mobile, volte allo studio della generazione delle forme di fondo e della formazione dei vortici, e prove su tre differenti fondali fissi (sabbia, ghiaia e ripples) misurando, al variare della scabrezza, i profili di velocità instauratisi in presenza del campo di moto per mezzo di un velocimetro acustico.

Durante entrambe le campagne sperimentali sono state effettuate prove di sola corrente (current only, CO), prove di sola onda (wave only, WO) e prove di onde e correnti (wave and current, WC).

Le analisi condotte sui suddetti dati acquisiti durante ambedue le campagne sono state effettuate cercando di mantenere laddove possibile un criterio comune, al fine di comprendere meglio le variazioni che subentrano nei due casi limite di interazione tra le forzanti in termini di:

- caratterizzazione del campo di flusso
- influenza del moto oscillatorio su un moto stazionario all'interno dello strato limite
- alterazione delle sollecitazioni tangenziali
- generazioni di moti di ricircolazione
- evoluzione della vorticità in presenza di forme di fondo come i ripples

Al fine di validare i dati ottenuti, in presenza di fondo con ripples si è condotta un'analisi preliminare di confronto dei dati ottenuti nella campagna sperimentale di onde e correnti collineari relativamente al campo di moto stazionario con il modello numerico di Scandura et al. (2016).

1.5 Limiti

Gli ostacoli derivanti dallo studio dei fenomeni naturali inerenti all'idrodinamica tipica delle aree costiere hanno portato negli anni all'utilizzo sperimentale di modelli fisici sviluppati in laboratorio, i quali se da un lato garantiscono notevoli vantaggi in termini di validità e affidabilità dei dati ottenuti, non sono esenti da limiti di diversa natura. Tali limiti sono legati sia al modello fisico in sé sia ai limiti dell'apparecchiatura utilizzata; tra i primi vanno sicuramente messi in gioco le condizioni al contorno e le eventuali forzanti che possono generarsi in natura che non sono né replicabili né tantomeno controllabili. Inoltre a causa della non linearità intrinseca del problema le condizioni sperimentali simulate non consentono una piena verosimiglianza tra il modello e il prototipo. Questo problema viene solitamente superato scegliendo appropriati parametri adimensionali che descrivono il fenomeno, funzioni del rapporto tra le forze che entrano in gioco. Il presente lavoro rispetta i criteri di scala di Froude in quanto, come successivamente illustrato, risultano essere i più idonei al caso studio trattato.

In linea di massima, gli esperimenti condotti all'interno dei laboratori rappresentano una drastica semplificazione delle condizioni del campo. Ad esempio, nella maggior parte degli studi sperimentali, nei quali ci si propone di effettuare analisi statistiche e medie in fase, e anche nel presente lavoro, le onde generate sono monocromatiche, la topografia del fondale orizzontale, la corrente e le onde interagiscono mantenendo durante il corso degli esperimenti sempre lo stesso angolo d'attacco. Tali semplificazioni però risultano necessarie per la risoluzione e la comprensione degli aspetti non lineari del fenomeno, il quale richiede la scomposizione di un campo di complessa risoluzione in problemi più elementari. In aggiunta a quelli sopracitati, le apparecchiature utilizzate presentano ulteriori limiti legati ad esempio alle dimensioni o al range di funzionamento limitato a determinati parametri implementabili. Per ciò che concerne il tubo a U si sono riscontrati limiti meccanici ed elettrici del pistone ad alte frequenze o della pompa ad alti giri (>20giri/sec); per la campagna WINGS si è riscontrato un range ristretto entro cui fare variare la profondità dell'acqua e una portata di ricircolo costante pari a $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Inoltre le strumentazioni utilizzate (velocimetro acustico e sonde di livello) sono dotate di risoluzione e sensibilità fissate che possono limitare l'accuratezza della misura. Tuttavia, le apparecchiature di misurazione del flusso utilizzate in tutti gli esperimenti hanno una precisione di 0.001 m/s , che è ragionevolmente inferiore all'unità di misura della velocità presente in questi studi, motivo per cui gli errori relativi alla strumentazione sono da considerare nella maggior parte dei casi di bassa entità.

1.6 Fasi del lavoro svolto

Il presente elaborato è frutto, come già accennato in precedenza, di due principali lavori svolti in due importanti laboratori di ingegneria marittima entrambi dotati di apparecchiature particolarmente complesse relativamente poco comuni, che verranno illustrate con accuratezza nello sviluppo della presente tesi.

Capitolo 1 - Introduzione

Come già accennato, un ruolo fondamentale nello studio del trasporto solido in co presenza di forzanti è dato dalla scabrezza del fondale. Infatti, quando la corrente si sovrappone alla sola onda, la velocità del flusso al fondo aumenta per basse scabrezze, diminuisce invece, per macro scabrezze (Faraci et al. 2008). La presenza di forme di fondo, in tali circostanze, può essere assimilabile al caso di macro scabrezze, coinvolgendo lo strato limite dell'onda fino a diventare turbolento e a far aumentare la scabrezza idraulica fino a un ordine di grandezza in presenza di onde e correnti (Fredsoe et al., 1999). Benché la letteratura scientifica su questi argomenti sia sempre più prolifica, a seguito di ricerche bibliografiche, espone nei successivi capitoli, risulta evidente che manchi una visione d'insieme delle cause scatenanti la variazione del campo di moto funzione, in compresenza delle forzanti, delle varie tipologie di scabrezze al fondo.

A tal proposito in entrambe le campagne condotte si è scelto di creare fondali aventi diverse caratteristiche individuando tre tipologie in relazione alla scabrezza costituente il fondale: sabbia, ghiaia, e ripples. Una volta realizzati i fondali in relazione alle disponibilità progettuali delle due apparecchiature sono state scelte disposizione e tipologie di strumentazioni da usare per l'acquisizione dei dati. Nella prima campagna vista la vastità del bacino entro cui simulare le forzanti i diversi fondali sono stati riprodotti per un'area complessiva pari a 37.5 m² e disposti all'interno della vasca 5 misuratori acustici di velocità (Vectrino, Nortek (2009)) e 24 sonde di livello per monitorare l'elevazione della superficie libera.

Nel "tubo a U" vista la sua struttura, non esistono svariate possibilità di strumentazione adottabile; nella maggior parte dei casi viene usata la PIV (Particle Image Velocimeter), un metodo ottico che consente, per mezzo di un apposito tracciante immerso nel fluido, di effettuare misure ottiche del campo di moto del fluido. Tale strumentazione ha costi e dimensioni particolarmente elevati e a tal proposito, vista l'indisponibilità, nel presente lavoro si è realizzata un'apposita modifica all'apparecchiatura atta a consentire le misurazioni di velocità per mezzo del Vectrino. Nello specifico nella parte sommitale del canale in pressione è stato realizzato un nuovo pannello opportunamente forato, destinato all'alloggiamento della strumentazione, rendendo l'intero sistema a tenuta stagna e garantendone costantemente la messa in pressione.

Nel corso delle campagne sperimentali sono stati svolti un numero elevato di esperimenti; in particolare nella prima campagna, svolta al DHI in Danimarca, sono state effettuate prove preliminari ed effettive per un totale di 92 esperimenti e nella seconda, svolta presso il Laboratorio di Idraulica di Messina, 65 prove.

In particolare il presente elaborato di tesi è così strutturato:

- Excursus dello stato dell'arte su interazione di onde e correnti al variare dell'angolo d'attacco e della scabrezza al fondo con particolare attenzione allo studio dello strato limite (Capitolo 2).
- Cenni sulla modellazione fisica adottata e illustrazione dettagliata delle campagne sperimentali svolte, con particolare attenzione sia all'intero set up che alle strumentazioni adottate durante le due campagne sperimentali, "WINGS" e "Tubo a U" (Capitolo 3).
- Analisi e risultati della campagna sperimentale inerente le onde e correnti ortogonali. Il primo paragrafo mostra i risultati delle prove preliminari che sono risultate essere fondamentali per diverse scelte adottate durante gli esperimenti condotti (disposizione strumenti e tempi di acquisizione); successivamente vi è l'analisi della superficie libera per mezzo dei dati acquisiti dalle sonde di livello

disposte lungo la vasca nel corso degli esperimenti; attraverso i dati estrapolati dal Vectrino vengono riportate analisi e risultati relativi a profili di velocità lineari e in scala semi-logaritmica, analisi di sforzi tangenziali e scabrezza equivalente per tutti e tre i fondali indagati. Inoltre su fondo con ripples viene mostrato lo studio della formazione delle celle di ricircolo e della vorticità confrontando casi di sola onda e casi di onde e correnti (Capitolo 4).

- Per la campagna di onde e correnti collineari vengono dapprima illustrati risultati preliminari su fondo liscio atti all'individuazione dei parametri ottimali di prestazione dell'apparecchiatura; successivamente vengono riportati in presenza di fondo mobile i risultati ottenuti in termini di analisi morfodinamiche sull'evoluzione dei ripples con particolare attenzione alla formazione di vortici chiaramente visibili per mezzo di acquisizioni fotografiche alle varie fasi di un ciclo d'onda per il caso di sola onda e il caso di onde e correnti. Infine vengono riportati i risultati ottenuti per mezzo dei dati acquisiti con il Vectrino in termini di profili di velocità nei tre fondi fissi indagati (sabbia, ghiaia e ripples) nelle tre condizioni di campo di moto: sola corrente, solo onda e onde e correnti. In presenza di moto stazionario è inoltre riportato un confronto con un modello numerico (Scandura, 2016) dei profili di velocità ottenuti su fondo con ripples (Capitolo 5).
- L'ultimo capitolo è dedicato a discussioni conclusive del presente lavoro, individuando analogie e difformità tra i due casi studio e individuando eventuali sviluppi di lavoro futuri (Capitolo 6).

Capitolo 2

Stato dell'Arte

2.1 Generalità

L'idrodinamica della regione costiera è solitamente caratterizzata dalla presenza simultanea di onde e correnti. Tale interazione gioca un ruolo fondamentale nella determinazione di tutti i processi costieri, a partire dal trasporto solido di sedimenti, all'erosione costiera, alla formazione di forme di fondo, alla variazione dello strato limite e degli sforzi tangenziali, etc. Lo studio teorico del problema presenta un'elevata complessità in quanto fra le possibili forzanti che possono generare il moto ondoso, si può senz'altro affermare che, nella maggior parte dei casi, il vento costituisce la principale; esso, spirando sulla superficie del mare, genera sia correnti che onde. Queste, a loro volta, innescano campi di velocità e di pressione che, penetrando la colonna d'acqua, interagiscono non solo tra loro, ma anche con il fondo, dando luogo a dinamiche non lineari molto complesse e, talvolta, in acque basse e in presenza di fondali erodibili, anche alla formazione di strutture sedimentarie di varia scala (Grant e Madsen, (1986)).

L'interazione onde-correnti è usualmente studiata con due obiettivi principali. Il primo è capire in che modo le onde sono influenzate dalla presenza delle correnti (rifrazione delle onde, dissipazione dell'energia ondosa) il che è di grande importanza per il progetto delle strutture costiere; il secondo obiettivo riguarda i cambiamenti indotti dalle onde sulle caratteristiche delle correnti, con ripercussioni significative nella morfodinamica costiera.

Come vedremo più dettagliatamente nei paragrafi successivi, onde e correnti differiscono nelle loro direzioni di propagazione. Difatti, le onde si propagano generalmente in modo quasi perpendicolare alla linea di costa (1, Figura 2.1), mentre le correnti generalmente sono caratterizzate da un flusso parallelo al litorale (2, Figura 2.1).

Più in generale è possibile distinguere: onde e correnti collineari (direzioni dell'onda e della corrente parallele tra loro), onde e correnti ortogonali (direzioni dell'onda e della corrente perpendicolari tra loro) e onde e correnti con angolo variabile (angolo d'attacco compreso tra 0° e 180°).

L'interazione che si instaura in campo non è tuttavia limitata alle sole componenti idrodinamiche, infatti un ruolo particolarmente determinante è giocato anche dalla natura e dalla morfologia del fondale marino (3, Figura 2.1), il quale con le sue caratteristiche influenza a sua volta il campo di moto in presenza di entrambe le forzanti.



Figura 2.1 Rappresentazione 3D di un tratto di costa con individuazione delle forzanti studiate nel presente lavoro, onde [1] e correnti [2], e della formazione di forme di fondo [3].

Gli approcci di studio al problema si possono suddividere in due grandi gruppi: approcci numerici (ad esempio Lundgren (1973), Grant e Madsen (1979), Myrhaug e Slaattelid (1990)) e sperimentali (Faraci et al. (2008, 2021), Lim e Madsen (2016) e Lodahl et al. (1998)). Gli studi citati mostrano che un campo d'onda sovrapposto ad una corrente può cambiare anche in modo significativo sia l'andamento della velocità lungo la colonna d'acqua sia le caratteristiche medie della turbolenza e dello strato limite. Va inoltre tenuto conto che, a causa della complessità del fenomeno, è sempre necessario ricorrere ad una serie di ipotesi semplificative come l'assunzione di un fondo fisso o l'ortogonalità di onde e correnti.

In questo capitolo verranno illustrati cenni sul trasporto di massa e sulla generazione delle correnti, focalizzando l'attenzione su come l'interazione di queste forzanti generi variazioni del campo di moto nei due casi di onde e correnti collineari e onde e correnti ortogonali. Inoltre, verranno riportati studi di letteratura esplicativi sull'interazione di tali forzanti con fondali di diverse scabrezze (sabbia, ghiaia e forme di fondo o ripples) la cui interazione genera variazioni sia all'interno dello strato limite sia all'intero campo di moto.

2.2 Correnti generate dalle Onde

Le correnti costiere sono individuate dalla loro direzione e dal verso, mentre la loro intensità è espressa in m/s o in nodi. All'origine della loro generazione possono

esserci tre fattori distinti che possono talvolta anche combinarsi tra loro: l'azione della marea, la quale provoca correnti prevalentemente ortogonali alla linea di costa in quanto trasporta l'acqua alternativamente verso la costa e verso il mare; l'azione del vento, il quale spira costantemente sulle distese dei mari e degli oceani; l'azione del moto ondoso, in quanto le onde in acqua basse interagiscono con il fondale passando da un moto oscillatorio a traslatorio. In particolare quando le onde raggiungono la costa frangono in prossimità della spiaggia generando correnti che possono assumere una varietà di forme funzioni dell'onda e della tipologia di costa (Basco et al. (1982); Komar et al. (1990)). Tali correnti risultano di particolare rilevanza in quanto, interagendo con le onde, oltre a contribuire alla circolazione dell'acqua sotto la costa con l'acqua d'alto mare, trasportano i sedimenti, fattore determinante nel controllo della morfologia dei litorali e dei fondali.

I movimenti dell'acqua in prossimità della zona dei frangenti di una costa possono essere dominati da due tipologie di correnti: le correnti litoranee e le correnti a getto. Le correnti litoranee o longshore currents sono correnti generate da onde che raggiungono la riva con una direzione obliqua e possono raggiungere velocità superiori a 2.5 m/s. Le correnti a getto o rip currents si verificano quando le onde frangono con creste parallele all'andamento medio della linea di riva generando correnti che risultano ortogonali alla costa e raggiungendo velocità superiori a 1.5 m/s.

In Figura 2.2 viene mostrato uno schema di tali correnti generate dalle onde al variare dell'angolo d'attacco tra la direzione della corrente e la riva.

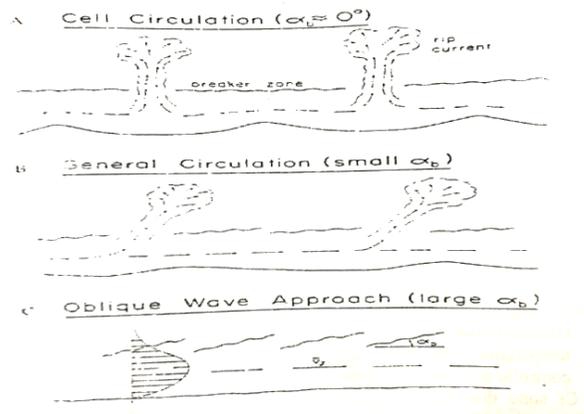


Figura 2.2 Schematizzazione delle correnti generate dalle onde (Komar, 1974).

Le correnti litoranee hanno una particolare importanza, nonostante la piccola velocità che possono raggiungere, in quanto si muovono parallelamente alla riva per periodi di tempo molto lunghi e la loro azione combinata con quella del moto ondoso condiziona la morfologia dei fondali e dei litorali.

Lo studio matematico alla base delle analisi condotte per la formazione delle correnti longitudinali trae origine dall'equazioni del moto (2.1) e dalle equazioni di conservazione della massa (2.2)

$$\sum_{i=1}^N F = \frac{d(MV)}{dt} \quad (2.1)$$

$$\frac{dM}{dt} = 0 \quad (2.2)$$

dove le quantità riportate rappresentano F le forze agenti, M la massa, V la velocità e t il tempo.

I primi studi sulla formazione delle correnti litoranee sono dovuti a Bowen (1969) e Longuet-Higgins e Stewart (1960) i quali hanno considerato tra le forze resistenti, l'attrito al fondo e tra le forzanti, la componente del tensore di radiazione o Radiation Stress, trattato nel paragrafo successivo.

2.2.1 Radiation Stress

Il tensore di radiazione o radiation stress è il contributo alla quantità di moto orizzontale dovuto alla presenza del moto ondoso come mostrato in Figura 2.3.

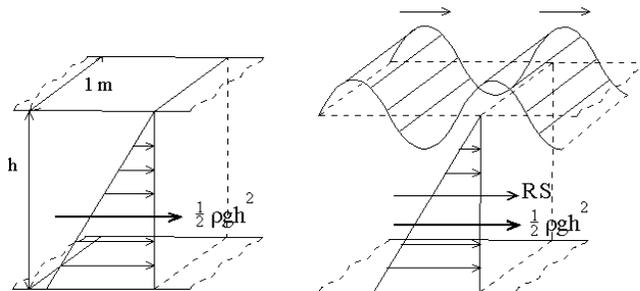


Figura 2.3 Rappresentazione del radiation stress dovuto alla presenza di onde.

Poiché la derivata temporale della quantità di moto è equivalente ad una forza (basti ricordare la seconda legge di Newton), la variazione della quantità di moto (q.d.m.) è interpretabile come quell'aliquota di forza dovuta alla presenza dell'onda ed esercitata sul volume su cui l'onda si propaga. Quando tale forza, applicata ad un assegnato volume d'acqua, ha una risultante non nulla possono innescarsi gradienti di pressione o correnti che mobilitano le tensioni tangenziali al fondo.

Considerato un piano costante X largo 1 m, il valore della quantità di moto in tale direzione risulta equivalente alla componente X della forza che agisce su tale piano ed è espresso dall'integrale:

$$q. d. m. = \int_0^{h+\eta} (p + \rho V^2) dz \quad (2.3)$$

Avendo indicato con:

- h = profondità d'acqua;
- η = livello del pelo libero;
- p = pressione;
- ρ = densità dell'acqua;
- V = velocità.

Il contributo dovuto alla presenza dell'onda al valore medio temporale dell'integrale per unità di larghezza è, per definizione, la componente XX del radiation stress dove il primo pedice indica la direzione di trasferimento mentre il secondo la componente della q.d.m. che viene trasferita. In formule:

$$S_{XX} = \overline{\int_0^{h+\eta} (p + \rho V^2) dz} - \int_0^h p_o dz \quad (2.4)$$

$$\int_0^h p_o dz = \int_0^h \rho g z dz = \frac{1}{2} \rho g h^2 \quad (2.5)$$

L'equazione (2.5) rappresenta il contributo idrostatico avendo indicato con g l'accelerazione di gravità.

Battjes et al. (1986) hanno riformulato l'equazione (2.4) adottando la teoria lineare ottenendo il seguente risultato:

$$S_{XX} = \left[\frac{2kd}{\sinh(2kd)} + \frac{1}{2} \right] E \quad (2.6)$$

- S_{XX} = la componente principale del radiation stress nella direzione di propagazione dell'onda;
- d = profondità dell'acqua;
- k = numero d'onda ($k = 2\pi/L$);
- L = lunghezza d'onda;
- E = energia del moto ondoso pari a: $1/8\rho g H^2$ (con H l'altezza d'onda).

Introducendo il parametro n dato dal rapporto tra la celerità di gruppo e la celerità d'onda (equazione 2.7) per onde sinusoidali progressive, il radiation stress (2.6) assume la forma mostrata nell'equazione (2.8). Inoltre, l'equazione (2.9) mostra la seconda componente principale del radiation stress che agisce sul piano verticale perpendicolare alle creste d'onda.

$$n = \frac{kh}{\sinh(2kd)} + \frac{1}{2} \quad (2.7)$$

$$S_{XX} = \left(2n - \frac{1}{2} \right) E \quad (2.8)$$

$$S_{YY} = \left(n - \frac{1}{2} \right) E \quad (2.9)$$

Nell'ipotesi di acqua basse nella zona di frangimento (per cui $n=1$) le ultime due formule assumono la forma seguente:

$$S_{XX} = \frac{3}{2} E \quad (2.10)$$

$$S_{YY} = \frac{1}{2} E \quad (2.11)$$

In acque basse, a prima vista (2.10 e 2.11), sembrerebbe che il radiation stress sia influenzato solo dall'energia; tuttavia l'energia in acque basse è anche influenzata dalla profondità alla quale si realizza il frangimento.

Le componenti calcolate del radiation stress S_{XX} e S_{YY} si riferiscono, rispettivamente, alla direzione di propagazione dell'onda e alla direzione a questa ortogonale. In Figura 2.4 è riportata una schematizzazione delle direzioni principali.

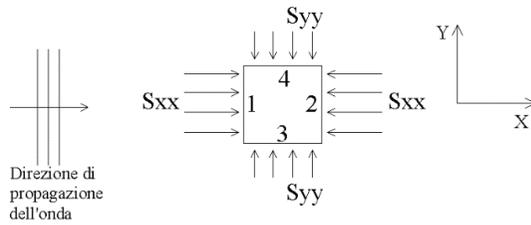


Figura 2.4 Schematizzazione delle direzioni principali dei tensori di radiazione S_{XX} e S_{YY} (Foti, 2002).

Nell'ipotesi di onde che non si propagano ortogonalmente alla costa ma con un generico angolo d'attacco φ , i processi costieri vengono studiati riferendosi alle componenti longitudinali (long-shore), ovvero alle componenti trasversali (cross-shore) e risulta quindi indispensabile ricavare le due componenti del radiation stress.

La Figura 2.5 mostra le componenti del radiation stress nei due sistemi di riferimento: uno (X, Y) connesso alla direzione di propagazione dell'onda e l'altro (x, y) connesso al sistema di coordinate long-shore e cross-shore.

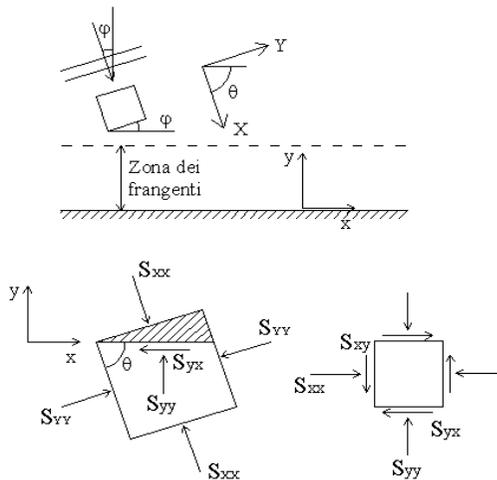


Figura 2.5 Componenti del radiation stress dovute ad un attacco obliquo del moto ondoso (Foti, 2002).

Si ricava che le componenti del tensore di radiazione nel sistema di coordinate x e y risultano:

$$\begin{aligned}
 S_{xx} &= \frac{S_{XX} + S_{YY}}{2} + \frac{S_{XX} - S_{YY}}{2} \cos(2\theta); \\
 S_{yy} &= \frac{S_{XX} + S_{YY}}{2} - \frac{S_{XX} - S_{YY}}{2} \cos(2\theta); \\
 S_{xy} &= \frac{S_{XX} - S_{YY}}{2} \sin(2\theta) = \frac{S_{XX} - S_{YY}}{2} \cos(2\phi) = S_{yx};
 \end{aligned}
 \tag{2.12}$$

avendo indicato con:

- S_{XX} = radiation stress principale che agisce sul piano parallelo alla cresta dell'onda;
- S_{YY} = radiation stress principale che agisce sul piano ortogonale alla cresta dell'onda;
- S_{xx} = radiation stress che agisce sul piano ortogonale alla costa (componente normale);
- S_{yy} = radiation stress che agisce sul piano parallelo alla costa (componente normale);
- S_{xy} = radiation stress che agisce sul piano ortogonale alla costa (componente tangenziale);
- S_{yx} = radiation stress che agisce sul piano parallelo alla costa (componente tangenziale);
- θ = angolo tra gli assi dei due sistemi;
- ϕ = angolo tra la cresta d'onda e la linea di costa.

Pertanto la componente tangenziale della tensione di radiazione S_{yx} , che ha origine da un attacco obliquo del moto ondoso, produce una forza che agisce parallela alla costa la quale è responsabile della corrente litoranea (long-shore current).

Una forma alternativa della componente tangenziale della tensione di radiazione è espressa nella formula seguente:

$$S_{xy} = \frac{S_{XX} - S_{YY}}{2} \sin(2\theta) = \frac{En}{2} \sin(2\phi) = En \sin(\phi) \cos(\phi) \quad (2.13)$$

Ricordando sia l'espressione per E , sia il criterio di breaking ($H_b = \gamma h_b$), valido nella regione di frangimento, sia la legge di Snell ($\frac{\sin(\phi)}{c} = \frac{\sin(\phi_0)}{c_0}$), la (2.13) si semplifica nella seguente:

$$S_{yx} = \frac{1}{8} \frac{\sin(\phi_0)}{c_0} \rho g \gamma^2 [d^2 n c \cos(\phi)] \quad (2.14)$$

in cui solo i termini entro la parentesi quadra dipendono da y , per cui, differenziando, si ottiene:

$$\frac{dS_{yx}}{dy} = \frac{1}{8} \frac{\sin(\phi_0)}{c_0} \rho g \gamma^2 \cdot \left[2hnc \cos(\phi) \frac{dh}{dy} + h^2 c \cos(\phi) \frac{dn}{dy} + h^2 n \cos(\phi) \frac{dc}{dy} - h^2 n c \sin(\phi) \frac{d\phi}{dy} \right] \quad (2.15)$$

Adottando le approssimazioni valide in acque basse riportate di seguito nelle relazioni (2.16)

$$\begin{aligned} n &= 1; & dn/dy &= 0; \\ \cos(\phi) &= 1; & d\phi/dy &= 0; \\ C &= \sqrt{gh}; & \frac{dc}{dy} &= \frac{1}{2} \frac{\sqrt{g}}{\sqrt{h}} \frac{dh}{dy}; \end{aligned} \quad (2.16)$$

si ricava:

$$\frac{dS_{yx}}{dy} = \frac{1}{8} \frac{\sin(\phi_o)}{c_o} \rho g \gamma^2 \cdot \left[2d\sqrt{gd} \frac{dd}{dy} + h^2 \frac{1}{2\sqrt{d}} \frac{dd}{dy} \right] \quad (2.17)$$

ovvero:

$$\frac{dS_{yx}}{dy} = \frac{1}{8} \frac{\sin(\phi_o)}{c_o} \rho g \gamma^2 \cdot \left[2.5d\sqrt{gd} \frac{dd}{dy} \right] = \frac{5}{16} \rho \gamma^2 \cdot [gd]^{(3/2)} \frac{\sin(\phi_o)}{c_o} s_p \quad (2.18)$$

dove

- C_o = la celerità dell'onda su profondità infinita;
- g = l'accelerazione di gravità;
- d = la profondità;
- s_p = la pendenza del fondo (pari a dd/dy);
- γ = l'indice di breaking;
- ρ = la densità;
- ϕ_o = l'angolo di attacco del moto ondoso in acque profonde.

La (2.18) fornisce dunque il contributo della componente tangenziale del radiation stress alla forza parallela alla costa che agisce su di un elemento d'acqua di spessore dy e profondità d .

2.3 Trasporto di Massa

Ciascuna particella fluida dell'onda d'acqua descrive un percorso ellittico che si muove nella direzione di propagazione dell'onda nella parte superiore dell'orbita e nella direzione opposta nella parte inferiore dell'orbita. A causa degli effetti non lineari, tale traiettoria non è un percorso chiuso. Infatti, la velocità nella parte superiore dell'orbita è maggiore di quella ottenuta nella parte inferiore. Si ha quindi una componente del secondo ordine M nella direzione di propagazione dell'onda sovrapposta al moto orbitale, che prende il nome di trasporto di massa. Questa velocità è stata determinata da Stokes (1847), sotto l'ipotesi di campo di moto irrotazionale. In particolare assumendo che il trasporto in direzione orizzontale sia zero l'equazione di Stokes per il trasporto di massa è equivalente a

$$M = \frac{H^2 \omega \cosh 2k(z-d)}{2 \sinh^2 kd} - \frac{H^2 \omega}{2d} \coth(kd) \quad (2.19)$$

dove d è la profondità d'acqua, H è l'altezza d'onda, $k = 2\pi/L$ il numero d'onda, L è la lunghezza d'onda, $\omega = 2\pi/T$ è la frequenza angolare e T è il periodo dell'onda.

Considerata un'onda regolare che si sta propagando nella zona costiera in una situazione stazionaria, a causa dell'interazione con il fondale l'onda cambia la sua altezza. All'inizio della zona di shoaling l'altezza dell'onda diminuisce quindi, ad una certa profondità, inizia ad aumentare fintanto che diventa instabile e frange.

Pertanto, all'interno della surf zone, appare un flusso diretto in direzione onshore dovuto a meccanismi che trasportano la massa d'acqua nella direzione di propagazione delle onde. In una situazione tridimensionale, questo flusso al fondo è spesso bilanciato

dalle rip currents, mentre in una situazione strettamente bidimensionale questo ruolo è giocato da una forte corrente in direzione offshore che prende il nome di undertow o corrente di ritorno, il cui massimo si raggiunge in prossimità del fondo.

Al di fuori della surf zone, l'undertow non si verifica e la dissipazione dell'energia di attrito è limitata alla parte inferiore della colonna d'acqua (Figura 2.6).

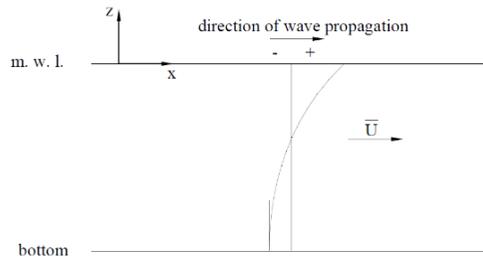


Figura 2.6 Trasporto di massa al di fuori della zona di breaking in un'onda progressiva irrotazionale ($kd=1$).

Una valutazione teorica di tale quantità può essere effettuata attraverso la relazione determinata da Dean e Dalrymple (1991) secondo cui l'undertow può essere calcolato come

$$U = \frac{M}{\rho d} \quad (2.20)$$

dove M che rappresenta il trasporto di massa è calcolato come il rapporto tra l'energia e la celerità dell'onda ($M = E/C$).

2.4 Strato Limite

Tra i fenomeni alla base dell'idraulica marittima di particolare interesse è lo studio dello strato limite e l'individuazione dello spessore di tale strato, in relazione alle svariate condizioni al contorno al fine di fornire gli strumenti adatti alla valutazione delle dissipazioni per attrito che si realizzano al fondo di un'onda di mare. Ogni volta che un fluido interagisce con un corpo solido si genera la formazione di uno strato limite che può essere immaginato come quello strato, prossimo al fondo, in cui gli effetti viscosi sono rilevanti e la vorticità elevata. Lo strato limite dipende in gran parte dalle condizioni iniziali e dalle caratteristiche intrinseche del sistema; per poter effettuare una trattazione generale indipendentemente dalla sua natura laminare o turbolenta e dalla teoria da seguire, al fine di semplificare lo studio possono essere imposte le seguenti condizioni: moto bidimensionale e forza peso trascurabile. A seconda del regime di movimento a cui ci si riferisce, può esserci moto laminare se i filetti fluidi sono lamine oppure seguono il contorno del corpo, turbolento se i filetti fluidi seguono linee intricate che creano vortici e ricircolo.

Da studi precedenti numerose sono le questioni che sorgono non solo per quanto riguarda i processi di transizione da un regime di moto all'altro ma anche per gli effetti delle oscillazioni imposte sui meccanismi di generazione della turbolenza stessa. Tali studi

dimostrano difatti che lo strato limite laminare non si estende mai su tutto il corpo lambito dalla corrente, ma quando il numero di Reynolds locale supera un valore critico si passa allo strato limite turbolento. Quindi, nella prima parte il flusso è laminare, poi per effetto delle azioni tangenziali di attrito fluido-corpo, aumentando la velocità dei filetti fluidi, si passa alla zona di transizione, interessata da uno spessore maggiore, fino ad arrivare, per elevati valori di Reynolds, in una zona detta turbolenta.

Lo studio dello strato limite, generato dalle oscillazioni di un fluido su una lastra piana, è stato affrontato per la prima volta da Stokes (Stokes, 1855) nell'ipotesi di regime di moto laminare. La soluzione delle equazioni non-lineari del campo di moto laminare descritto dalle equazioni di Navier-Stokes

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2.21)$$

con le seguenti condizioni al contorno:

$$u(x, 0) = 0, v(x, 0) = 0, u(x, \infty) = U(x) \quad (2.22)$$

va ricercata nella risoluzione di un sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali non lineari in cui u e v possono essere ottenute più facilmente introducendo la funzione di flusso $\Psi(x, y)$ con le relazioni

$$u = \frac{\partial \Psi}{\partial y} \quad e \quad v = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad (2.23)$$

Attraverso questa semplificazione le equazioni possono essere, attraverso passaggi analitici, ricondotte all'equazione di Blasius $f''' + \frac{1}{2}ff'' = 0$, un problema che ammette soluzione numerica il cui andamento è riportato in Figura 2.7.

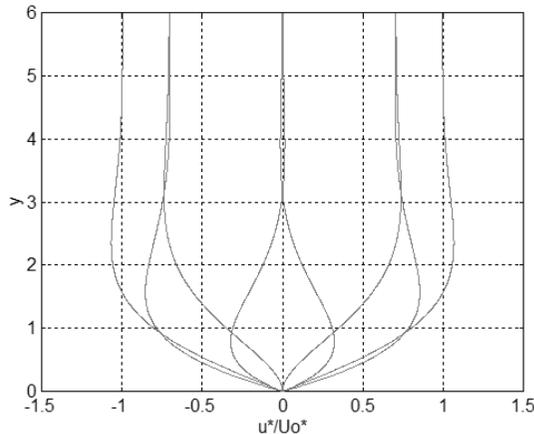


Figura 2.7 Profili di velocità all'interno dello strato limite.

Un altro parametro fondamentale risulta essere lo spessore di detto strato, la cui misura è convenzionalmente indicata con δ e può essere definita secondo diversi criteri: la prima misura dello spessore limite può considerarsi la distanza dalla parete in cui la

velocità longitudinale raggiunge il 99% della velocità di flusso libero locale, cioè dove $u^* = 0.99U^*$. Una seconda misura è lo spessore di spostamento che è definito come la distanza per cui la parete dovrebbe essere spostata verso l'esterno in un ipotetico flusso senza attrito, in modo da mantenere lo stesso flusso di massa come nel flusso effettivo; ed infine una terza possibilità per la misura dello spessore dello strato limite si ottiene confrontando la quantità di moto dovuta allo strato limite con quella relativa al flusso potenziale.

Per ciò che concerne il trasporto dei sedimenti e lo studio degli sforzi tangenziali, lo studio dello strato limite in moto turbolento assume importanza primaria. Esistono diverse procedure di soluzione per risolvere l'equazione in caso di moto turbolento che vanno dalle semplici soluzioni approssimate come il metodo RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes Equations) in cui le grandezze non risultano più istantanee ma mediate nel tempo, fino ad arrivare ai metodi di chiusura come *One-equation* model o *k-model* in cui si introduce un'equazione di trasporto per l'energia cinetica turbolenta data da

$$k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (2.24)$$

con u , v e w componenti di fluttuazione turbolenta lungo x , y , z ; di risoluzione ancora più complessa vi sono i metodi a due equazioni tra i quali i più usati sono *k-ε* model o *k-ω* model in cui la determinazione dei parametri che entrano in gioco vanno opportunamente tarati a partire da dati sperimentali.

Per risolvere il problema è opportuno definire un modello empirico che espliciti le relazioni tra le grandezze medie del campo di moto e gli sforzi turbolenti attraverso la viscosità turbolenta ν_t , concetto introdotto da Boussinesq più di un secolo fa, che risulta essere indipendente dalla natura del fluido, ma può altresì essere legato alle caratteristiche del campo di moto. Tale quantità non può essere considerata costante nel tempo e, tranne in casi particolari, è funzione della distanza dal fondo. Sleath (1987) ha individuato che tale correlazione dipende dal fatto che gli sforzi tangenziali e il gradiente di velocità non tendono a zero contemporaneamente per uguali valori della fase; difatti è stato osservato sperimentalmente un andamento negativo in prossimità del fondo, che poi diventa positivo e aumenta all'aumentare della distanza da questo. Nonostante tale considerazione, la maggior parte dei modelli utilizzati per esprimere la ν_t sono indipendenti dal tempo in quanto si è visto che, l'introduzione di una variabilità temporale in realtà assume un peso trascurabile nei risultati ottenuti.

Kajiura (1968) ad esempio, differenzia la struttura della viscosità turbolenta in base alla distanza dal fondo secondo tre strati:

$$\begin{aligned} \nu_{t1} &= 0.185 \cdot \kappa \cdot U^* \cdot r^* \quad \text{per } 0 \leq z^* \leq r^*/2 \\ \nu_{t2} &= \kappa \cdot U^* \cdot z^* \quad \text{per } r^*/2 \leq z^* \leq \delta^* \\ \nu_{t3} &= \kappa \cdot U^* \cdot d^* \quad \text{per } \delta^* \leq z^* \end{aligned} \quad (2.25)$$

dove κ è la costante di *von Karman*, r^* la scabrezza del fondo, δ^* lo spessore dello strato limite, definito come

$$\delta^* = 0.05 \cdot U^* \frac{1}{\sigma^*} \quad (2.26)$$

e U^* la velocità d'attrito, pari a:

$$U^* = \sqrt{\frac{\tau_0^*}{\rho}} \quad (2.27)$$

dove τ_0^* è lo sforzo tangenziale al fondo.

In Figura 2.8 vengono riportati gli schemi di alcuni tra i modelli della viscosità turbolenta indipendenti dal tempo.

La determinazione della tensione massima al fondo risulta estremamente importante per ciò che concerne il trasporto di sedimenti. Difatti nel tempo sono stati compiuti diversi studi volti all'individuazione di questa quantità. Jonsson (1966), in particolare, ha per primo correlato la tensione tangenziale al fondo alla velocità massima U_0^* attraverso la relazione (2.28) dove con il termine f_w si intende il coefficiente d'attrito. Jonsson dimostrò che tale coefficiente d'attrito è funzione sia del numero di Reynolds Re che di una scabrezza relativa r^*/A^* con A^* l'ampiezza massima di oscillazione del fluido in prossimità del fondo.

$$\tau_0^* = \frac{1}{2} \rho f_w U_0^{*2} \quad (2.28)$$

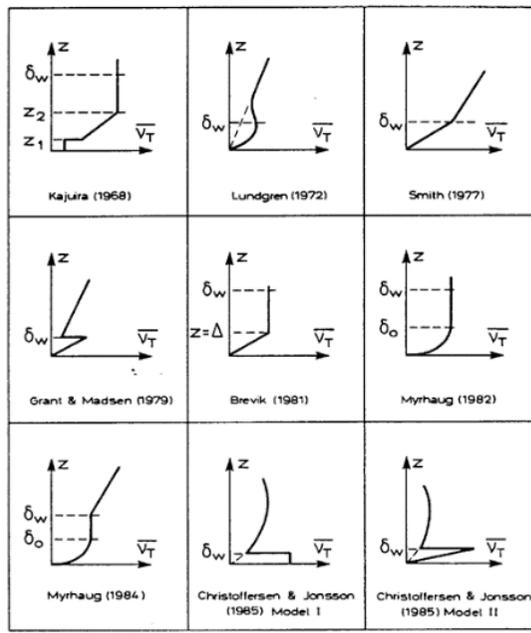


Figura 2.8 Schemi di distribuzioni di viscosità turbolenta media (Deigaard et al. 1992)

In Figura 2.9 è riportato l'andamento di f_w in funzione di questi due parametri adimensionali (Re , r^*/A^*) assumendo la scabrezza di Nikuradse pari a $2d_{90}$ ed essendo d_{90} il diametro nominale della sabbia al 90esimo percentile.

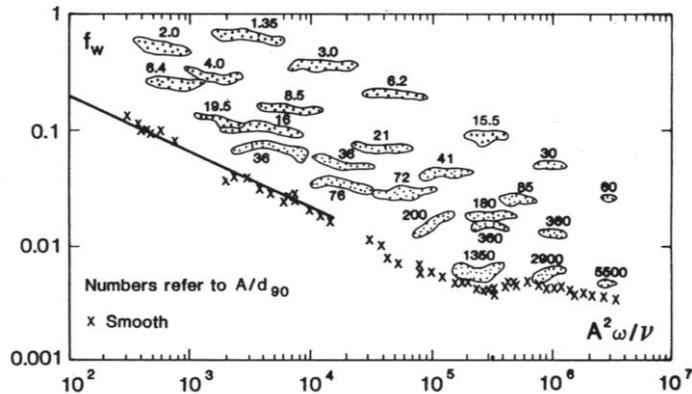


Figura 2.9 Andamento del coefficiente d'attrito nel caso di moto oscillante su fondo piano con sedimenti fissi (Kamphuis, 1975).

Per il caso di fondo liscio e Reynolds fino a 3×10^5 (le croci in Figura 2.9) si può assumere

$$f_w = \frac{2}{\sqrt{Re}} \quad (2.29)$$

Per valori di Reynolds $3 \times 10^5 < Re < 6 \times 10^5$ il coefficiente f_w aumenta fino ad arrivare ad un regime di moto completamente sviluppato di parete liscia dove il coefficiente f_w diminuisce nuovamente secondo l'espressione suggerita da Justesen (1988):

$$f_w = 0.0024 Re^{-0.123} \quad (2.30)$$

Infine, nel regime di moto turbolento di parete scabra sono state proposte numerose formule. La più largamente utilizzata è quella di Swart (1974):

$$f_w = e^{[5.213(\frac{z^*}{A^*}) - 5.977]} \quad (2.31)$$

Dall'introduzione del concetto di strato limite emerge l'importanza, nella propagazione in acque basse, di valutare le resistenze d'attrito al fondo e di come la variazione della scabrezza costituente il fondale influenzi in campo di moto in contemporanea presenza di onde e correnti.

2.5 Azioni del campo di moto sulla dinamica dei sedimenti

Il campo di moto nelle aree costiere, come precedentemente accennato presenta una idrodinamica alquanto complessa, generata sia da componenti periodiche, dovute al moto ondoso sia da componenti stazionarie, dovute alla presenza di correnti di vario tipo.

Le particelle che giacciono sulla superficie del fondale sono sottoposte al movimento dell'acqua la quale quando possiede una velocità sufficientemente elevata, preleva e trasporta tali particelle per poi depositarle altrove non appena la velocità del moto diminuisce. Il trasporto in sospensione coinvolge il materiale dalla granulometria

piuttosto fine le cui particelle seguono percorsi entro l'acqua lunghi e irregolari entrando raramente in contatto con il fondo. Questo tipo di trasporto è per lo più governato dalla turbolenza della corrente in grado di trasportare grosse quantità di materiale e depositarle più a valle. Il trasporto al fondo può avvenire secondo quattro modalità:

- Slittamento;
- Rotolamento;
- Saltellamento;
- Sospensione.

Le prime due avvengono in maniera tale che le particelle risultano essere sempre a contatto con il fondo; il saltellamento, invece, avviene proprio quando le particelle compiono piccoli saltelli.

Si definisce trasporto di fondo quella modalità di trasporto in cui le particelle vengono mobilitate secondo queste prime tre modalità.

La presenza dell'attrito al fondo, usualmente espresso in termini di tensione tangenziale al fondo o attraverso la velocità d'attrito (vedi equazioni (2.27) e (2.28)), è particolarmente correlato alle azioni idrodinamiche che si esercitano sui sedimenti. Tale velocità d'attrito U^* non rappresenta effettivamente una velocità fisicamente individuabile nel fluido ma è una grandezza che tiene conto degli attriti della parete. Negli studi sperimentali risulta più conveniente riferirsi ad un parametro detto di Shields che rappresenta una tensione tangenziale al fondo in forma adimensionale che tiene conto delle caratteristiche dei sedimenti costituenti il fondale. Tale parametro può essere espresso sia in termini di τ_0^* che di U^* :

$$\vartheta = \frac{\tau_0}{g(\rho_s - \rho)d_{50}} \quad (2.32)$$

$$\vartheta = \frac{U^{*2}}{g(s-1)d_{50}} \quad (2.33)$$

in cui g è l'accelerazione di gravità, ρ la densità dell'acqua, ρ_s la densità dei sedimenti, $s = \rho_s/\rho$, d_{50} è un diametro caratteristico dei sedimenti. La mobilitazione dei sedimenti si ha quando il parametro di Shields supera un valore critico. In Figura 2.10 viene riportato l'abaco di Shields per la determinazione delle condizioni di incipiente mobilità dei sedimenti. Tale grafico riporta sulle ascisse una grandezza D^* definita come segue:

$$D^* = \left[\frac{g(s-1)}{v^2} \right]^{1/3} d_{50} \quad (2.34)$$

sulle ordinate invece viene riportato il valore di ϑ_{cr} . Tale grafico può essere utilizzato in condizioni di sola corrente (currents), solo onda (waves) e onde e correnti simultaneamente (waves plus currents). In questi ultimi due casi la ϑ_{cr} deve essere calcolata sulla base del valore massimo delle velocità orbitale al fondo.

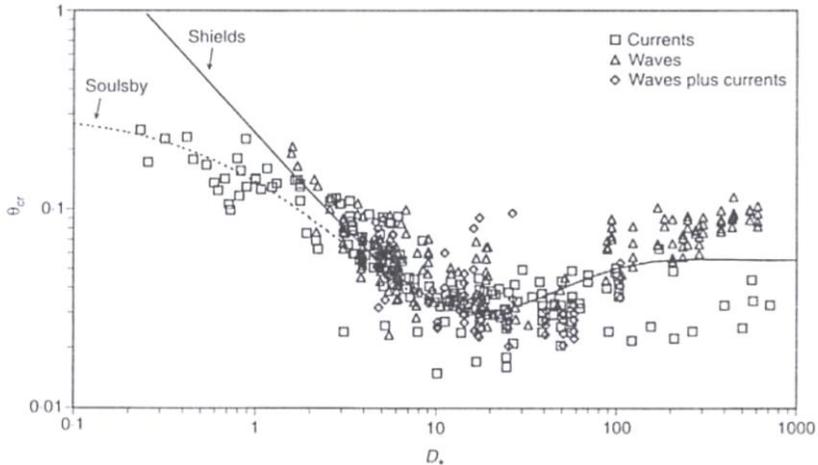


Figura 2.10 Grafico di Shields (modificato) per la determinazione delle condizioni di incipiente mobilità dei sedimenti (Foti, 2002).

Come già accennato, la tensione tangenziale al fondo dipende sia dalle caratteristiche del moto sia dalla scabrezza al fondo, la quale a sua volta può essere individuata o tramite la scabrezza di Nikuradse k_s , correlata alla dimensione dei granuli o attraverso la scabrezza rilevata dal profilo di velocità z_0 . Le due grandezze risultano legate tra loro dalla relazione:

$$z_0 = \frac{k_s}{30} \quad (2.35)$$

2.5.1 Interazione di Onde e Correnti su Fondali Scabri

È opportuno ricordare che la tensione tangenziale al fondo può essere generata da diversi meccanismi (solo correnti, solo onde e onde più correnti), i quali comportano non solo diverse modifiche non lineari della velocità di fase e della lunghezza d'onda, ma anche un cambiamento nella struttura dello strato limite con conseguente modifica del coefficiente di attrito e delle sollecitazioni tangenziali al fondo.

Le onde superficiali, iniziano a sentire l'influenza del fondale non appena transitano nella regione delle acque intermedie. Quando le onde si avvicinano ad acque più basse, i valori associati delle velocità orbitali vicino al fondo sono dello stesso ordine di grandezza di quelli delle correnti costiere più forti previste. Tuttavia, la sollecitazione tangenziale associata al moto ondoso può essere più grande fino ad un ordine di grandezza rispetto a quella associata a una corrente di entità paragonabile. Ciò dipende dalla piccola scala dello spessore dello strato limite dell'onda rispetto a quello dello strato limite della corrente e confrontando i rispettivi gradienti di velocità verticale. Poiché il trascinarsi di sedimenti in condizioni di fondo liscio può essere correlato allo sforzo tangenziale, possiamo affermare che le onde sono in grado di trascinare quantità significative di sedimenti dal fondo del mare quando invece una corrente di entità comparabile può non essere sufficiente ad avviare la movimentazione dei sedimenti.

Pertanto, concettualizzando e semplificando il processo, le onde agiscono come un meccanismo di agitazione che rende i sedimenti disponibili per il trasporto da parte di una corrente più debole. Infatti, nelle immediate vicinanze del fondale, il moto ondoso e le correnti non possono essere trattati separatamente e quindi va considerato il

meccanismo di simultanea compresenza delle due forzanti. In particolar modo, si verifica un'interazione non lineare tra i due flussi con l'ovvia conseguenza che la dinamica dei fluidi in presenza di onde e correnti è ben diversa da quella prevista per il caso di sole onde o di sola corrente a causa della presenza combinata di ciascuna componente.

Sebbene nelle zone vicino la costa le onde e le correnti interagiscano con un certo angolo, per motivi di chiarezza e di semplicità, gli studi di letteratura si sono maggiormente focalizzati sull'interazione di onde e correnti collineari o ortogonali e sui loro effetti su fondali con diverse scabrezze mentre sono pochi i lavori inerenti l'interazione tra le due forzanti con un angolo di attacco variabile.

2.5.1.1 Onde e Correnti Collineari

Tra i primi studi presenti in letteratura troviamo Grant e Madsen (1979) i quali hanno sviluppato una teoria analitica sull'attrito del fondo sotto onde e correnti combinate con un angolo arbitrario in presenza di un fondo scabro. In particolare, quando le onde sono sovrapposte a una corrente collineare si è osservato un aumento sia della scabrezza apparente del fondo sia delle sollecitazioni tangenziali. Tuttavia, gli autori non hanno convalidato questi risultati con dati sperimentali.

Una teoria simile è stata presentata da Christoffersen (1985), utilizzando una distribuzione modificata della viscosità residua. Cambiamenti nel profilo della velocità media sono stati misurati da Brevik e Bjørn (1979) in cui i risultati indicano una riduzione complessiva della velocità media al di sopra del fondo quando le onde sono sovrapposte alla corrente.

George e Sleath (1979) hanno effettuato misure su un letto di sfere in presenza di un campo di moto oscillante con una debole corrente sovrapposta, e hanno descritto il ciclo di formazione ed espulsione del vortice attorno agli elementi costituenti la scabrezza del fondale. In particolare hanno osservato che il vortice a valle più forte induce una debole corrente in direzione opposta appena al di sopra delle sfere. Ciò è coerente con le osservazioni di Inman e Bowen (1962) e Bijker et al. (1976), che riportarono entrambi un aumento del trasporto di sedimenti a monte quando una corrente debole si sovrapponeva alle onde. Questi ultimi autori sottolineano come la comprensione della formazione del vortice in funzione dei parametri di onda e di flusso è essenziale per la comprensione del trasporto di sabbia da parte di onde e correnti.

Kemp e Simons (1982) hanno condotto un'indagine sperimentale sull'interazione tra onde gravitazionali e una corrente turbolenta tra loro collineari, in presenza di fondi scabri e lisci trovando che:

- per entrambi i fondali (liscio e scabro) in presenza contemporanea di onde e correnti lo spessore dello strato limite turbolento unidirezionale e degli strati limite delle pareti laterali diminuisce determinando una redistribuzione del flusso attraverso il canale;
- l'analisi dei profili di velocità logaritmica indica un aumento delle tensioni tangenziali al fondo τ e della scala di lunghezza y_0 della scabrezza apparente al crescere dell'altezza d'onda;
- per le onde più grandi testate, τ e y_0 risultano approssimativamente il doppio dei valori determinati per il caso di sola corrente (vedi Figura 2.11a);

- l'intensità massima della turbolenza orizzontale durante l'intero ciclo dell'onda, per prove combinate di onde e correnti, risulta essere superiore del 20% rispetto al caso di sola corrente (Figura 2.11 b).

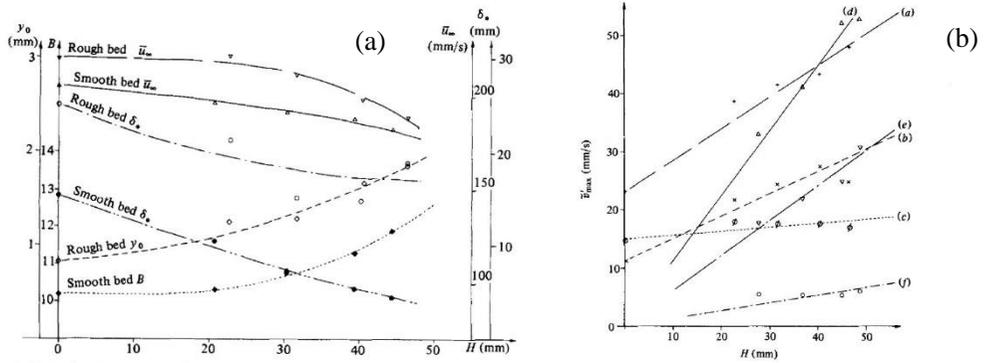


Figura 2.11 a) Variazione all'interno dello strato limite; b) Intensità della turbolenza al variare dell'altezza d'onda (da Kemp and Simons (1982)).

Propagando onde e corrente, Kemp e Simons (1983) hanno successivamente osservato che:

- le velocità medie vicino al letto aumentano per il caso di fondo liscio, mentre diminuiscono in presenza di fondo scabro a causa sia di un cambiamento nel modello di vortice, formatosi tra gli elementi di scabrezza del fondo, sia per la presenza di onde;
- lontano dal letto, le velocità medie dipendono dalla direzione di propagazione dell'onda mentre vicino al fondo, le direzioni relative del flusso non influenzano l'interazione di onde e correnti; in particolare in prossimità di una parete scabra, le velocità medie diminuiscono.

Huang e Mei (2003) hanno sviluppato una teoria analitica dello strato limite per prevedere gli effetti delle onde su una corrente turbolenta in presenza di fondo liscio o scabro, individuando che un'onda che segue una corrente comporta un aumento di velocità, mentre un'onda che si oppone a una corrente, una diminuzione, e Guizien et al. (2003) hanno invece proposto un modello di chiusura della turbolenza $IDV k-\omega$ per prevedere il trasporto e la redistribuzione dei sedimenti.

Considerando un moto dominato dalla corrente, ossia dove il rapporto della velocità della corrente sulla velocità dell'onda è maggiore di 1, da diverse prove sperimentali (Tardu e Binder, (1993); Tardu et al. (1994); Tardu et al. (1995)) è risultato che la componente oscillante è maggiore della velocità di corrente ed inoltre che il moto stesso è fortemente influenzato dalla frequenza della forzante, così come prevalentemente avviene in ambiente marino.

A chiarezza di ciò, Lodahl et al. (1998) analizzando il campo di moto generato da un'onda più una corrente collineare su un letto scabro in un apparato per la simulazione di moti oscillanti ("tubo a U"), hanno scoperto che anche gli sforzi tangenziali sono fortemente influenzati dal rapporto tra la velocità della corrente U_c e la velocità orbitale dell'onda U_0 . Ricordando che, se $U_c/U_0 > 1$ il flusso è dominato dalla corrente mentre se $U_c/U_0 < 1$ il flusso è dominato dalle onde, in un regime dominato dalla corrente, può verificarsi un'interazione lineare tra le componenti dell'onda e della corrente; in tal caso

lo strato limite dell'onda è laminare e lo sforzo tangenziale rimane costante. In un regime dominato dalle onde, se il campo di moto è laminare, le sollecitazioni tangenziali diminuiscono; mentre se lo strato limite dell'onda è turbolento, tali sollecitazioni aumentano. (vedi Figura 2.12)

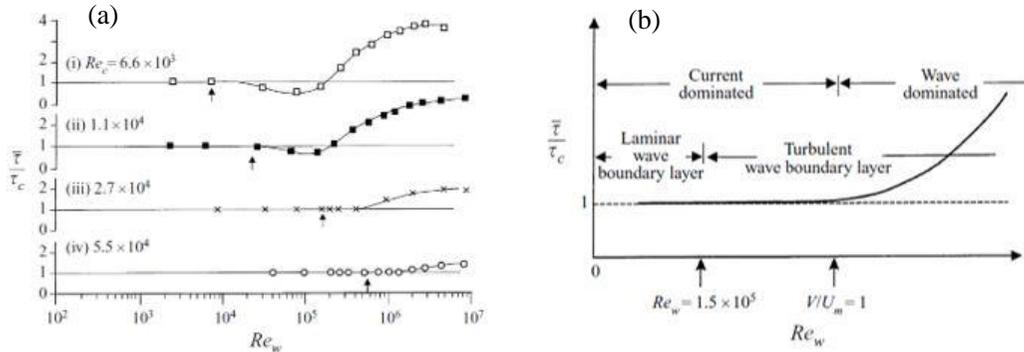


Figura 2.12 a) Andamento del rapporto tra lo sforzo tangenziale del caso di onda più corrente sul caso di sola corrente al variare di Re_w per fissato Re_c ; b) schema della variazione dello sforzo tangenziale adimensionalizzato al variare di Re_w fissato Re_c (da Lodahl et al. (1998)).

2.5.1.2 Onde e Correnti Ortogonali

L'interazione di onde e correnti ortogonali su fondali scabri fu studiata tra i primi da Visser (1987) partendo dai lavori pionieristici teorici e sperimentali di Bijker (1967). La campagna sperimentale è stata condotta presso l'Università di Delft in una vasca sperimentale atta a generare entrambe le forzanti. I risultati degli esperimenti condotti su due condizioni di fondo, liscio e in presenza di ghiaia, hanno mostrato che le velocità medie in prossimità del fondo scabro nel caso di onde e correnti sono minori di quelle misurate nel caso di sola corrente. Si è constatato inoltre che i profili di velocità media risentono dell'influenza della profondità d'acqua.

Negli esperimenti con onde e correnti ortogonali effettuati da Sleath (1991) sono state considerate 3 condizioni di scabrezza del fondo: liscio, sabbia ($d_{50}=1.64$ mm) e ghiaia ($d_{50}=8.1$ mm). Si è riscontrato che nel caso di fondo liscio, nella direzione della corrente, le onde hanno un effetto trascurabile sul profilo di velocità media della corrente. Per gli altri due fondali, i risultati risultano pressoché simili a quelli ottenuti da Grant e Madsen (1979) per angolo d'attacco di 90° e le uniche variazioni significative si riscontrano all'interno dello strato limite. Anche se tali risultati risultano interessanti, le ipotesi semplificative generalmente adottate ne riducono la validità.

Simons et al. (1993, 1995, 1997) hanno riscontrato che, in presenza di fondo scabro, le onde influenzano l'idrodinamica generata dalle correnti, comportando una riduzione significativa delle velocità medie nella parte superiore della profondità dell'acqua ed un incremento di quest'ultime vicino al fondo.

Accurati esperimenti sono stati condotti da Arnskov et al. (1993) i quali hanno effettuato misure di velocità su fondo liscio per svariati angoli d'attacco tra onde e correnti. In particolare, nel caso di ortogonalità tra le forzanti, seguendo il metodo suggerito da Soulsby et al. (1993), essi hanno riscontrato che:

- il valore massimo dell'attrito al fondo non risulta influenzato dalla presenza

dell'onda;

- la tensione tangenziale nella direzione della corrente, mediata sul periodo per il caso di onde e correnti ortogonali, risulta essere maggiore rispetto al caso di sole onde.

Musumeci et al. (2006) attraverso una campagna sperimentale condotta presso la vasca in dotazione all'Università di Catania, hanno riscontrato che in presenza di onde e di corrente su un fondale con piccola scabrezza ($d_{50}=0.24$ mm), si verifica un aumento del flusso di corrente al fondo; nel caso di fondale con grande scabrezza ($d_{50}=30$ mm) si verifica l'esatto contrario.

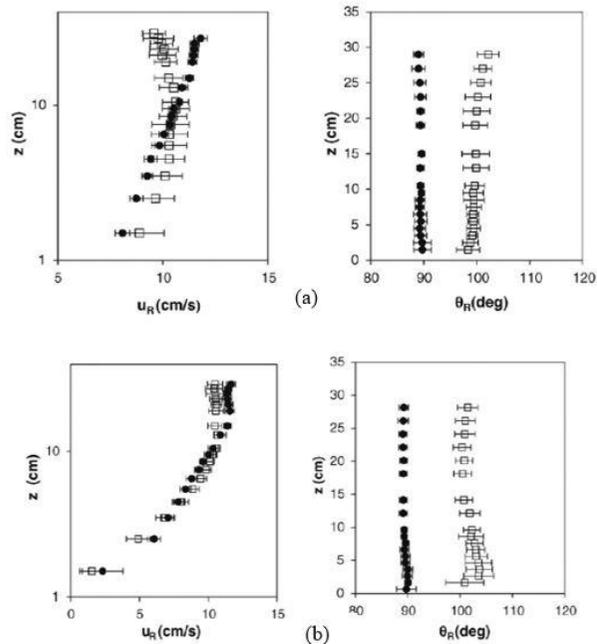


Figura 2.13 Velocità media, u_R e angolo del flusso medio, θ_R , per il caso di sola corrente (pallini pieni) e il caso di onde-correnti a 90° (quadrati vuoti) (Lim e Madsen 2016). a) fondo liscio; b) fondo scabro ($d_{50} = 12.5$ mm).

Allo stesso modo, Lim e Madsen (2016) hanno misurato un aumento in termini di scabrezza al fondo quando le onde sono sovrapposte a una corrente ortogonalmente sopra un letto ricoperto da marmi ceramici ($d_{50} = 12.5$ mm) e una riduzione di essa per il caso di fondo liscio (vedi Figura 2.13). Questi risultati sono in buon accordo con il modello di strato limite non lineare per onde e correnti ortogonali proposto da Grant e Madsen (1979, 1986).

I modelli numerici presentano maggiori difficoltà nello studio dell'interazione di onde e correnti in un dominio tridimensionale con un letto sabbioso in quanto evolve con scale temporali molto diverse da quello idrodinamico. Pertanto, non esistono molti studi che riguardano l'interazione di onde e correnti con angolo retto. Tra i pochi va ricordato Myrhaug et al. (2001) che analizza l'attrito del fondo nella direzione della massima sollecitazione tangenziale del letto utilizzando una rappresentazione parametrica basata su dati sperimentali (Simons et al., 1997).

2.5.2 Formazione Forme di Fondo

Oltre alle variazioni precedentemente illustrate, in presenza di fondali sabbiosi non coesivi, le azioni indotte dal campo di moto possono indurre variazioni morfologiche del fondale stesso, con la conseguente comparsa di forme di fondo di varie dimensioni.

Le forme di fondo sono strutture sedimentarie in un corso d'acqua che si generano come conseguenza del movimento del materiale solido trasportato dal flusso idrico. Queste strutture nascono per via dell'interazione fra onde, correnti e sedimenti che costituiscono il fondo su cui il fluido si muove.

La classificazione delle forme di fondo viene usualmente affrontata sulla base della scala spaziale che le caratterizza.

Definendo come caratteristiche fondamentali (vedi Figura 2.14) l'altezza η , intesa come distanza tra la cresta e il successivo cavo, e la lunghezza d'onda λ , intesa come la distanza che intercorre tra due creste successive, le forme di fondo possono essere suddivise in:

- Forme di fondo di grande scala, aventi altezza dell'ordine di alcuni metri e lunghezza d'onda dell'ordine di alcune centinaia di metri (per esempio le sand waves tipiche nel Mar del Nord);
- Forme di fondo di media scala, caratterizzate da un'altezza di circa 0.1-0.5 m e una lunghezza d'onda di circa 1-5 m (dune e mega-ripples);
- Forme di fondo di piccola scala, caratterizzate da un'altezza di pochi cm e una lunghezza d'onda dell'ordine dei 10 cm (ripples).

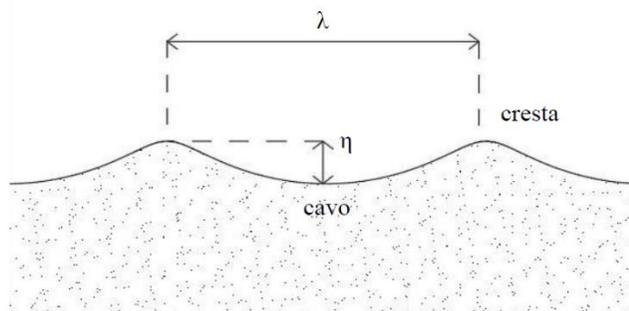


Figura 2.14 Profilo longitudinale dei ripples.

Come già detto, in presenza di forme di fondo il coefficiente d'attrito cambia ordine di grandezza, essendo influenzato non più dal diametro del sedimento che costituisce il fondale quanto dalla dimensione della forma di fondo stessa.

In particolare, con riferimento alle forme di fondo di piccola scala, quando predomina la componente di moto oscillante, si generano i wave-ripples, caratterizzati da un profilo simmetrico rispetto la verticale passante per le creste, mentre quando predomina la componente stazionaria si ha la formazione dei current-ripples il cui profilo longitudinale manifesta una spiccata asimmetria. Tuttavia questa distinzione non risulta sempre essere così netta in quanto l'interazione di un'onda con il fondo del mare produce sempre all'interno dello strato limite una componente del moto stazionaria la cui intensità dipende dalla ripidità dell'onda e dalla profondità locale.

Si genera quindi una categoria di forme di fondo chiamata wave-current ripples, che presenta caratteristiche intermedie tra i due tipi precedentemente descritti.

Più in generale, i ripples si formano quando le azioni indotte dal moto ondosso raggiungono un valore di poco superiore a quello necessario per la mobilitazione dei sedimenti che costituiscono la superficie sabbiosa. Essi variano per forma e dimensioni crescendo in altezza e lunghezza sotto l'azione delle onde. In un lasso di tempo variabile, da un piccolo numero di cicli per onde piccole, a qualche minuto per onde più grandi, si raggiunge una condizione d'equilibrio in cui il profilo longitudinale si mantiene pressoché invariato nel tempo, a meno di una migrazione studiata, fra gli altri, da Faraci e Foti (2002) e da Blondeaux et al. (2015).

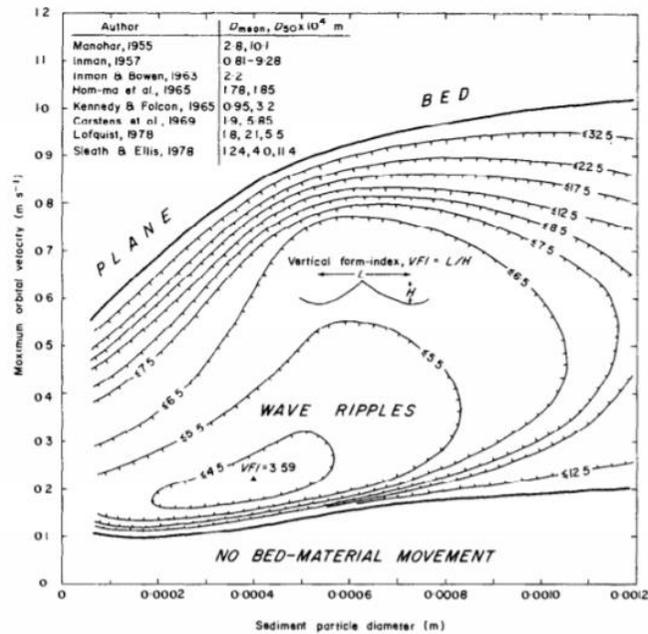


Figura 2.15 Grafico individuazione fasi di mobilitazione dei sedimenti (Van Rijn 1990).

Come mostrato in Figura 2.15, per fissato valore di velocità orbitale al fondo, diametro dei sedimenti e caratteristiche dell'onda è possibile individuare tre diverse fasi di mobilitazione dei sedimenti al fondo. Procedendo dal basso si individua una zona in cui il valore di velocità al fondo non è sufficiente a mobilitare i sedimenti; la seconda zona è caratterizzata da un range di valori prossimi circa a 1.2 volte il valore della velocità critica, atta a mobilitare i sedimenti, dove si manifesta la formazione dei ripples; infine nella terza zona le tensioni sono tali da mobilitare tutto il fondo sabbioso generando il fenomeno conosciuto in letteratura come sheet-flow.

Una classificazione dei ripples, mostrata in Figura 2.16, prevede la suddivisione in:

- Linear ripples, che includono le forme più regolari e simmetriche; di questi fanno parte i rolling grain ripples e i vortex ripples che verranno approfonditi successivamente;
- Irregular ripples, che riguardano forme di fondo piuttosto irregolari e asimmetriche;
- Cross-ripples o brick pattern ripples, generati dagli irregular ripples a causa dall'aumento dell'altezza d'onda e della asimmetria orbitale. Essi sono costituiti

da due serie di ripples orientati obliquamente alla direzione del moto; la prima tende ad assumere un profilo con creste molto allungate, la seconda tende invece ad assumere una configurazione con creste più corte contenute nel cavo dei ripples più grandi;

- Lunate ripples, generati dai precedenti a causa dell'incremento della asimmetria della velocità orbitale, presentano una scala di lunghezza dell'ordine del metro, e sono molto frequenti quando il fondo è costituito da sabbia a grana grossa (0.25-0.75 mm), sotto determinate condizioni di intensa velocità orbitale asimmetrica generate da onde di lungo periodo.

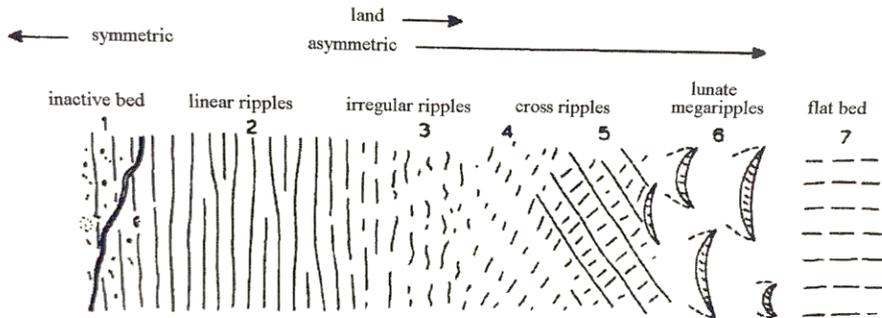


Figura 2.16 Schema di come i ripples possono presentarsi nella zona costiera.

La formazione dei ripples può essere descritta attraverso una funzione f che dipende dalle seguenti variabili:

- μ = viscosità del fluido;
- ρ = densità del fluido;
- T = periodo di oscillazione;
- g = accelerazione di gravità;
- d_0 = diametro orbitale al fondo;
- ρ_s = densità dei grani costituenti il fondale;
- d_{50} = dimensioni dei grani costituenti il fondale.

Queste sette variabili appena descritte possono essere raggruppate in tre sottogruppi: nell'ordine le prime due racchiudono le caratteristiche del fluido, dalla terza alla quinta considerano tutte le variabili descrittive del flusso ed infine le ultime due tengono conto delle caratteristiche dei sedimenti del fondale. La determinazione di una soluzione esatta per una funzione f così definita risulta particolarmente complessa. Per ovviare al problema si utilizzano i noti principi dell'analisi dimensionale attraverso il teorema di Buckingham per cui è possibile risolvere il problema riducendo le variabili da controllare considerandole in termini adimensionali (vedi paragrafo 3.2).

Per la loro importanza pratica, le strutture sedimentarie sono state ampiamente studiate sia teoricamente che sperimentalmente.

Fra i primi studi sulla classificazione dei ripples si ricorda quello di Bagnold (1946) che li suddivise nelle due tipologie rolling grain ripples e vortex ripples descrivendone il meccanismo di formazione e collasso. I rolling grain sono i primi a formarsi, per effetto del rotolamento dei granelli sabbiosi sul letto omogeneo e rimangono così fintanto che la velocità del fluido cresce a tal punto da far franare la cresta dei ripples

verso la zona del cavo successivo; una volta innescato questo meccanismo si ha il passaggio ai vortex ripples (Figura 2.17) che prendono tale nome per via del caratteristico vortice che si separa in corrispondenza della cresta. Quando la velocità del fluido supera di due volte la velocità critica di movimentazione dei sedimenti si assiste esclusivamente alla formazione dei soli vortex ripples. Bagnold (1946) trovò inoltre, attraverso esperimenti condotti in condizioni di moto oscillante sui ripples, che una volta che i grani iniziano a muoversi e i ripples a formarsi, la loro lunghezza d'onda è quasi coincidente al diametro orbitale.



Figura 2.17 Transizione da rolling grain ripples a vortex ripples.

Un' ulteriore classificazione dei ripples si può evincere da Dingler et al. (1976) i quali aggiunsero alle due tipologie individuate da Bagnold una terza categoria denominata relict ripples. Inoltre fornirono un criterio per definire la simmetria dei ripples che si basa sul rapporto tra la distanza orizzontale della cresta dal cavo con la lunghezza d'onda dei ripples stessi. Quando questo rapporto è pari a 0.5, il ripples risulta simmetrico.

Mogridge e Kamphuis (1972) hanno mostrato che la lunghezza d'onda e l'altezza dei ripples varia in funzione della densità del grano e che essa diminuisce d'importanza con l'aumentare del periodo d'onda. Inoltre Wiberg e Harris (1994) hanno proposto una classificazione comune sia per i dati di laboratorio che per quelli sul campo, sostenendo che la differenza principale tra i due casi è che differiscono di un ordine di grandezza in d_0/d_{50} , dove d_0 è il diametro orbitale dell'onda vicino al letto e d_{50} è il diametro del grano. In questa classificazione, i ripples sono suddivisi in tre gruppi: orbitali, suborbitali e anorbitali. La scala di base dei ripple orbitali è su d_0 , dei ripples anorbitali è d_{50} ; i ripples suborbitali rappresentano la regione di transizione tra questi due limiti.

Attraverso uno studio teorico Sleath et al. (1976) studiando il flusso oscillatorio su una parete inizialmente poco ondulata ha scoperto che, quando un fondo piano interagisce con un moto ondoso si generano dei flussi stazionari che possono essere pensati come celle di ricircolo le cui dimensioni, intensità e direzione dipendono sia dal moto ondoso sia dalla presenza delle ondulazioni al fondo. In questa fase i ripples appartengono alla fase di rolling grain ripples.

In Figura 2.18 è mostrata la generazione di tali celle che si ottengono se all'interno dell'equazione del moto vengono considerate le soluzioni dal secondo ordine in poi.

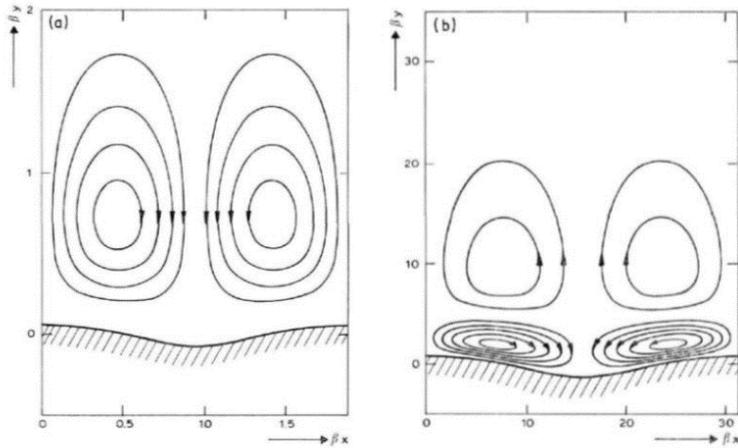


Figura 2.18 Celle di ricircolo generate in presenza di moto ondoso su letto con ripples (Sleath 1976).

Molti studi analitici hanno fatto uso di metodi perturbativi, fornendo una soluzione analitica nel caso di rapporto tra l'ampiezza orbitale dell'onda e la lunghezza d'onda del ripple minore o maggiore di 1 ($a/L \ll 1$ o $a/L \gg 1$). La scabrezza di ogni singolo granello di sedimento è sufficiente per avviare il processo che porta alla formazione dei ripples.

Poiché il sedimento è mobilitato dal fluido, se la corrente in prossimità del fondo è diretta dal cavo verso le creste della perturbazione ed è abbastanza forte da trascinare i sedimenti, questi ultimi tendono a spostarsi dai cavi verso le creste. La tendenza dei sedimenti ad accumularsi vicino alle creste è contrastata dalla componente della forza di gravità che agisce verso il basso. Ne consegue che la crescita dell'ampiezza dei ripples del fondale è controllata da un equilibrio tra questi due effetti. Se la gravità prevale sulla resistenza, l'ampiezza decade, altrimenti cresce portando alla comparsa dei ripples. A tal proposito, Blondeaux e Vittori (1990), hanno analizzato l'evoluzione temporale delle perturbazioni di fondo piatto sabbioso soggetto ad un campo di moto viscoso oscillante. Tale studio si è focalizzato principalmente sulla determinazione delle caratteristiche delle forme di fondo all'equilibrio, attraverso un'analisi lineare o debolmente non lineare del fondo restituendo una chiara comprensione dei meccanismi che portano alla comparsa delle forme di fondo e alla sospensione dei sedimenti.

Gli stessi autori successivamente (Blondeaux e Vittori (1991)) hanno analizzato le dinamiche di vorticità su letto con ripples, mostrando che ogni volta che una struttura vorticoso si sposta verso il fondo, viene generato un vortice secondario vicino al profilo del ripple, che interagisce con il vortice primario e lo fa allontanare dal fondo (vedi schema in Figura 2.19); inoltre a seconda dei valori dei parametri, l'evoluzione temporale può produrre due o anche più strutture vorticoso lungo il ripples. Occasionalmente i vortici generati in precedenza possono fondersi in corrispondenza della cresta dei ripples, generando una struttura unica.

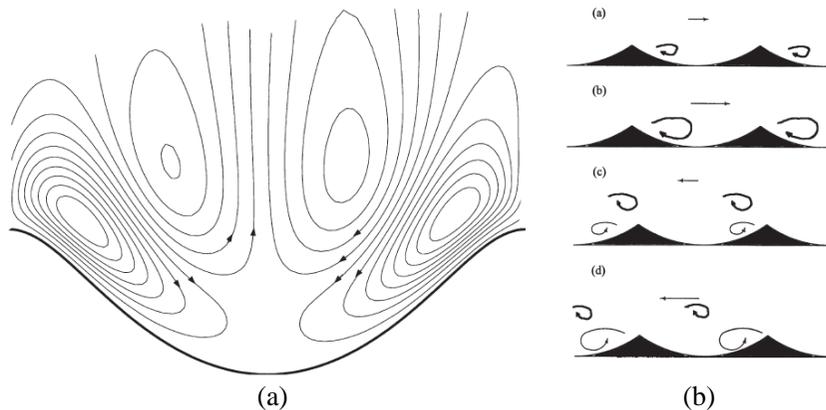


Figura 2.19 Vorticità su letto con ripples. a) schema doppia struttura delle celle di ricircolo b) sequenza schematica di vorticità lungo un ripple (Ourmieres and Chaplin, 2004).

Un'altra campagna sperimentale è stata condotta da Earnshaw e Greated (1998) per il caso di sole onde su letto fisso con ripples realizzati in polistirolo, misurando la velocità all'interno dello strato limite con tecnica PIV (Particle Image Velocimetry). I risultati ottenuti hanno mostrato, al variare delle condizioni di flusso, che un vortice cresceva e veniva espulso in corrispondenza della cresta del ripple. Le condizioni sperimentali sono state utilizzate per la convalida di un modello numerico che prevedeva sia delle forze che delle traiettorie del vortice stesso.

Scandura et al. (2000) effettuando uno studio numerico per il caso di sola onda, hanno osservato la generazione dei vortici sopra i ripples durante la prima fase di transizione ed hanno individuato un ispessimento dello strato limite al distacco del vortice.

Malarkey e Davies (2012) hanno descritto due modelli di vortici discreti per flussi oscillatori su increspature del fondale, un modello non viscoso senza diffusione di vorticità e un modello *cloud-in-cell*, con buoni risultati in termini di vorticità per casi con ampiezze orbitali di onde dello stesso ordine della lunghezza d'onda del ripple ($a/L \cong 1$).

In presenza di onde irregolari, Van der Werf et al. (2007) hanno riscontrato che la formazione di vortici sul versante sottoflutto (fianco onshore) durante il flusso onshore è molto più forte che sul versante di risalita del ripple (fianco offshore) durante il flusso offshore, perché la velocità massima onshore è maggiore della velocità massima offshore.

Infine, uno studio significativo in presenza di onde sia regolari che irregolari è stato effettuato da Faraci e Foti (2002) i quali hanno effettuato una campagna sperimentale volta ad analizzare il comportamento di fondali sabbiosi in presenza di tali forzanti. Partendo da una condizione iniziale di fondo piatto si raggiunge una condizione d'equilibrio, caratterizzata dalla presenza di forme di fondo. I risultati hanno evidenziato che, in presenza di onde regolari, si ha una transizione da rolling grain ripples a vortex ripples che caratterizzano la configurazione di equilibrio finale; tale transizione risulta pressoché assente, in presenza di onde irregolari generandosi direttamente forme di fondo che evolvono in vortex ripples.

2.5.3 Interazione di onde e correnti in presenza di ripples

Come già accennato nel paragrafo precedente, a differenza di un fondo scabro, la presenza di elementi di scabrezza relativamente grandi e regolari, come i ripples, produce

il trascinarsi lungo la colonna d'acqua di vortici regolari di grandi dimensioni, i quali si presentano per lo più in modo organizzato, sia nello spazio che nel tempo. La presenza di ripples sul fondale influenza significativamente il campo di moto anche in presenza di onde e correnti simultanee.

Aydin (1987) ha condotto esperimenti in un tunnel d'aria con un fondo fisso costituito da ripples asimmetrici in condizione di onde e correnti collineari, misurando la velocità media e la turbolenza in diversi punti di misura lungo la lunghezza dei ripples. Ha anche effettuato una simulazione numerica del moto, utilizzando un modello a vortice discreto e il modello $k-\epsilon$.

Schematizzando il fondo con ripples con un fondo ricoperto da piccoli elementi a sezione triangolare, Kemp e Simons (1982) hanno sperimentato che le sollecitazioni di taglio non aumentano considerevolmente a causa della sovrapposizione della corrente sull'onda e il vortice che si genera cresce da 4 a 6-7 volte in altezza (vedi anche Tunstall e Inman, 1975). Pertanto, vengono sollevati dal fondo più sedimenti i quali, a loro volta, vengono diffusi nella zona di turbolenza indotta dalla corrente; ciò potrebbe comportare velocità di trasporto significativamente più elevate fintanto che l'aumento dello sforzo tangenziale al fondo non è tale da impedire la formazione di ripples con elevate altezze.

Più recenti sono gli studi di Mathisen and Madsen (1997) i quali hanno condotto una campagna sperimentale in una vasca con barre a sezione triangolare che simulano la scabrezza del fondale. L'altezza e la spaziatura di questi elementi sono state scelte in modo tale che le barre simulassero le stesse caratteristiche dei ripples che erano stati ottenuti durante i loro esperimenti su fondo mobile (Mathisen and Madsen (1996)). Il loro studio si concentra essenzialmente sulla scabrezza equivalente di Nikuradse della sabbia nel caso di moto combinato collineare. In tal caso, i ripples fissi potrebbero avere un attrito diverso rispetto ai sand ripples ottenuti su fondo mobile.

A tal proposito calcoli morfologici su tale argomento sono stati eseguiti da Andersen (1999), il quale ha osservato che sia in presenza di ripples 'vivi', generati cioè su fondo sabbioso soggetto a un moto oscillante, che di ripples asimmetrici e simmetrici fissi, l'attrito mantiene nei vari casi un comportamento simile.

Tra gli studi più significativi va citato quello condotto da Fredsøe et al. (1999) i quali hanno osservato, attraverso un confronto tra il caso di sola onda e quello di onde e correnti in presenza di ripples, che l'intero profilo di velocità viene spostato a un'elevazione maggiore; l'analisi dei profili logaritmici mostra due "strati logaritmici", uno relativo all'effettiva scabrezza prodotta per la presenza dei ripples, e l'altro relativo alla maggiore scabrezza apparente indotta dal moto ondoso.

Infine, la turbolenza vicino al fondo aumenta a causa della presenza del vortice sottoflutto che si muove lungo i ripples prima dell'inversione del flusso. Tale situazione è stata ottenuta sia per il caso di sola onda che per il caso di onde più corrente. In Figura 2.20 vengono mostrati i due casi a confronto per differenti fasi dell'onda.

Gli studi sul campo di moto in presenza di onde e correnti interagenti con angolo retto in presenza di ripples sono relativamente pochi e tra i primi vi sono quelli condotti da Ranasoma e Sleath (1994) i quali hanno eseguito una campagna sperimentale volta a misurare l'idrodinamica del flusso su ripples di cemento.

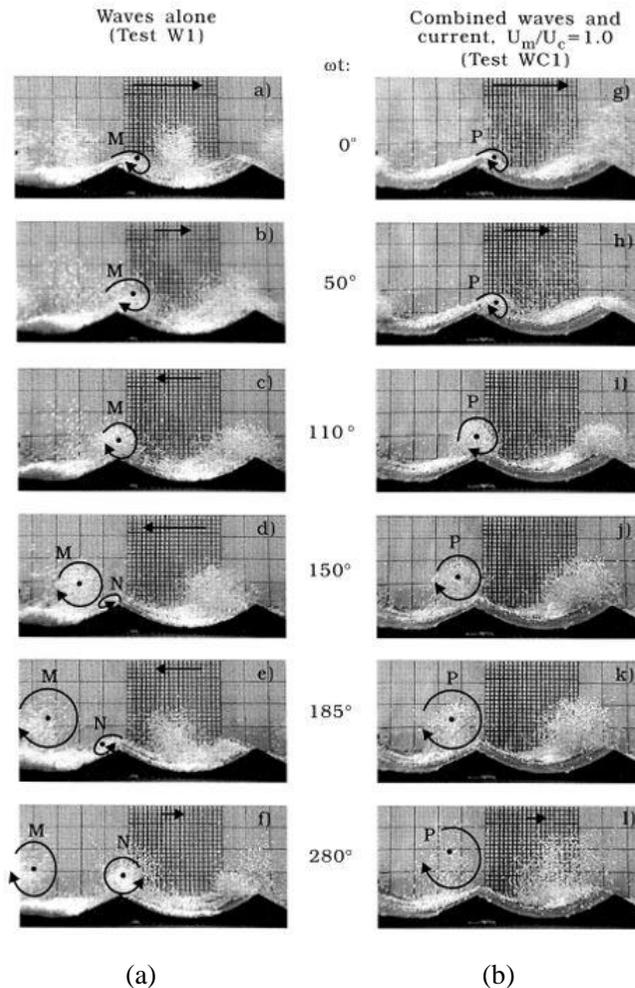


Figura 2.20 Analisi di vortici su letto con ripples. a) caso di sole onde; b) caso di onde e correnti collineari (Fredsoe et al. (1999)).

Khelifa e Ouellet (2000) hanno proposto relazioni empiriche al fine di prevedere la geometria dei ripples concentrandosi sulla reazione di un letto sabbioso sottoposto alla presenza di onde e correnti ortogonali.

Andersen e Faraci (2003) hanno condotto un'indagine sperimentale sulla geometria del ripple in presenza di onde e correnti ortogonali al fine di trovare le condizioni per la formazione di ripples regolari. In particolare, essi hanno determinato che le creste dei ripples apparivano come linee rette se la velocità della corrente era del 20-60% della velocità orbitale dell'onda. Hanno anche effettuato simulazioni numeriche cambiando la direzione tra le onde e la corrente tra 0 e 90°, i cui risultati principali sono riassunti di seguito:

- in presenza di onde e correnti vicine al fondo in presenza di ripples, gli effetti delle onde dominano sulla corrente, aumentandone la scabrezza al fondo. Tale scabrezza, interpretata tramite la formula di Nikuradse, è in accordo con la scabrezza del flusso;

- vicino al fondo, la corrente è allineata parallelamente alle creste dei ripples. Pertanto, poiché la direzione di trasporto solido è governata dalla direzione della corrente vicino al fondo, piuttosto che dalla corrente media, il trasporto risulta essere parallelo alle creste dei ripples, cioè ortogonale alle onde. Quindi, la corrente allineata con le creste dei ripples vicino al fondo potrebbe avere una componente orientata in direzione opposta alla costa e quindi anche il trasporto dei sedimenti potrebbe avere una componente diretta offshore;
- il fattore di attrito per il caso di onde e correnti normalizzato rispetto al fattore di attrito per il caso di sola corrente f_{wc}/f_{co} aumenta quando la corrente diminuisce. In particolare, può essere espressa come legge di potenza dipendente dal rapporto tra la velocità della corrente e la velocità orbitale dell'onda U_c/U_w e parametrizzata in termini di angolo d'attacco tra le due forzanti, indipendentemente dalla geometria del ripple come mostrato in Figura 2.21

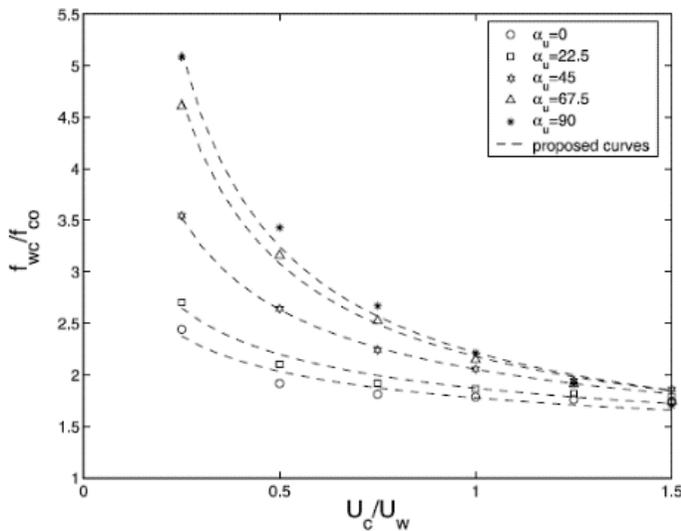


Figura 2.21 Andamento del coefficiente d'attrito per i vari angoli d'attacco indagati tra le due forzanti (Andersen e Faraci 2003).

Inoltre, tra gli studi più recenti, Faraci et al. (2008) hanno osservato, analizzando i profili di velocità su un letto con ripples, che l'esistenza di celle di ricircolo nella parte inferiore della colonna d'acqua genera una modifica del profilo di velocità e nello specifico un'inversione della velocità stessa. Quando la corrente è sovrapposta alla sola onda, la velocità del flusso al fondo aumenta per valori piccoli della scabrezza e diminuisce per grandi valori di essa. In merito a ciò, focalizzando l'attenzione su uno specifico fondale, quale può essere quello costituito da ripples, esso si comporta come una superficie avente grande scabrezza, coinvolgendo lo strato limite dell'onda per diventare turbolento; la scabrezza del letto in tal caso può aumentare fino a un ordine di grandezza in presenza di onde e correnti. Mediante un modello numerico di chiusura della turbolenza del tipo $k-\omega$, hanno rilevato infine che, sia per il caso di sola onda che per il caso di onda più corrente, i vortici si staccano alla fase $0-45^\circ$ sulla cresta e la vorticità diminuisce in presenza contemporanea di onda e corrente (Figura 2.22).

Al fine di ottenere una ampia prospettiva e un ampio set di dati sullo studio di interazione tra onde e corrente ortogonali e collineari in presenza di diverse tipologie di

scabrezza al fondo, per lo svolgimento del presente lavoro si sono allestite due campagne sperimentali volte, una allo studio di interazione di onde e correnti ortogonali, l'altra per onde e correnti collineari che verranno successivamente illustrate. Durante entrambe le campagne è stata fatta variare la scabrezza al fondo.

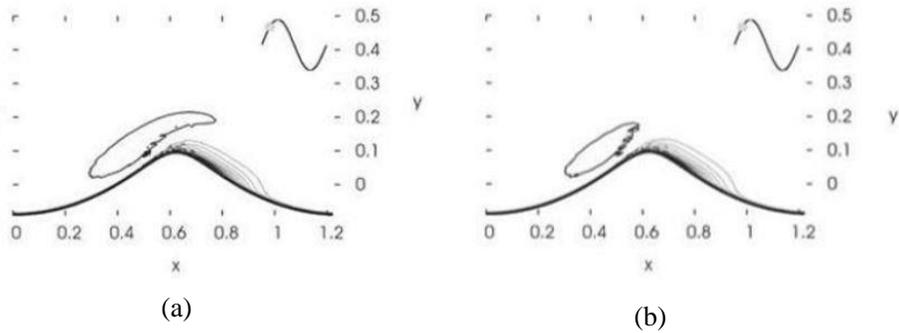


Figura 2.22 Celle di Ricircolo (Faraci et al., 2008). a) caso di solo onde; b) caso di onde più corrente.

In particolare sono stati estrapolati dati di velocità e di elevazione della superficie libera in presenza di tre differenti fondi (sabbia, ghiaia e ripples) al fine di individuare come tali parametri che negli studi di letteratura abbiamo visto essere fondamentali (angolo d'attacco tra le forzanti e scabrezza al fondo) modifichino il campo di moto. A differenza di ciò che è già esiste in letteratura, con il presente lavoro, i dati delle singole campagne ottenuti al variare delle scabrezze al fondo possono essere messi a confronto senza essere soggetti a vincoli esterni essendo estrapolati all'interno della stessa apparecchiatura e quindi a parità di limiti fisici e meccanici.

Capitolo 3

Modellazione fisica dell'interazione di onde e correnti su fondali scabri

3.1 Generalità

La modellistica fisica è stata in passato uno strumento fondamentale con cui affrontare e risolvere problemi di ingegneria, quando ancora i calcolatori non erano disponibili oppure non erano accessibili; ancora oggi, i dati acquisiti attraverso l'uso dei modelli fisici rimangono di grande importanza, e si affiancano ai dati determinati sul campo e ai risultati analitici ottenuti con modelli matematici. I modelli fisici presentano dunque diversi vantaggi, come la possibilità di rappresentare la tridimensionalità del moto e la capacità di riprodurre geometrie complesse e fenomeni turbolenti; inoltre, trattandosi di una rappresentazione in scala di un problema reale, questi modelli forniscono risultati spesso altamente affidabili e verosimili a quelli che si osserverebbero negli equivalenti casi reali, sebbene possano essere presenti effetti di scala.

Tuttavia, sviluppare un modello in scala presenta dei limiti, perché si rendono necessari laboratori attrezzati in cui realizzare le installazioni. Tutto questo implica un dispendio di tempo e un elevato costo, sia di costruzione, sia di esercizio, oltre che la richiesta di personale tecnico specializzato per la costruzione, l'esercizio e la messa a punto; inoltre, spesso le strutture realizzate sono specifiche per lo studio di determinati fenomeni (con condizioni al contorno pressoché fisse) e dunque risultano poco flessibili nell'utilizzo.

Nella prima parte di questo capitolo verranno illustrati alcuni principi che regolano la modellazione fisica che sono stati adottati per le campagne sperimentali oggetto del presente lavoro.

Più specificamente, per lo studio dell'interazione di onde e correnti collineari e ortogonali sono stati messi a punto due apparati sperimentali distinti basati su criteri di

similitudine differenti (vedi paragrafo 3.2.2). Per la prima tipologia, gli esperimenti sono stati effettuati presso il Tubo a U in dotazione al laboratorio di Idraulica dell'Università di Messina; per l'interazione ortogonale tra le due forzanti, invece, gli esperimenti sono stati riprodotti presso la Shallow water tank del Danish Hydraulic Institute (DHI, Horsholm, Danimarca). Il set up e la strumentazione utilizzata per entrambe le campagne sperimentali sono ampiamente descritti nei paragrafi successivi.

3.2 Principi di similitudine e Modellazione fisica

In ambito scientifico e ingegneristico l'analisi dimensionale rappresenta uno strumento che permette di confrontare e comprendere situazioni reali che sono descritte da grandezze fisiche di diversa natura. Tale analisi consente di applicare il principio di omogeneità dimensionale, che afferma che la condizione necessaria (ma non sufficiente) per la correttezza di una relazione che coinvolge diverse grandezze, è che le dimensioni delle grandezze fisiche in ambo i membri dell'equazione siano le stesse.

Alla base dell'analisi dimensionale vi è il *Teorema di Buckingham*, il quale afferma che dato un processo fisico descritto da un'equazione nella quale compaiono n variabili fisiche, se le grandezze fondamentali di queste n variabili sono k , allora il problema può essere espresso in funzione di $n-k$ gruppi adimensionali costruiti a partire dalle variabili presenti, anche se la forma dell'equazione iniziale rimane sconosciuta. Dunque, la scelta dei parametri adimensionali non è univoca. Tali parametri devono essere individuati in modo tale che il modello fisico sia in grado di produrre risultati soddisfacenti e conformi alla realtà del fenomeno che si vuole indagare. In base alla tipologia di grandezza fisica che viene riprodotta nel modello possiamo suddividere le condizioni di similarità in:

- *Similitudine geometrica*
- *Similitudine cinematica*
- *Similitudine dinamica*

La *similitudine geometrica* è quella similitudine il cui soddisfacimento implica che ogni dimensione del modello sia in un rapporto costante con le corrispondenti dimensioni del prototipo richiedendo quindi l'adozione dello stesso fattore di scala per le tutte le dimensioni del modello. La *similitudine cinematica* consiste invece nel fatto che, in ogni punto del dominio del modello, la velocità deve avere la stessa direzione e lo stesso verso della corrispondente velocità del prototipo a tutti gli istanti. La *similarità dinamica* consiste invece nel fatto che ogni forza che agisce nel modello deve avere la stessa direzione e lo stesso verso della corrispondente forza che agisce nel prototipo. La scala delle forze prevede che il rapporto tra i moduli di forze agenti nel modello sia uguale al corrispondente rapporto che si determina nel prototipo.

Per i problemi di meccanica dei fluidi vengono individuati un numero limitato di parametri adimensionali atti a mettere in luce una particolare caratteristica del moto. Tali parametri si distinguono in funzione del rapporto tra le forze che entrano in gioco. Ad esempio, il *numero di Reynolds* è dato dal rapporto tra le forze d'inerzia e le forze viscosive, e si utilizza per la caratterizzazione dei regimi di moto; il *numero di Froude* è pari al rapporto tra le forze d'inerzia e le forze di gravità, rilevante per moti a superficie libera; il *numero di Eulero* definito come il rapporto tra le forze di pressione e le forze d'inerzia utilizzato per tutti i moti; il *numero di Weber* è dato dal rapporto tra le forze d'inerzia e le forze di tensione superficiale, importante in presenza di moti con interfaccia tra due fluidi;

il numero di Mach pari al rapporto tra le forze d'inerzia e le forze di compressibilità e si utilizza nel caso di fluidi compressibili; infine in presenza di moti oscillanti si considera spesso il numero di Strouhal, definito dal rapporto tra le forze centrifughe e le forze d'inerzia. Tali parametri sono di seguito riportati:

- Numero di Reynolds: $Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu}$;
- Numero di Froude: $Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$;
- Numero di Eulero: $Eu = \frac{F}{\rho V^2 L^2} = \frac{p}{\rho V^2}$;
- Numero di Weber: $We = \frac{\rho V^2 L}{\sigma}$;
- Numero di Mach: $Ma = \frac{V}{c} = \sqrt{\frac{\rho V^2}{\varepsilon}}$;
- Numero di Strouhal: $St = \frac{\omega L}{V}$;

avendo indicato con:

- ρ : densità (kg/m³);
- μ : viscosità dinamica (Ns/m²);
- ν : viscosità cinematica (m²/s);
- g : accelerazione di gravità (m/s²);
- V : velocità (m/s);
- L : lunghezza (m);
- F : forza (N);
- p : pressione (N/m²=Pa);
- σ : tensione superficiale (N/m);
- ε : modulo di elasticità a compressione cubica (N/m²);
- $C=(\varepsilon/\rho)^{1/2}$: celerità delle onde di pressione nel fluido in esame (m/s);

Grazie all'analisi dimensionale, una volta definiti i gruppi adimensionali del prototipo e del modello, è possibile ottenere i criteri di similitudine da rispettare nel modello per mettere in relazione i dati ottenuti dalla sperimentazione con i dati del prototipo. Se il modello e il prototipo rispettano i criteri di similarità geometrica, cinematica e dinamica cioè rispettivamente i rapporti di scala tra le grandezze geometriche, tra le velocità e tra le forze allora si può dire che prototipo e modello sono in rapporto di similitudine idrodinamica.

I criteri di similitudine, quindi, derivano dalle relazioni che intercorrono tra grandezze fisiche, definiti come rapporti adimensionali, tra parametri del prototipo e parametri del modello, che non possono essere modificati senza alterare le ipotesi sulla fisica del fenomeno; sono legati quindi alle leggi di scala. Inoltre, per la presenza di grandezze intensive, non è possibile rispettare contemporaneamente tutti i rapporti tra le forze che intervengono nel fenomeno. Si ricorda, ad esempio, come non sia possibile rispettare contemporaneamente il rapporto di scala dei numeri di Reynolds e di Froude di prototipo e modello in quanto, da semplici passaggi si evince che, affinché nel modello sia riprodotto il numero di Reynolds, la scala delle lunghezze deve essere uguale all'inverso della scala delle velocità mentre per riprodurre il numero di Froude nel modello, la scala delle lunghezze deve essere uguale al quadrato della scala delle velocità perciò entrambi non possono coesistere nel modello.

3.2.1 Generazione Moto Ondoso

La generazione del moto ondoso costituisce un aspetto fondamentale, ampiamente studiato, sia per gli esperimenti fisici in vasca, che per quelli numerici. Nella modellazione fisica di laboratorio, si utilizza tipicamente una strumentazione abbastanza sofisticata di cui il battitore rappresenta la parte principale. Il moto ondoso è prodotto da un sistema di palette (battitori o wavemakers) il cui movimento è controllato da un software. Sono sostanzialmente di due tipi: flap motion e piston motion (Figura 3.1).

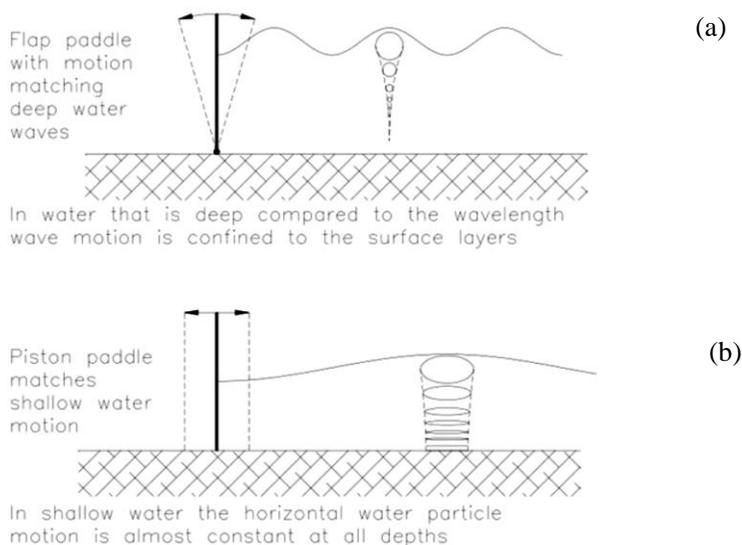


Figura 3.1 Tipologie di wavemaker: a) flap wavemaker; b) piston wavemaker

I primi sono costituiti da pale incernierate superiormente o inferiormente che, con il loro movimento oscillante, inducono all'acqua una velocità sia in direzione verticale che orizzontale. I secondi sono formati da pistoni a comando idraulico, in uno o più elementi, che possono spostarsi solo in orizzontale. L'utilizzo dell'uno o dell'altro tipo è dettato dalle condizioni in cui viene effettuata la sperimentazione e dalle caratteristiche del fenomeno da riprodurre; in linea generale, si può dire che i sistema flap sono più adatti nel caso di elevati livelli d'acqua, mentre nel caso di acque basse risultano più efficienti i piston paddle, in quanto forniscono una velocità costante lungo la verticale (come si ottiene dalla teoria lineare dei wavemakers). I moderni battitori sono in grado di generare vari tipi di onda (onde regolari, irregolari e onde pseudo-random, onde bidimensionali, onde tridimensionali).

3.2.2 Modelli costieri: fondo fisso e fondo mobile

Nello studio dell'idraulica marittima è possibile individuare due sottocategorie di modelli fisici: a fondo fisso e a fondo mobile. I primi anche detti modelli idrodinamici sono utilizzati nello studio dei fenomeni legati alla propagazione del moto ondoso, i secondi, a fondo erodibile, sono mirati invece allo studio del trasporto solido e alla formazione di forme di fondo causate dal moto ondoso.

3.2.2.1 Modelli a fondo fisso

Nei modelli a fondo fisso si individuano due sottocategorie: modelli a onde corte in cui le onde hanno un periodo compreso tra 1 e 20 secondi, utili per studiare gli effetti delle onde generate dal vento sulle coste, sulle strutture marittime e sulla navigazione; modelli a onde lunghe che sono modelli le cui onde hanno periodi che variano da minuti a giorni, e sono utilizzati per studiare gli effetti delle maree su porti e estuari.

Condizione necessaria affinché si abbia un'onda corta, tenuto conto del numero d'onda $k = 2\pi/L$, è che sia valida la seguente relazione:

$$kh > \frac{\pi}{10} \quad \text{o} \quad \frac{h}{L} > \frac{1}{20}$$

I modelli idrodinamici riprodotti in laboratorio consentono di analizzare fenomeni reali nella loro interezza o di studiare aspetti specifici degli stessi; il moto ondoso, infatti, può essere considerato in forma tridimensionale (come nella realtà), oppure in due dimensioni: nel primo caso, si rende necessario l'utilizzo di un bacino in cui le dimensioni in entrambe le direzioni rispettino i criteri di similitudine, mentre nel secondo caso si utilizzano canalette o vasconi bidimensionali.

I modelli a onde corte risultano particolarmente adatti per lo studio di vari fenomeni come ad esempio la cinematica delle onde, il frangimento, l'interazione tra onde e correnti, la formazione e propagazione di forme di fondo, lo strato limite e turbolenza, il trasporto solido, etc.

Le condizioni di similarità possono essere ricavate dalle equazioni di continuità del moto in forma adimensionale, tenendo anche conto degli sforzi di Reynolds. La condizione di similarità dinamica tra modello e prototipo può verificarsi solo se è rispettata la similarità geometrica in tutte le direzioni, il che implica che ci sia uguaglianza nelle condizioni al contorno e nelle condizioni iniziali. Inoltre, per avere una perfetta similitudine, deve essere garantita l'uguaglianza dei parametri adimensionali che sono presenti nelle equazioni del moto anche se in realtà, basta che siano rispettati i criteri di Froude e Strouhal (il criterio di Eulero è automaticamente soddisfatto se sono validi gli altri criteri). Questi infatti garantiscono la similitudine di tutti i termini delle equazioni del moto, ad eccezione di quelli viscosi. In generale, dunque, non viene rispettato il criterio di Reynolds, perciò la similitudine è valida in tutto il campo di moto, tranne che nello strato limite.

Negli esperimenti in cui si vuole studiare lo strato limite laminare, i modelli devono essere riprodotti rispettando il criterio di Reynolds, assumendo come grandezze caratteristiche la velocità e lo spessore dello strato limite. Nei modelli riprodotti rispettando il criterio di Froude, lo strato limite turbolento è comunque in similitudine con il prototipo, perché la viscosità non influenza gli sforzi turbolenti. Nei modelli a fondo fisso, dunque, può essere determinato lo strato limite turbolento modellando opportunamente la scabrezza del fondo. Kamphuis (1973), dopo aver dimostrato che il coefficiente di attrito al fondo fosse indipendente dal numero di Reynolds, propose una relazione (valida in regime di onde corte):

$$\frac{(\tau_0)_{max}}{\rho(U_\delta)_{max}^2} = 0.24 \left(\frac{k_s}{a_\delta} \right)^{\frac{3}{4}}$$

avendo indicato con:

- τ_0 : tensione tangenziale al fondo;
- ρ : densità del fluido;

- U_δ : velocità orbitale dell'onda alla sommità dello strato limite;
- a_δ : ampiezza orbitale dell'onda alla sommità dello strato limite;
- k_s : dimensione lineare della scabrezza superficiale.

Indicando in generale con N_n il rapporto di scala tra prototipo e modello relativo alla generica grandezza n , dalla relazione precedente si ricava il criterio di similitudine per lo strato limite turbolento:

$$(N_{\tau_0})_{wave} = N_\rho (N_{U_\delta})^2 \left(\frac{N_{k_s}}{N_{a_\delta}}\right)^{\frac{3}{4}} = N_\rho (\sqrt{N_g N_L})^2 \left(\frac{N_{k_s}}{N_{a_\delta}}\right)^{\frac{3}{4}}$$

Assumendo che tutte le grandezze lineari abbiano lo stesso rapporto di scala, si ottiene:

$$(N_{\tau_0})_{wave} = N_\gamma N_L$$

Questo rapporto di scala, quindi, è lo stesso che si otterrebbe per le tensioni tangenziali al fondo dalla similitudine in scala di Froude, con la particolarità di aver riprodotto la scabrezza secondo il rapporto di scala delle grandezze geometriche. Resta comunque abbastanza difficile realizzare tale scabrezza del fondo, a causa delle dimensioni molto ridotte.

3.2.2.2 Modello a fondo mobile

I modelli a fondo mobile consentono di studiare i fenomeni di trasporto e deposito di sedimenti non coesivi dovuti all'azione di correnti e onde. Dunque, questi modelli sono utilizzati per studiare (in forma prettamente bidimensionale) fenomeni come l'evoluzione del profilo di spiaggia, l'erosione delle dune, la formazione e la propagazione dei ripples, l'erosione alla base di strutture portuali e marittime, etc.

Tuttavia, realizzare un modello a fondo mobile che rispetti la similitudine con il prototipo è molto complesso, in quanto non è nota a priori l'influenza degli effetti di scala. Il trasporto solido, inoltre, come è noto si costituisce di due aliquote, trasporto al fondo e in sospensione, e questo rende impossibile la realizzazione di un modello che riproduca contemporaneamente entrambi i fenomeni, perciò durante un esperimento bisogna scegliere quale di questi due aspetti si vuole analizzare. A sua volta, il trasporto solido può essere generato da fenomeni diversi (onde corte, onde lunghe, correnti unidirezionali etc.), che non possono essere riprodotti simultaneamente in un modello.

La determinazione dei parametri fondamentali e dei relativi criteri di similitudine per i modelli a fondo mobile può essere effettuata secondo due approcci fondamentali:

- assumere che il trasporto solido sia generato in primo luogo da correnti unidirezionali e aggiungere il moto ondoso;
- assumere che il trasporto solido sia generato da moto ondoso e aggiungere in seguito le correnti.

Kamphuis (1975) osservò che nel modello gran parte del trasporto solido è dovuta alle onde e questo implica che un modello a fondo mobile è scalato essenzialmente secondo i criteri di similitudine validi per i modelli a onde corte con l'aggiunta di correnti opportunamente create.

Inoltre poiché non è possibile il completo soddisfacimento dei criteri di similitudine, Kamphuis (1975) propose una classificazione tipologica (Tabella 3.I) dei modelli in base al soddisfacimento di alcuni tra i criteri di similitudine individuati.

Tabella 3.I Classificazione dei modelli per il trasporto di fondo (Kamphuis, 1975)

Tipologia di Modello	Re_d	F_d	s	l_s	V_s
Best Model (BM)	o	•	•	•	o
Lightweight Model (LWM)	•	•	*	o	o
Densimetrie Froude Model (DFM)	o	•	*	o	o
Sand Model (SM)	o	o	•	o	o

- soddisfatto;
- o non soddisfatto;
- * non soddisfatto nel range $1.05 < \rho_s / \rho < 2.65$.

In particolare in tabella sono riportati i seguenti parametri adimensionali:

- Numero di Reynolds dei sedimenti:

$$Re_d = \frac{U_0 d_m}{\nu}$$

- Numero di Froude dei sedimenti:

$$F_d = \frac{U_0}{\sqrt{(\frac{\rho_s}{\rho} - 1)gd_m}}$$

- Densità relativa dei sedimenti:

$$s = \frac{\rho_s}{\rho}$$

- Lunghezza relativa:

$$l_s = \frac{\lambda}{d_m}$$

- Velocità relativa di sedimentazione

$$V_s = \frac{\omega_s}{U_0}$$

avendo indicato in aggiunta ai parametri precedentemente definiti (vedi paragrafo 3.2), con d_m il diametro medio dei sedimenti, U_0 la velocità al fondo, ρ_s la densità dei sedimenti, λ la lunghezza caratteristica e ω_s la velocità di sedimentazione.

Come si evince dalla Tabella 3.I, i modelli BM sono quelli che più si avvicinano alla realizzazione della piena similitudine; tale criterio richiede però che i sedimenti usati nel modello abbiano pari densità dei sedimenti del prototipo e quindi va rispettato il principio di densità relativa. Per tal motivo i BM possono essere adottati solo quando le densità dei sedimenti

del prototipo hanno dimensioni piuttosto elevate ed inoltre l'utilizzo di tale modello comporta l'introduzione di effetti di scala legati all'aver trascurato gli effetti della viscosità.

Il modello LWM mantiene la somiglianza tra Re_d e F_d tuttavia, la scala della velocità relativa di sedimentazione non viene preservata nel modello. Ciò fornisce una certa libertà nella selezione di materiali per simulare i sedimenti nei modelli.

Il Densimetric Froude Model è simile al LWM tranne per il fatto che rinuncia alla conservazione della scala del Numero di Reynolds dei sedimenti per acquisire maggiore flessibilità nella specifica dei parametri del modello.

Infine, Kamphuis ha definito il Sand Model il quale soddisfa il requisito che la densità relativa del sedimento del modello abbia la stessa densità del prototipo; molti

ritengono che tale criterio sia preferibile per i modelli di trasporto dei sedimenti costieri. (Dalrymple 1989).

3.2.3 Modelli utilizzati nel presente lavoro

Alla luce dei limiti e dei vincoli precedentemente esposti, il presente lavoro di tesi si è articolato in due distinte campagne sperimentali, una volta alla modellazione dello strato limite in presenza di onde e correnti collineari con alti numeri di Reynolds e l'altra allo studio del campo di moto in presenza di onde e correnti ortogonali.

La modellazione dello strato limite, di onde e correnti collineari, è stata realizzata tramite un'apposita apparecchiatura costituita da un "tubo a U" in dotazione del laboratorio di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria di Messina all'interno del quale viene generato un moto oscillante per mezzo di un pistone. Lo strato limite così riprodotto varia secondo la direzione longitudinale in quanto nella realtà esso dipende dal moto irrotazionale esterno che ha direzione diversa nei due semicicli, generando una variabilità nello spessore dello strato limite, con conseguente formazione di un moto secondario. Attraverso tale apparecchiatura, in condizioni idrodinamiche differenti è stato possibile realizzare sia modelli a fondo mobile sia modelli a fondo fisso con differenti scabrezze opportunamente scalate (vedi paragrafo 3.4). In tale apparecchiatura è possibile riprodurre modelli con fattori di scala compresi tra $1 \div 2$ e $1 \div 10$ in scala di Froude. Nel caso di fondo mobile è stato utilizzato il Sand Model (SM) in quanto, pur potendosi commettere errori di valutazione nel trasporto solido legati all'aver trascurato il criterio di Froude, si è ritenuto che questo non influenzi in misura sostanziale l'evoluzione e l'equilibrio delle forme di fondo che ivi si generano. A tal fine, le caratteristiche granulometriche della sabbia adottata ($d_{50} = 0.125$ mm) per la campagna sperimentale non inficiano in modo determinante i risultati finali ottenuti.

Rispettando i criteri di Froude, è stato implementato un modello a fondo fisso in presenza di onde corte per lo studio dell'interazione di onde e correnti ortogonali su fondi scabri. Tale fenomeno è stato riprodotto in una vasca opportunamente attrezzata presso il Danish Hydraulic Institute in modo da riuscire a riprodurre condizioni idrodinamiche in svariati range di altezza d'onda e di periodo sia in regime dominato dalla corrente che in regime dominato dall'onda.

Al paragrafo 3.3 viene illustrato il set up utilizzato per l'implementazione di tale modello.

3.3 Apparato sperimentale per lo studio dell'interazione di onde e correnti ortogonali

L'interazione ortogonale tre onde e correnti è stata studiata attraverso la campagna sperimentale condotta nella Shallow Water Tank presso il DHI Water and Environment (Hørsholm, Danimarca). In Figura 3.2 è mostrata una immagine estratta da street view dell'edificio e un'immagine rendering del prospetto di tale struttura. Tale rendering è stato realizzato attraverso l'uso del software BIM di architettura ArchiCad con il quale è stato possibile ricreare nei minimi dettagli un modello 3D del laboratorio e di tutte le attrezzature presenti. Grazie alla navigazione interna al modello e al potente motore grafico (CineRender Maxon), è stato possibile rappresentare e descrivere con più accuratezza la campagna sperimentale, ottenendo risultati non altrimenti apprezzabili da una classica rappresentazione 2D.

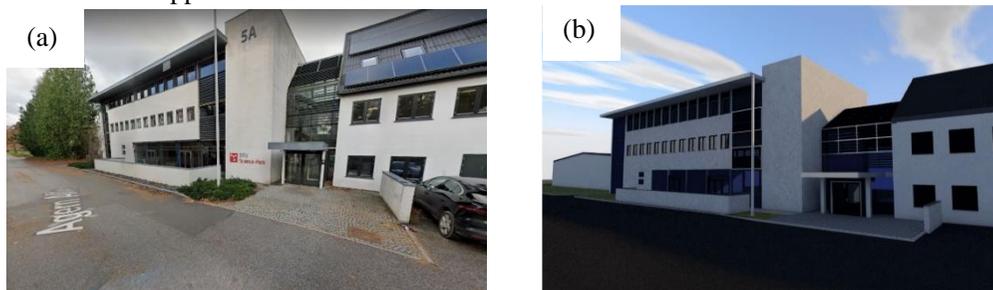


Figura 3.2 Danish Hydraulic Institute (Hørsholm, Danimarca). a) Street view da Google Maps; b) Rendering.

L'istituto è dotato di una vasca di sperimentazione (Figura 3.3) di dimensioni pari a 35 m per 25 m e profondità massima pari a 0.8 m e risulta adatta per lo studio degli effetti combinati dovuti ad onde e correnti. Il bacino consente la propagazione di una corrente lungo la sua dimensione maggiore attraverso l'uso di tre sommerse, in grado di ricircolare una portata di $1\text{m}^3/\text{s}$. La sezione di ingresso della portata di ricircolo inizialmente ampia quanto tutta la larghezza della vasca, è stata ridotta da 25 m a 12 m, in modo da riuscire a riprodurre sia un regime dominato dalla corrente sia un regime dominato dalle onde come meglio descritto nel seguito.

All'interno della vasca è presente una batteria di generatori d'onda, per una lunghezza totale di 18 m, disposti lungo la dimensione maggiore della vasca; tali battitori permettono di generare onde con diversi periodi e altezze d'onda.

Sul lato opposto ai generatori sono state posizionate due diverse tipologie di assorbitori al fine di garantire l'assorbimento dell'energia dell'onda incidente all'estremità opposta ai generatori d'onda: assorbitori parabolici passivi e, alle loro spalle, una spiaggia a forma di C di ghiaia piana ($d_{50}=0.01\div 0.1$ m). Nella Figura 3.3 e nella Figura 3.4 è possibile individuare la posizione all'interno della vasca degli assorbitori e del generatore.

Il sistema di coordinate adottato ha origine nel punto in alto a sinistra della vasca, con l'asse x parallelo alla direzione di propagazione della corrente, l'asse y parallelo alla direzione della direzione di propagazione dell'onda, l'asse z situato sul fondo e positivo se diretto verso l'alto. Parte della strumentazione utilizzata è retta da un carrello montato su un ponte, posizionato nella parte centrale della vasca (Figura 3.4).



Figura 3.3 Planimetria vasca di sperimentazione.



Figura 3.4 Vasca di Sperimentazione. a) foto laboratorio; b) rendering laboratorio

3.3.1 Generazione delle Forzanti

Durante la campagna sperimentale sono state effettuate prove di sola corrente, solo onde e onde e corrente. Le onde sono state generate nel bacino da un generatore di onde (piston paddle) costituito da una schiera di 36 pale alte 1.2 m e larghe 0.5 m ciascuna (Figura 3.5 a). Ogni pistone è controllato da un servomotore elettrico tramite il software DHI Wave Synthesizer, che consente di impostare il tipo di onda (regolare o random), le caratteristiche dell'onda e la durata del test. La profondità dell'acqua può variare tra 0.2 m e 0.8 m. I valori utilizzati durante questa campagna sono 1 s e 2 s per il periodo; l'altezza d'onda è tra 0.05 m e 0.18 m e la profondità d'acqua assume valori pari a 0.4 m e 0.6 m.

La corrente è stata generata utilizzando tre pompe (Figura 3.5 b), le pompe 1 e 2 generano insieme una portata di $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$, la pompa 3 genera una portata di $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ per un totale di $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$. Per regolare il livello dell'acqua si aprono o chiudono le saracinesche 4 e 5 (indicate in Figura 3.5 b).

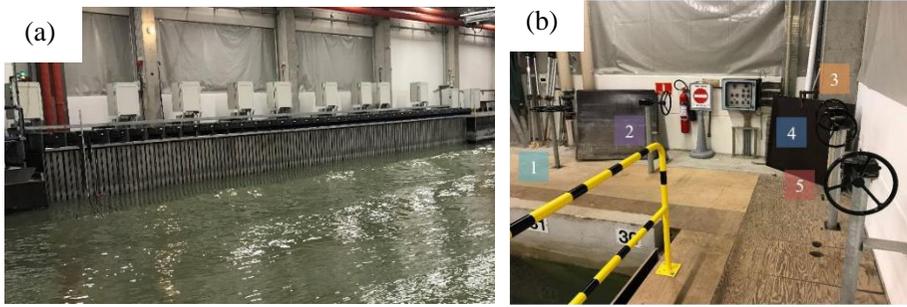


Figura 3.5 Generatori di forzanti. a) serie di battitori; b) regolatori di flusso.

3.3.2 Preparazione dei fondi

Sono state eseguite prove su tre differenti scabrezze, ovvero un letto di sabbia (sand bed, *SB*), un letto di ghiaia (gravel bed, *GB*) e un letto di ripples (ripples bed, *RB*). In particolare, sono stati realizzati diversi pannelli per coprire un'area di 37.5 m², ovvero da 12 pannelli di dimensioni 1.25 x 2.5 m. Questo lavoro è stato eseguito per tutte e tre le scabrezze: sabbia, ghiaia e ripples. Più in particolare, i pannelli in sabbia e ghiaia sono stati realizzati con pannelli di legno sui quali è stato steso uno strato omogeneo di colla cosparsa rispettivamente per le due scabrezze con sabbia ($d_{50} = 0.9$ mm) e ghiaia ($D = 16 \div 36$ mm, $d_{50} = 25$ mm).

I pannelli di ripples (Figura 3.6) sono stati realizzati fissando una lastra ondulata in materiale plastico, che è stata sagomata e fissata tramite viti di dimensioni 4 x 3.5 mm per ottenere il profilo dei ripples desiderato ($\lambda = 125$ mm e $\eta = 18.5$ mm). Successivamente è stato distribuito uno strato di colla omogeneo e sono stati realizzati i rilievi delle increspature con l'utilizzo di una sagoma in legno avente misure predeterminate. Infine sono state cosparse con la stessa tipologia di sabbia usata per i pannelli col fondo sabbioso in modo da riprodurre una appropriata scabrezza superficiale.

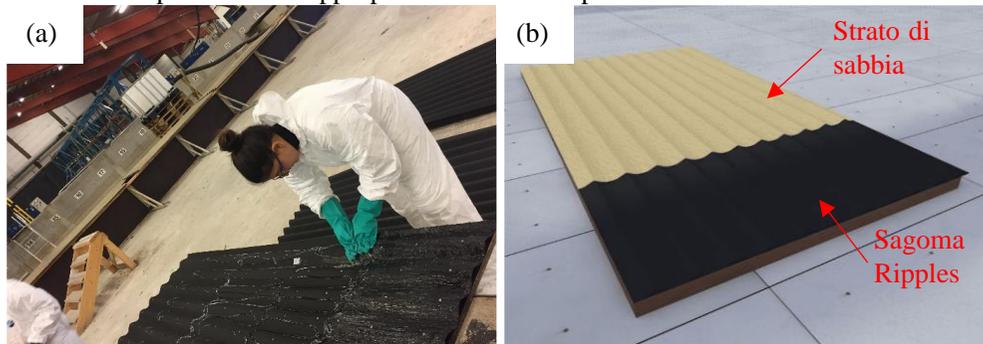


Figura 3.6 a) Realizzazione pannello di Ripples; b) rendering del pannello.

In Figura 3.7 (a-b-c) sono riportati i pannelli con le tre scabrezze. Inoltre per tutte e tre le scabrezze, per evitare che l'azione delle onde e della corrente potesse far muovere i pannelli, questi sono stati fissati al fondo mediante viti. Per il letto di ghiaia, per evitare turbolenze eccessive derivanti dal passaggio improvviso tra il fondo liscio della vasca e quello scabro costituito dai ciottoli e quindi per garantire un migliore sviluppo dello strato limite, dopo aver calcolato il numero di Shields (utilizzando il diametro minore, i numeri di Shield sono pari a $0.1 \div 0.5$), è stato posizionato uno strato sciolto di ghiaia al limite

dell'area costituita da pannelli in direzione della corrente (Figura 3.7 d). La disposizione delle pietre è stata effettuata in modo tale da ridurne gradualmente la densità man mano che ci si sposta verso le aree periferiche, partendo da una bassa densità e andando ad addensarsi avvicinandosi ai pannelli; tale distribuzione è stata estesa a monte verso l'inlet per una distanza di 2 m, a valle verso l'outlet per 0.5 m.



Figura 3.7 a) b) c) Esempio dei tre diversi pannelli utilizzati per il fondo. d) Disposizione delle pietre all'esterno dell'area del pannello.

3.4 Apparato sperimentale per lo studio dell'interazione di onde e correnti collineari

La campagna sperimentale per lo studio dell'interazione di onde e correnti collineari è stata effettuata presso il Laboratorio di Idraulica e Costruzioni Idrauliche del Dipartimento di Ingegneria di Messina. Tale laboratorio è dotato di un "tubo a U" costituito da un tunnel lungo 5 m a sezione rettangolare 0.4 x 0.6 m dove è possibile generare simultaneamente un moto oscillante, per mezzo di un pistone, e un moto permanente, prodotto da una pompa. L'impianto utilizzato è il modello H59 progettato dal personale del dipartimento e costruito dalla STEM ISI IMPIANTI (Figura 3.8). Il tunnel centrale a sezione rettangolare presenta fianchi in vetro di sicurezza multistrato. La carpenteria metallica a contatto con l'acqua è fatta di acciaio inossidabile.



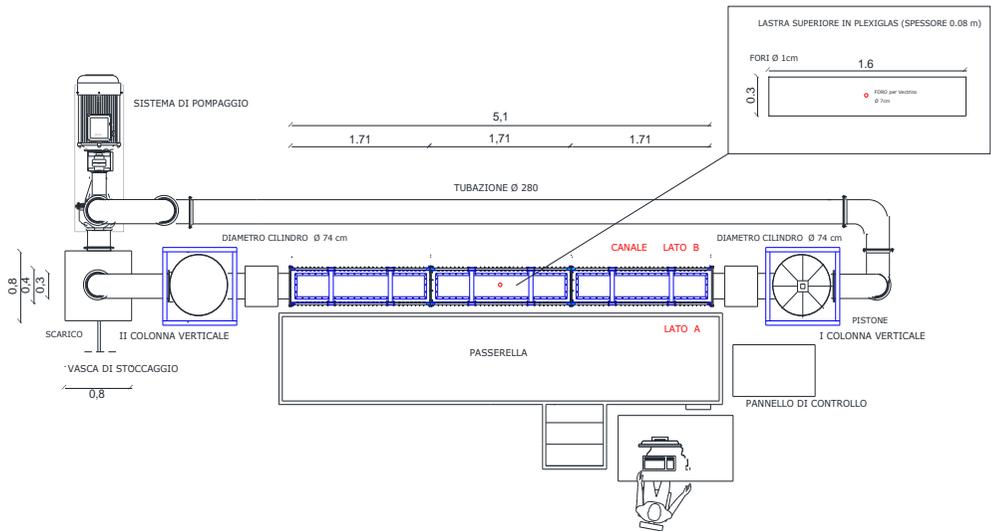
Figura 3.8 Apparato sperimentale “Tubo a U”.

In Figura 3.9 vengono riportati pianta e sezione dell'impianto.

La parte superiore del tunnel centrale come mostrato in pianta (Figura 3.9 a) è dotata di 3 aperture chiuse da 3 pannelli in plexiglass totalmente smontabili di dimensione 160 cm x 30 cm e spessore pari a 1 cm per permettere l'ispezione. Nella zona di prova l'altezza del tunnel è suddivisa in due parti, la prima è un bassofondo di 10 cm in cui è possibile inserire dei materiali sfusi (inerte di differente granulometria, ciottoli, ecc.), oppure dei pannelli dotati di diversa scabrezza, come difatti effettuato durante questa campagna sperimentale. La seconda parte di altezza pari a 50, cm è un volume dinamico dove scorre o oscilla la massa d'acqua. Le pareti laterali e il bassofondo completamente trasparenti in vetro temperato e stratificato, permettono una facile visione della massa d'acqua e di eventuali inerti posizionati nel bassofondo.

Alle due estremità del tunnel sono sistemate due sezioni di raddrizzamento del flusso costituite da pannelli estraibili per manutenzione o sostituzione. Queste due sezioni sono state inserite per ridurre il più possibile la turbolenza e rendere il flusso più omogeneo e rettilineo possibile su tutto il fronte di avanzamento. Le curve di raccordo tra le due colonne verticali e il tunnel orizzontale sono dotate di palette deflettrici, aventi lo scopo di deviare il flusso da perpendicolare, rispetto al canale di prova, ad assiale. In una colonna è alloggiato il pistone atto alla generazione del moto ondoso, l'altra colonna verticale, identica a quella contenente il pistone ma a superficie libera, è posta all'altra estremità del tunnel e serve ad accogliere la massa liquida che oscilla all'interno del tubo fino a 40 cm del bordo superiore (Figura 3.9 b).

(a)



(b)

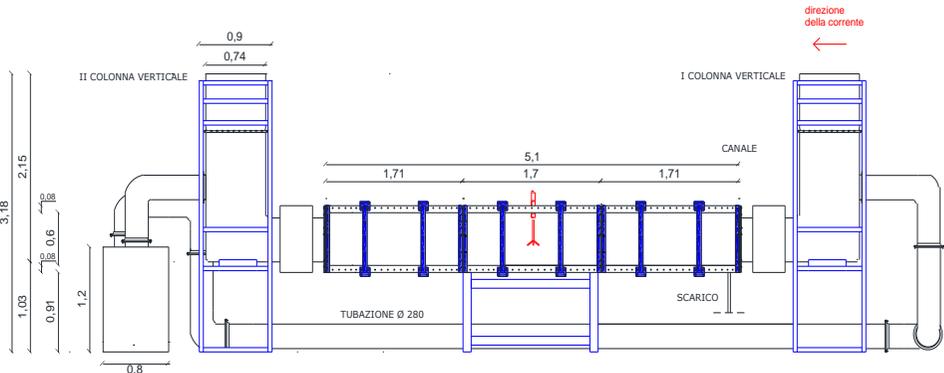


Figura 3.9 Impianto “tubo a U”. a) pianta; b) sezione.

Sia per la colonna contenente il pistone, sia per quella contenente la massa liquida l'altezza massima da terra è di 350 cm. Si riportano altre grandezze significative dell'impianto utilizzato:

- Diametro interno del cilindro: 0.74 m;
- Area interna del pistone: 0.43 m²;
- Spessore cilindro; 0.5 cm;
- area del canale: 0.24 m²;
- rapporto tra area del pistone e area del canale: 1.79;
- lunghezza passerella: 540 cm;
- larghezza passerella: 106 cm;
- altezza passerella: 78 cm.

3.4.1 Generazione delle Forzanti

Per la generazione del moto oscillante l'acqua viene mobilitata all'interno del tunnel tramite un piattello mosso per mezzo di un pistone idraulico (Figura 3.10 a) con sistema oleodinamico, provvisto di sensore di posizione per ottimizzare il movimento della colonna verticale. Il flusso è regolato da una valvola chiamata valvola proporzionale (Figura 3.10 b) che invia olio in pressione al pistone consentendo a quest'ultimo di spostarsi alternativamente dall'alto verso il basso e viceversa. Tramite un software di controllo (Labview), è possibile impostare le caratteristiche dell'oscillazione desiderata che sarà replicata dal sistema oleodinamico tramite un potenziometro. La forma d'onda impostata può essere modificata fino ad ottenere il moto oscillatorio voluto tramite le impostazioni del software di controllo (GefraN), andando a modificare diversi parametri come il tempo di derivazione o di integrazione del segnale generato in modo da ottenere segnale di input e di output pressoché coincidenti (Figura 3.10 c).

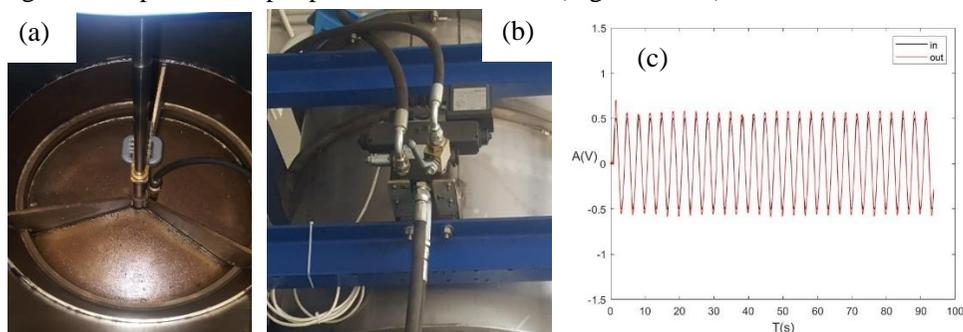


Figura 3.10 Generazione del moto oscillatorio. a) pistone; b) valvola proporzionale; c) segnale input e output del pistone ($a=0.5$ $f=0.3$).

Le condizioni estreme di funzionamento sono:

- minimo periodo dell'oscillazione: 2 s;
- massima ampiezza: 1 m;
- massima velocità di traslazione 1 m/s.

Come già accennato, al moto oscillante può essere sovrapposto o sostituito un moto permanente della massa d'acqua grazie a una pompa collegata ad un sistema di ricircolo a portata variabile tra 0 e 250l/s. Come si può notare in Figura 3.11 tale sistema è costituito da un circuito che comprende una pompa centrifuga a portata variabile tramite una valvola di regolazione manuale nel pannello di controllo, una sezione filtrante, una sezione di misura della portata, una tubazione di collegamento e due connessioni di ingresso e scarico.



Figura 3.11 Generazione moto permanente. a) pompa; b) pannello di controllo; c) curve caratteristiche fornite dal costruttore.

La pompa centrifuga è costituita da un sistema di palette calettate al motore elettrico su una girante, questa crea una depressione ed aspira acqua che entra dalla parte bassa in cui vi è l'ingresso fornendo quantità di moto a tutto il fluido. È stata collegata alla tubazione di aspirazione e di mandata attraverso un giunto a flangia; questa scelta è consigliata in quanto in caso di guasto è più facile la sostituzione, cosa non facilmente effettuabile in caso di collegamento tramite saldatura.

In Figura 3.11 vengono mostrate le curve caratteristiche che esprimono il legame tra la portata Q e la prevalenza \bar{H} a numero di giri costante per determinato diametro della condotta. Attraverso tali curve fornite dal costruttore, si possono tenere regimi di funzionamento diversi agendo semplicemente sulla manopola nel pannello di controllo che fa variare il numero dei giri. Il regime ottimale di funzionamento legato alla potenza della pompa si ottiene nella zona delimitata dai cerchi concentrici.

3.4.2 Preparazione dei fondi

Durante la campagna sono state effettuate due tipologie distinte di esperimenti: a fondo mobile e a fondo fisso. Nel primo caso, al fine di studiare il trasporto solido e soprattutto la formazione di forme di fondo in diverse condizioni idrodinamiche, si è disposto nel bassofondo del tunnel uno strato di 10 cm di sabbia, avente densità tale da consentire la formazione dei ripples ($d_{50}=0.125$ mm). Tale strato è stato opportunamente livellato prima di ogni prova per imporre una condizione iniziale di fondo piatto.

Per il caso di fondo fisso sono stati creati 3 diversi fondali al variare della scabrezza (Figura 3.12). In particolar modo, sono stati riprodotti un fondo con sabbia, un fondo con ghiaia e un fondo con ripples al fine di confrontare i valori di velocità e di scabrezza apparente al variare delle caratteristiche e della granulometria del materiale al fondo. Il primo pannello è stato realizzato incollando della sabbia avente d_{50} pari a 1.40 mm su un lamierino di dimensioni 1 m x 0.3 m. Il secondo fondale è stato ottenuto incollando ad un altro lamierino, di pari dimensioni, della ghiaia, precedentemente lavata, avente $D=16 \div 36$ mm e d_{50} pari a 25 mm. Entrambi i pannelli sono stati mantenuti solidali al fondo del tunnel per mezzo di calamite per evitare che l'azione delle onde e della corrente potesse esercitare su di essi un'azione di sollevamento.

Infine la terza tipologia di fondale è stata ottenuta modellando un pannello in pvc secondo un profilo avente le dimensioni caratteristiche dei ripples ($\lambda=8.7$ cm e $\eta=1.85$ cm), sul quale è stato distribuito uno strato di colla omogeneo, successivamente cosperso di sabbia avente $d_{50}=0.125$ mm in modo da ottenere una opportuna scabrezza superficiale. Successivamente tale pannello è stato incollato ad un lamierino di sostegno, irrigidito per mezzo di barre di ferro che evitavano il galleggiamento del fondale durante le prove.

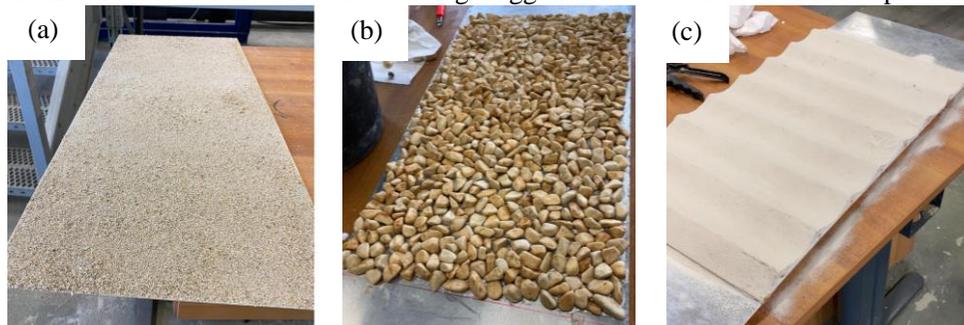


Figura 3.12 Fondi realizzati. a) sabbia; b) ghiaia; c) ripples.

3.5 Strumentazione adottata

Per l'esecuzione delle indagini di laboratorio nell'ambito dell'ingegneria costiera, vengono impiegati diversi tipi di strumenti di misura. Visti i fini del presente lavoro, appare utile descrivere gli strumenti utilizzati per la misurazione dell'elevazione del livello d'acqua a seguito dell'agitazione prodotta dai battitori e gli strumenti per la misura delle velocità, impiegati nelle presenti campagne sperimentali.

3.5.1 Sonde di Livello

L'innalzamento della superficie dell'acqua, può essere misurato da sonde di livello. Tra queste si richiamano qui quelle di tipo resistivo (o, meglio, conduttivo) o di tipo capacitivo. In entrambi i casi, l'elemento sensibile modifica la quantità di conduttanza o capacità mentre il livello d'acqua alla sonda aumenta o diminuisce, provocando così una variazione nell'erogazione di tensione. Il successo di queste sonde dipende dalla risposta rapida nell'output dovuta al cambiamento nell'elevazione dell'acqua. L'elemento sensibile di una sonda capacitiva è simile ad un condensatore coassiale. È costituito da un'asta (di circa 1.6 mm o 1/16 di pollice di diametro) di metallo (ad esempio acciaio inossidabile) isolata (ad esempio, teflon-rivestita). Il principio di funzionamento di questa sonda (Jamieson e Mansard, 1993) è che il filo agisce come un condensatore. Il nucleo del filo e l'acqua agiscono come le due piastre del condensatore e l'isolamento funge da dielettrico. Una tensione è generata dalla differenza tra quella nella parte superiore del cavo capacitivo e un filo di terra immerso. L'altezza dell'onda si ottiene misurando il tempo necessario al condensatore per raggiungere una determinata percentuale del suo valore completamente carico. Il tempo viene quindi correlato alla capacità e indirettamente al suo cambiamento in immersione. Il condensatore (sonda di livello) è eccitato con una tensione alternata. Viene prodotta un'uscita che è proporzionale al livello istantaneo dell'acqua.

Le sonde resistive, invece, sono costituite da una coppia di elettrodi tra loro paralleli realizzati in acciaio inossidabile e collegati ad un generatore di tensione. Poiché la corrente circolante tra gli elettrodi è proporzionale alla profondità di immersione, è possibile convertire il segnale in tensione in uscita dalle sonde in un segnale digitale che permetta di ricavare i parametri del moto ondoso. I fili conduttori che collegano gli elettrodi al generatore di corrente inizialmente non sono in contatto tra loro, quindi il circuito in una prima fase risulta essere aperto. Appena la sonda viene immersa in acqua il circuito si chiude e si instaura una differenza di potenziale misurata dal voltmetro che risulterà quindi proporzionale alla lunghezza della porzione di filo immersa e, conseguentemente, al livello idrico nel canale. Le sonde, quindi, rilevano istante per istante la variazione del livello dell'acqua dovuta al moto ondoso fornendo una misura in volt che attraverso una relazione lineare è possibile convertirla in unità metrica. Nonostante l'accuratezza della misura del livello dell'acqua con questo metodo risulta essere dell'ordine del decimo di millimetro risulta necessario calibrare le sonde all'inizio di ogni esperimento prima di iniziare con la sperimentazione effettiva.

3.5.2 Acoustic Doppler Velocimeter

La rilevazione della velocità all'interno della vasca può avvenire attraverso dei velocimetri.

Nel seguito si fa riferimento a misuratori acustici (ADV); questi appartengono alla speciale categoria degli strumenti 3D ad alta risoluzione e sono impiegati per studiare brusche fluttuazioni di velocità, sia in laboratorio che in campo. Questi strumenti sono costituiti da tre o più bracci che consentono di misurare, con un'alta frequenza di campionamento, le tre componenti di velocità in un punto. Il principio di funzionamento dei velocimetri è basato sull'effetto Doppler: lo strumento sfrutta tale effetto per misurare la velocità istantanea, trasmettendo un breve impulso sonoro registrando il suo eco e misurando la variazione di tono o frequenza dell'eco. I velocimetri sono caratterizzati da un volume di controllo che varia a seconda della tipologia di strumento; data l'elevata frequenza di campionamento oggi raggiunta, tali strumenti risultano ormai particolarmente adatti a rilevare qualunque fenomeno idrodinamico di interesse ingegneristico. Tuttavia, il volume di controllo può risultare troppo grande per misure di velocità all'interno dello strato limite generato al fondo di un'onda di gravità riprodotta in laboratorio.

Uno strumento che rientra nella categoria dei misuratori acustici di velocità è il Vectrino (Nortek, 2009). Si tratta di un velocimetro acustico ad alta risoluzione impiegato per misurare le tre componenti di velocità in acqua e che trova ampia applicazione. A differenza degli strumenti Doppler standard, il Vectrino è un sonar bistatico, il che significa che usa due sonde separate per la trasmissione e la ricezione (il sensore acustico ha un trasduttore di trasmissione e quattro trasduttori di ricezione).

Esistono due tipologie di Vectrino: Single Point che restituiscono un solo punto di misura (che nel caso down looking si trova più in basso dell'emettitore, e side looking dove il punto si misura è alla stessa quota dell'emettitore ma traslato orizzontalmente) e Profiler che restituiscono informazioni su un tratto di profilo verticale lungo 3 cm di misura (Figura 3.13). Il volume di campionamento si trova tra i 4 cm e i 5 cm lontano dal sensore per fornire misurazioni indisturbate a seconda della tipologia.

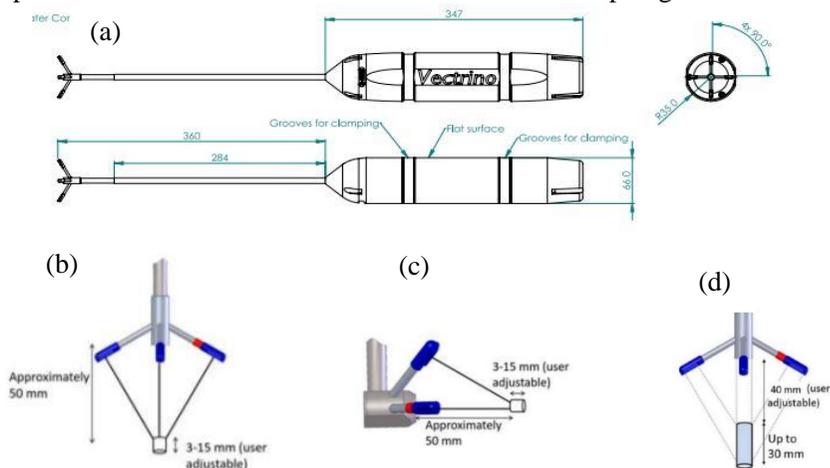


Figura 3.13 a) Schema del Vectrino b) down looking; c) side looking; d) profiler (da <http://www.nortek-es.com/lib/data-sheets/datasheet-vectrino-lab>).

I Vectrino della Nortek sono composti da un'asta in acciaio inossidabile, da quattro trasduttori di ricezione e da un trasduttore di trasmissione. L'asta in acciaio è collegata all'alloggiamento principale che trasmette i dati in ricezione al pc. Ciascuno dei

quattro trasduttori di ricezione è montato all'interno di un braccio del ricevitore. Il trasduttore di trasmissione si trova al centro della sonda collegato a un modulo elettronico.

Tra i limiti di tale strumentazione va messa in conto l'interferenza da impulso a impulso che aumenta a seconda del materiale usato come fondo, presentando maggiori problemi con materiali particolarmente duri (ghiaia, cemento, vetro, acciaio).

L'interferenza da impulso a impulso, è correlata alla separazione spaziale tra le coppie di impulsi trasmesse dal velocimetro. Per essere più precisi, si verifica un punto debole quando il primo ping colpisce il fondo e il segnale riflesso del primo ping raggiunge il volume di campionamento nello stesso momento in cui il secondo impulso passa attraverso il volume di campionamento. La posizione è quindi deterministica e può essere calcolata e corretta. Se il fondale è ben definito (es. Sabbia) l'estensione non è maggiore dell'impulso di trasmissione o di circa 1 cm. Se il fondo è dotato di elevata scabrezza, l'estensione verticale può essere maggiore.

Per risolvere questo problema una volta individuata la zona di interferenza ("Weak Spots") durante la prova basta modificare il Velocity range adattando al proprio caso studio i parametri che la casa produttrice del Vectrino fornisce per la risoluzione di tale problema riportati in Tabella 3.II:

Tabella 3.II Weak Spots Vectrino

Velocity Range (m/s)	Weak Spots (cm)	
4	2	5
2.5	3	10
1	5	12
0.3	10	23
0.1	23	45
0.03	38	75

3.5.3 Telecamera

Durante l'esecuzione degli esperimenti a fondo mobile all'interno del "Tubo a U" per le indagini ottiche dell'evoluzione delle forme di fondo è stata utilizzata in laboratorio la telecamera Sony FDR-AX53 da 16.6 Megapixel, in grado di registrare video con una risoluzione in 4k Ultra HD (Figura 3.14).



Figura 3.14 Telecamera 4k. <https://www.sony.it/electronics/videocamere-handycam/fdr-ax53>

3.5.4 Disposizione della strumentazione adottata all'interno della Shallow Water Basin

Durante la campagna sperimentale di onde e correnti ortogonali svoltasi al DHI, l'elevazione della superficie libera è stata misurata mediante l'utilizzato di 24 sonde di livello resistive, per le misure di velocità invece sono stati usati 5 Vetrino Single Point (VS) e 1 Profiler (VP). La disposizione dei pannelli nella vasca e il posizionamento degli strumenti è mostrata in Figura 3.15.

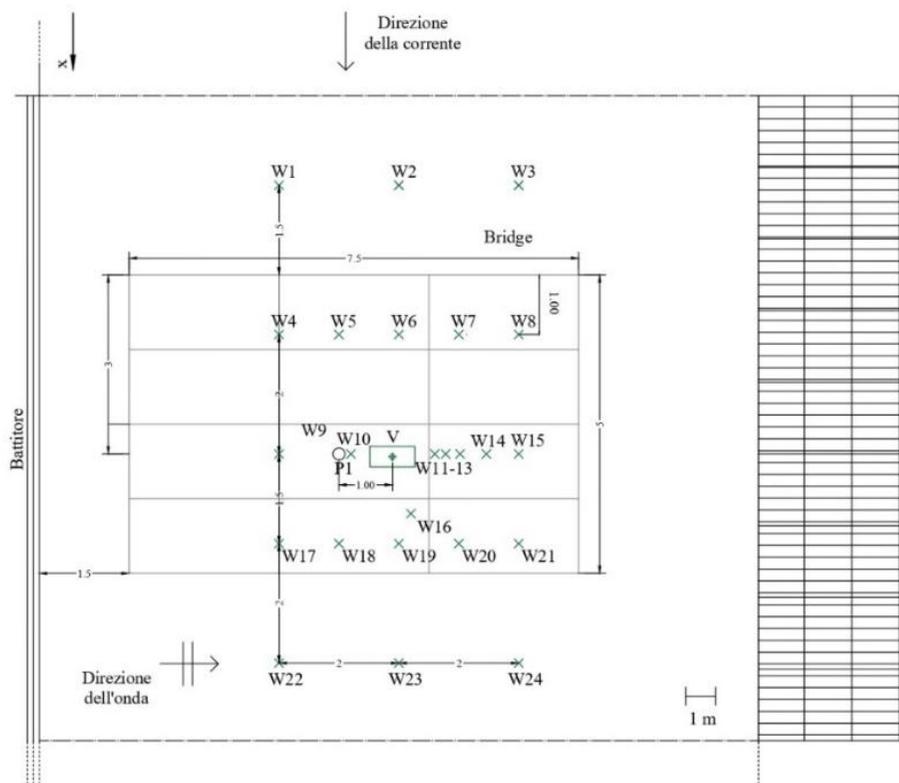


Figura 3.15 Disposizione planimetrica della strumentazione di misura all'interno della vasca.

3.5.4.1 Calibrazione e Posizionamento Sonde di Livello

Le 24 sonde di livello resistive sono state disposte in tutta l'area d'interesse, in particolare 18 di esse all'interno della zona caratterizzata da scabrezza assegnata e 6 fuori da essa. Tali strumenti sono stati mantenuti nella stessa posizione durante l'intera campagna sperimentale a prescindere dalla scabrezza al fondo indagata. Cinque misuratori d'onda sono stati posizionati a una distanza adeguata lungo la stessa coordinata y come mostrato in Figura 3.16 per misurare la riflessione dell'onda all'interno del serbatoio secondo il metodo di Faraci et al. (2015).

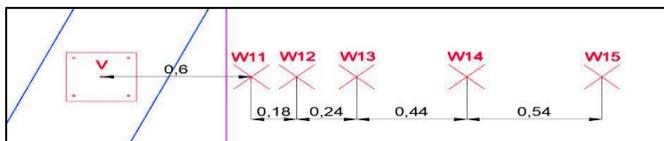


Figura 3.16 Distanze relative tra i sensori atti allo studio della riflessione secondo Faraci et al. (2015)

La posizione esatta di ciascuna sonda è indicata nella Tabella 3.III.

Tabella 3.III Disposizione delle sonde di livello.

Sonda	x (m)	y (m)	Sonda	x (m)	y (m)
WG1	13.5	4	WG13	18	7.02
WG2	13.5	6	WG14	18	7.46
WG3	13.5	8	WG15	18	8
WG4	16	4	WG16	19	6.2
WG5	16	5	WG17	19.5	4
WG6	16	6	WG18	19.5	5
WG7	16	7	WG19	19.5	6
WG8	16	8	WG20	19.5	7
WG9	18	4	WG21	19.5	8
WG10	18	5.02	WG22	21.5	4
WG11	18	6.6	WG23	21.5	6
WG12	18	6.78	WG24	21.5	8

Poiché le sonde sono sensibili alla variazione della temperatura dell'acqua è necessario calibrarle giornalmente per ottenere risultati accurati; la calibrazione viene condotta utilizzando un secchio schermato (vedi Figura 3.17a)

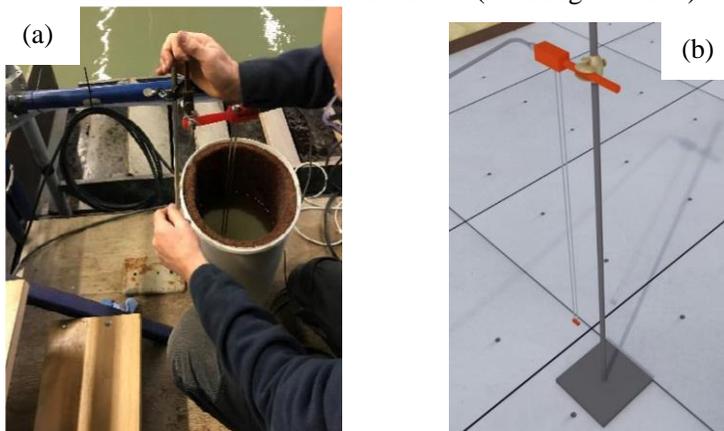


Figura 3.17 Sonde di Livello. a) calibrazione sonda; b) rendering sonda.

3.5.4.2 Tipologia e Disposizione dei Vectrino al variare del fondo

Per la rilevazione delle velocità in prossimità del fondo, si sono utilizzati 5 Vectrino Single Point e un Vectrino Profiler. La disposizione dei Vectrino è stata modificata in funzione della scabrezza, in particolare la disposizione per le prove su sabbia

e ghiaia è riportata in Figura 3.18, mentre la disposizione nel caso di fondo con ripples è riportata in Figura 3.19.

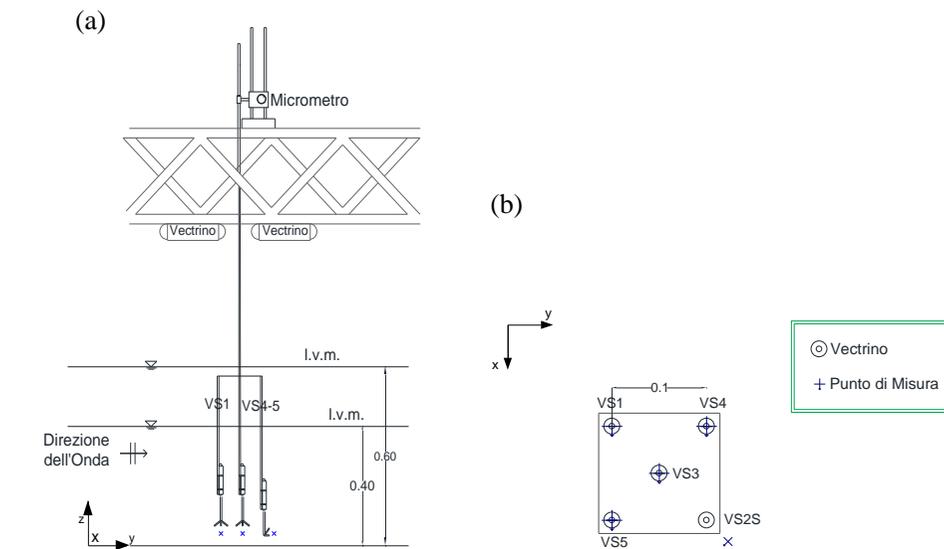


Figura 3.18 Disposizione dei Vectrino per sabbia e ghiaia. a) sezione; b) pianta.

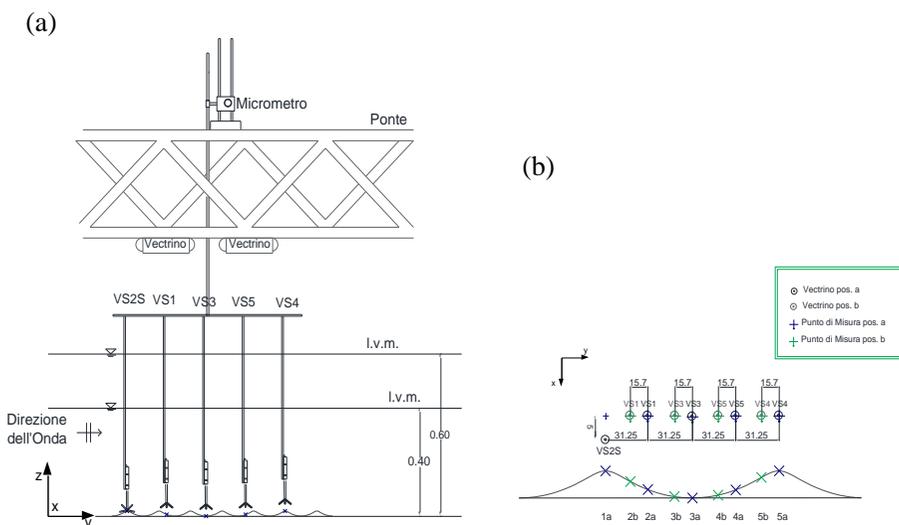


Figura 3.19 Disposizione dei Vectrino per fondo con ripples. a) sezione del trolley con Vectrini; b) Posizione dei Vectrini lungo il profilo del ripple per entrambe le configurazioni del supporto.

Più specificamente, quattro Vectrino down looking, un Vectrino side looking e un Vectrino profiler, sono stati utilizzati per acquisire i profili di velocità sopra il fondo scabro nell'area di interazione onde-correnti. Nelle prove con sabbia e ghiaia, i Vectrino single point sono stati disposti in croce ai quattro vertici e al centro di un quadrato solidale alla struttura portante come mostrato in Figura 3.18 e Figura 3.20.

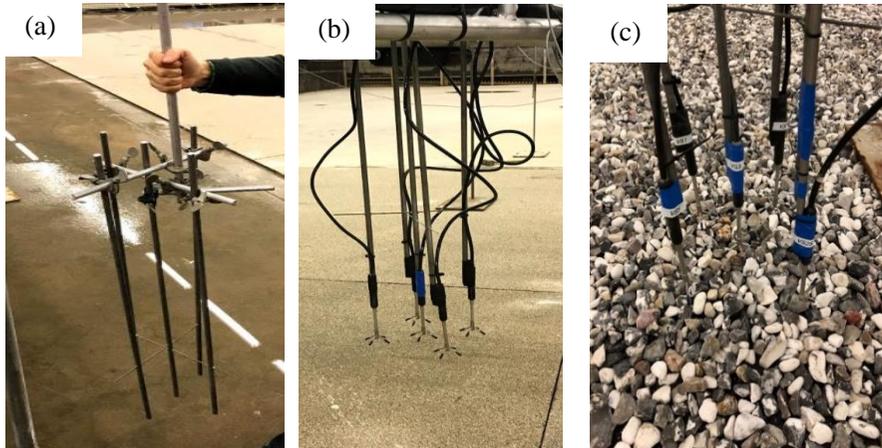


Figura 3.20 a) Struttura portante per disposizione Vectrino; b) disposizione Vectrini su sabbia; c) disposizione Vectrini su ghiaia.

Nelle prove con ripples, i Vectrino sono stati disposti lungo uno stesso allineamento attraverso l'uso di un supporto. Inoltre, per ottenere più profili di velocità lungo il profilo dei ripples, sono state utilizzate due differenti posizioni degli strumenti (posizione a e b) come mostrato in Figura 3.19 b. La seconda configurazione è stata ottenuta traslando il supporto di $1/8$ di lunghezza d'onda del ripple rispetto alla configurazione di partenza. La disposizione dei Vectrino lungo i ripples è riportata nella Figura 3.21. La Tabella 3.IV, invece, riporta le coordinate dei punti in cui sono stati posizionati i Vectrino, nel caso di fondo con sabbia/ghiaia e con ripples.

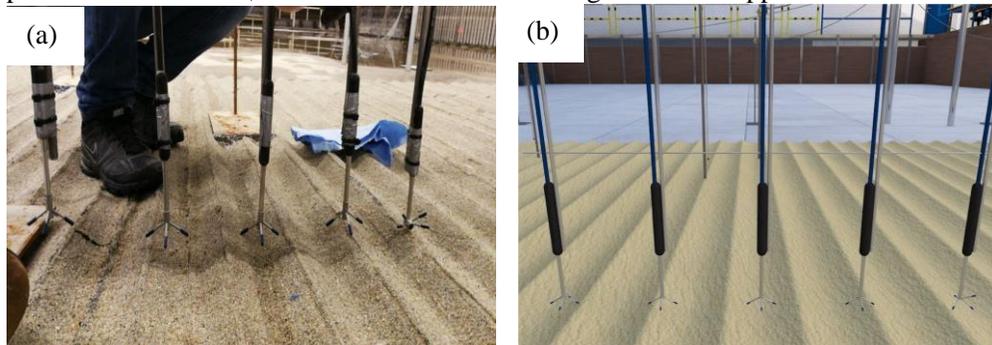


Figura 3.21 Disposizione in linea dei Vectrini su fondo con ripples. a) foto; b) render 3d.

Tabella 3.IV Posizione Vectrini per fondo con sabbia, ghiaia e ripples.

Sabbia e Ghiaia			Ripples		
Vectrino	x (m)	y (m)	Vectrino	x (m)	y (m)
VP1	18	5	VP1	18	5
VS1	19	6	VS1	18	5.84
VS2	17.88	5.88	VS2	18.05	5.69
VS3	18	5.88	VS3	18	6
VS4	18	6	VS4	18	6.31
VS5	18.12	6	VS5	18	6.16

3.5.5 Disposizione della strumentazione adottata all'interno del "Tubo a U"

Per la campagna di interazione collineare tra onde e correnti ("Tubo a U", Laboratorio di Idraulica e Costruzione Idrauliche di Messina) le misure di velocità sono state effettuate mediante l'uso di un Vectrino Profiler inserito in un pannello opportunamente costruito con le caratteristiche necessarie per l'inserimento di tale strumento di misura. Difatti nel pannello è stato praticato un foro avente diametro leggermente più grande del diametro del Vectrino (vedi particolare Figura 3.9 b) il quale a sua volta è stato rivestito di una guarnizione di spessore 0.5 cm atta a mantenere il sistema in pressione ed evitare fuoriuscita di acqua (Figura 3.22) tale però da consentire la traslazione dello strumento ed effettuare le misure lungo la colonna d'acqua; rispettando i limiti operativi dell'apparecchiatura sperimentale è stato possibile effettuare lungo la verticale un'acquisizione di un profilo di altezza compresa tra 13 e 15 cm, in funzione della tipologia di fondale indagato.

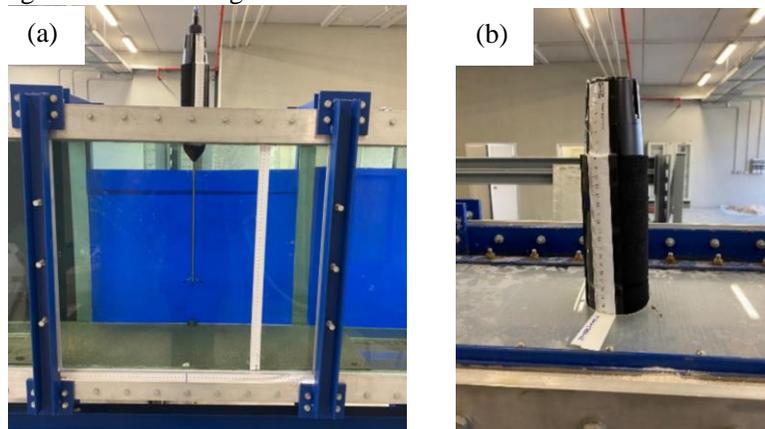


Figura 3.22 Strumentazione adottata nel "tubo a U". a) posizionamento dello strumento; b) particolare dello strumento tarato per le varie elevazioni di misura.

Capitolo 4

Campagna sperimentale e risultati ottenuti nel caso di onde e correnti ortogonali

4.1 Generalità

La campagna sperimentale effettuata con onde e correnti ortogonali è stata condotta presso il DHI Water and Environment (Danimarca), ed è stata finanziata dalla Comunità Europea attraverso il programma Hydralab + More than Water, attraverso l'accesso alle principali infrastrutture europee.

La scelta dell'apparecchiatura su cui è stata condotta la sperimentazione è di fondamentale importanza in quanto ha consentito di riprodurre condizioni idrodinamiche corrispondenti sia al regime dominato dalle onde o wave dominated (WD) che quello dominato dalla corrente o current dominated (CD). Infatti, in precedenza esperimenti di interazione tra onde e correnti erano già stati eseguiti presso l'Università di Catania in condizioni wave dominated, osservando che quando onde e correnti interagiscono ortogonalmente su letti di diversa scabrezza (sabbia, ghiaia, ripples) si verifica una modifica dei profili di velocità media e una variazione degli sforzi tangenziali al fondo. A causa delle specifiche limitazioni dell'apparecchiatura utilizzata presso l'Università di Catania, l'area di misurazione e i fattori di scala erano piuttosto piccoli a causa dei vincoli geometrici del canale (18 m di lunghezza, 4 m di larghezza).

Con il ricorso al bacino del DHI, grazie alla possibilità di riprodurre periodi più lunghi, sono state esplorate come già accennato sia condizioni dominate dalle onde che dalla corrente (U_c/U_0 compreso tra 0.65 e 4.01 circa essendo U_c la velocità target della corrente, U_0 la velocità orbitale target dell'onda).

Nel presente capitolo verranno illustrati gli esperimenti preliminari e quelli condotti durante la campagna sperimentale, durata circa 2 mesi, (paragrafo 4.2) nonché i risultati delle analisi che sono state effettuate con particolare focus sullo studio del campo di moto medio e della vorticità sul letto con ripples confrontando prove di sola onda e prove di onda più corrente al fine di mostrare quali variazioni si verificano quando la corrente si sovrappone alle onde sia all'interno dello strato limite che allontanandosi dal letto al variare dei parametri idrodinamici. Alcune delle prove più significative per il caso di fondo con ripples verranno confrontate, a parità di condizioni idrodinamiche, con i risultati di prove effettuate sulle altre due scabrezze (sabbia e ghiaia).

4.2 Campagna Condotta

4.2.1 Esperimenti Preliminari

Sono state effettuate prove preliminari, su fondo piano in cls, per definire la risposta idrodinamica della vasca in presenza di onde e correnti. Innanzitutto è stato effettuato un test per identificare la presenza di eventuali effetti di circolazioni secondarie all'interno della vasca. Una volta impostata la profondità dell'acqua $d=0.4$ m e attivate le pompe di ricircolo, è stato utilizzato uno sciame di particelle galleggianti eterogenee come tracciante, in grado di definire le traiettorie superficiali della corrente che scorre nella vasca (vedi Figura 4.1).

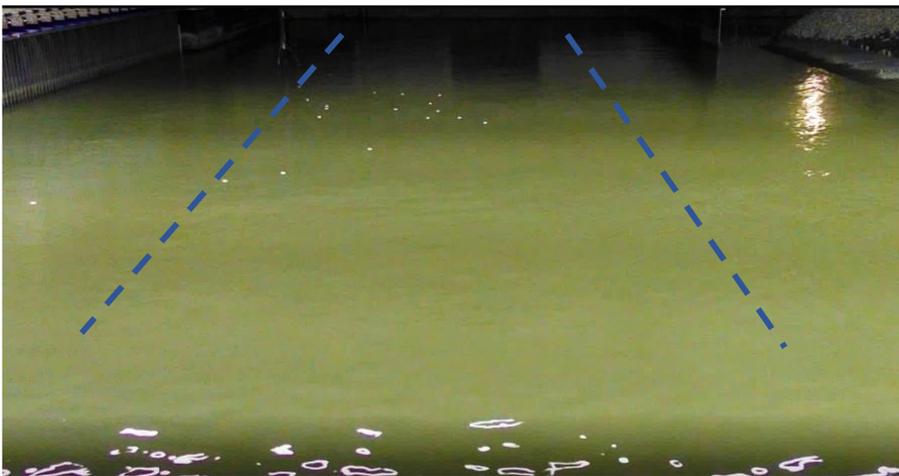


Figura 4.1 Prova con tracciante

Per mezzo di un Vectrino Single Point posto alla distanza di circa 10 cm dal fondo, è stata effettuata una mappatura di flusso dell'intera vasca, al fine di poter identificare in quale sottozona della stessa, la corrente poteva essere caratterizzata da direzione e intensità di flusso costanti, al fine di scegliere al meglio la posizione della strumentazione di misura durante l'intera campagna sperimentale. Le caratteristiche della corrente sono le stesse del test eseguito con i traccianti. Anche per queste prove il sistema di riferimento è rimasto invariato e la Tabella 4.I mostra le coordinate x e y dei punti di misurazione della velocità e le velocità medie misurate V_x e V_y rispettivamente nelle direzioni x e y . La coordinata z del punto di misurazione della velocità dal basso è costante

ed è come già osservato sempre uguale a 0.1 m. In corrispondenza di ogni punto di misura abbiamo scelto di acquisire la velocità del flusso per un intervallo di tempo di 3 minuti.

Tabella 4.I Coordinate e Velocità misurate per esperimenti preliminari di sola corrente.

<i>Test</i>	<i>x [m]</i>	<i>y[m]</i>	<i>V_x [m·s⁻¹]</i>	<i>V_y [m·s⁻¹]</i>
1	5	6	0.37	-0.12
2	10	6	0.38	-0.03
3	15	6	0.34	0
4	20	6	0.35	0
5	25	6	0.36	0.03
6	30	6	0.33	0.06
7	30	8.5	0.17	0.04
8	25	8.5	0.14	0.02
9	20	8.5	0.1	0.01
10	15	8.5	0.12	0.02
11	15	3.5	0.43	-0.01
12	20	3.5	0.4	0.03
13	25	3.5	0.39	-0.01
14	30	3.5	0.34	0.07

Un altro test di mappatura è stato effettuato negli stessi punti ma con la contemporanea presenza di onde e correnti ($d=0.4\text{m}$, $H=0.12\text{m}$, $T=2\text{s}$ e $U_c=0.21\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) per un tempo di acquisizione $t=7\text{min}$. (Tabella 4.II)

Tabella 4.II Coordinate e Velocità misurate per esperimenti preliminari in condizione di onde e correnti.

<i>Test</i>	<i>x [m]</i>	<i>y[m]</i>	<i>V_x [m·s⁻¹]</i>	<i>V_y [m·s⁻¹]</i>
15	30	3.5	0.32	0.05
16	30	6	0.34	0.07
17	30	8.5	0.22	0.05
18	25	8.5	0.18	0.02
19	25	6	0.34	0.06
20	25	3.5	0.37	0.00
21	20	3.5	0.41	0.00
22	20	6	0.36	0.01
23	20	8.5	0.1	0.01
24	15	8.5	0.05	0.01
25	15	6	0.38	0.00
26	15	3.5	0.44	0.00

Infine è stata eseguita una prova in corrispondenza delle coordinate coincidenti con il Test 22 con tempo di acquisizione pari a 32 min al fine di verificare se nel corso della prova ci fosse qualche variazione delle caratteristiche idrodinamiche sia dell'onda che della corrente.

4.2.1.1 Risultati degli esperimenti preliminari e discussione

I risultati della campagna di misura preliminare sono riportati in Figura 4.2, dove è rappresentata la distribuzione della velocità media in direzione x e y (U_x , U_y) unitamente alla sua deviazione standard ($std(U_x)$, $std(U_y)$).

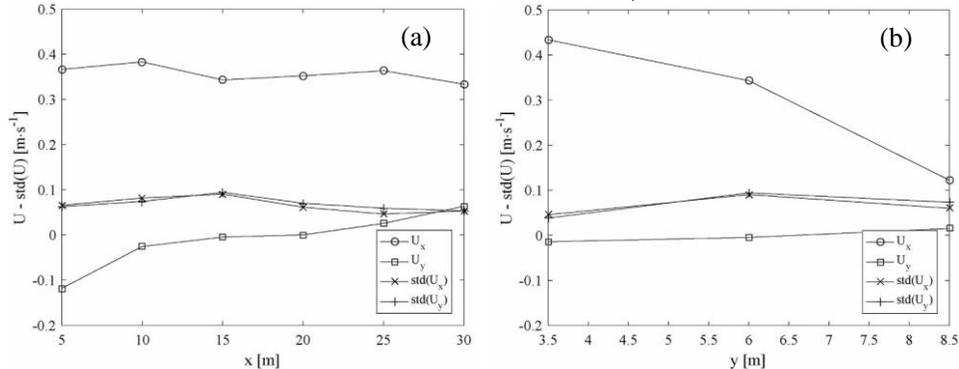


Figura 4.2 Misure preliminari di Velocità per il caso di sola corrente $U_c=0.21 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. a) direzione x ($y=6\text{m}$); b) direzione y ($x=20\text{m}$)

Dai dati riportati in Figura 4.2 è possibile osservare come la velocità, sia lungo la direzione della corrente x che lungo y , in mezzeria si mantenga approssimativamente costante per quasi tutta la lunghezza della vasca, e più in particolare la corrente si attesti, alla quota z considerata, su valori prossimi a circa $0.35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ tra i 15 e i 25 m dall'inlet. Viceversa, lungo la direzione di propagazione delle onde si verifica un decremento sostanziale della velocità U_x in direzione onshore. Ciò è essenzialmente dovuto alla presenza del bacino di dissipazione disposto a tergo degli assorbitori, che rallenta fortemente il flusso a partire dalla mezzeria stessa.

Infine in Figura 4.3 è riportato, nel caso della prova di lunga durata condotta con onde e correnti sovrapposte, l'andamento sia delle onde di superficie, che delle velocità V_y . In particolare ciascuna onda di superficie (Figura 4.3a) è stata separata e rappresentata utilizzando una scala cromatica dal blu al giallo a seconda dell'intervallo temporale di acquisizione; la sovrapposizione cromatica mostra l'assenza di qualunque trend nell'arco temporale investigato. Allo stesso modo, per escludere la possibilità di tendenze temporali, a partire dalle velocità V_y (Figura 4.3b) è stata calcolata, utilizzando una finestra temporale pari ad un periodo d'onda, la media mobile, la quale mostra l'assenza di trend per tutta la durata della prova.

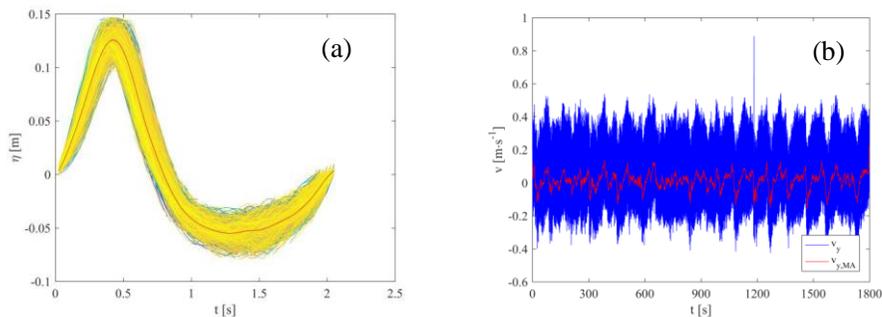


Figura 4.3 Risultati prova di lunga durata. a) media d'insieme dell'onda di superficie; b) media mobile e andamento della velocità lungo la direzione dell'onda.

I risultati di questi test preliminari ci hanno consentito di individuare la posizione ottimale del punto di misura per le indagini da investigare durante la campagna inerenti l'idrodinamica generata dalla presenza di onde e correnti su fondali scabri. Difatti si è deciso di posizionare la strumentazione atta all'acquisizione dei profili di velocità in prossimità del punto di coordinate $x=18.5\text{m}$ e $y=16\text{m}$ (vedi Tabella 3.IV).

4.2.2 Esperimenti Condotti

Durante la campagna sperimentale, al variare della scabrezza del fondo sono state effettuate prove di sola corrente (Current Only, CO), prove di sole onde (Wave Only, WO) e prove di onde e correnti ortogonali (Wave plus Current, WC).

Durante le prove sono state fatte variare la profondità d'acqua d (m), il periodo T (s), e l'altezza d'onda H (m). Sono state scelte due profondità d'acqua ($d=0.4$ m e $d=0.6$ m), due periodi ($T=1$ s e $T=2$ s) e 4 altezze d'onda ($H=0.18$ m, $H=0.12$ m, $H=0.08$ m e $H=0.05$ m).

Per il fondo con sabbia e ghiaia sono state effettuate due prove di sola corrente, otto di sola onda e otto di onde e correnti (2CO, 8WO, 8WC) come riportato nella Tabella 4.III.

Tabella 4.III Parametri idrodinamici adottati durante la campagna per le prove su fondo con sabbia.

<i>Sabbia</i>					<i>Ghiaia</i>				
<i>Run</i>	<i>Tipo</i>	<i>d [m]</i>	<i>T [s]</i>	<i>H [m]</i>	<i>Run</i>	<i>Tipo</i>	<i>d [m]</i>	<i>T [s]</i>	<i>H [m]</i>
1	CO	0.4	-	-	19	CO	0.6	-	-
2	WO	0.4	2	0.18	20	WC	0.6	1	0.05
3	WO	0.4	2	0.12	21	WC	0.6	1	0.08
4	WO	0.4	2	0.08	22	WC	0.6	2	0.08
5	WO	0.4	1	0.08	23	WC	0.6	2	0.12
6	WC	0.4	2	0.18	24	WO	0.6	1	0.05
7	WC	0.4	2	0.12	25	WO	0.6	1	0.08
8	WC	0.4	2	0.08	26	WO	0.6	2	0.08
9	WC	0.4	1	0.08	27	WO	0.6	2	0.12
10	CO	0.6	-	-	28	WC	0.4	1	0.05
11	WC	0.6	2	0.08	29	WO	0.4	2	0.08
12	WC	0.6	2	0.12	30	WO	0.4	1	0.08
13	WC	0.6	2	0.18	31	WO	0.4	1	0.05
14	WC	0.6	1	0.08	32	CO	0.4	-	-
15	WO	0.6	2	0.08	33	WC	0.4	2	0.08
16	WO	0.6	1	0.08	34	WC	0.4	2	0.12
17	WO	0.6	2	0.12	35	WC	0.4	1	0.08
18	WO	0.6	2	0.18	36	WO	0.4	2	0.12

Sono state invece effettuate 31 prove per il caso RB. In particolare, 18 prove per la prima posizione del carrello (Run_a), 2 delle quali erano di sola corrente (CO), 8 di sole onde (WO) e 8 di onde e correnti (WC), e 13 per la seconda posizione del carrello (Run_b), di cui 5 di sole onde (WO), 2 di sola corrente (CO) e 6 di onde e correnti (WC) (vedi Tabella 4.IV).

Capitolo 4 - Campagna sperimentale e risultati ottenuti nel caso di onde e correnti ortogonali

Per ogni Run al fine di avere informazioni sull'intero profilo di velocità, sono stati acquisiti i dati in 16 punti di misura lungo la colonna d'acqua, con maggiore precisione vicino al fondo e una maggiore spaziatura nei punti superiori come mostrato in Tabella 4.V per entrambe le tipologie di Vectrino. Il range di velocità di tutti gli strumenti è stato modificato nel corso delle prove per una qualità ottimale del segnale; inoltre è stata impostata una frequenza di acquisizione pari a 100 o 200Hz e un volume di campionamento di 4, 7 o 8.5mm al variare delle prove ciò sempre al fine di ottimizzare la qualità del segnale misurato. I tempi di acquisizione sono stati scelti, a seguito dei risultati delle prove preliminari, per un tempo corrispondente a 150 periodi delle onde superficiali in modo tale da poter contare su un campione sufficientemente esteso al fine di calcolare i parametri statistici più significativi. In particolare sono stati acquisiti 7 minuti ad elevazione per prove con periodo d'onda di 2s e 4 minuti per prove con periodo d'onda di 1s. Il primo minuto di ogni test è stato tagliato per evitare di considerare processi non ancora a regime.

Tabella 4.IV Parametri idrodinamici adottati durante la campagna per le prove su fondo con ripples (Run_a e Run_b relativi alle due configurazioni del supporto).

<i>Ripples</i>					
Run_a	Run_b	Tipo	d [m]	T [s]	H [m]
37	65	WO	0.4	1	0.05
38	62	WC	0.4	1	0.05
39	-	WC	0.4	2	0.08
40	63	CO	0.4	-	-
41	61	WC	0.4	2	0.12
42	64	WC	0.4	1	0.08
43	67	WO	0.4	1	0.08
44	-	WO	0.4	2	0.08
45	66	WO	0.4	2	0.12
46	56	WO	0.6	2	0.08
47	-	WO	0.6	2	0.12
48	-	WO	0.6	1	0.08
49	55	WO	0.6	1	0.05
50	-	WC	0.6	2	0.08
51	59	CO	0.6	-	-
52	58-60	WC	0.6	2	0.12
53	-	WC	0.6	1	0.08
54	57	WC	0.6	1	0.05

Tabella 4.V Esempio dei parametri di settaggio per esperimenti condotti su una generica Run (Run 60).

Run	Test onda	Distanza dal Fondo	Velocity Range [m/s]					Velocity Range [m/s]
		mm	VS1	VS2S	VS3	VS4	VS5	VP
60_01	T0943	1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5
60_02	T0944	2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5
60_03	T0945	3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5
60_04	T0946	5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5
60_05	T0947	8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5
60_06	T0948	11	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	1
60_07	T0949	15	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	1
60_08	T0950	20	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	1
60_09	T0951	25	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	1
60_10	T0952	35	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	1
60_11	T0953	50	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	1
60_12	T0954	75	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	1
60_13	T0955	120	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	1
60_14	T0956	150	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	1
60_15	T0957	200	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	1
60_16	T0958	250	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	1

4.3 Analisi dei risultati

In questo paragrafo vengono riportati i principali risultati ottenuti nell'analisi dei dati acquisiti dalle sonde di livello e dai misuratori acustici di velocità. Questi ultimi in particolare hanno consentito di determinare per via indiretta gli sforzi tangenziali al fondo attraverso l'indagine dei profili logaritmici di velocità.

4.3.1 Oscillazione del pelo libero e analisi di riflessione

L'elevazione della superficie libera durante la campagna WINGS è stata misurata per mezzo di 24 sonde resistive, aventi frequenza di acquisizione pari a 40 Hz, disposte sull'intera area di misurazione all'interno della vasca.

Per tutte le prove si sono effettuate analisi relative alle altezze d'onda misurate calcolando l'altezza media (H_m) scegliendo come sonda di riferimento la sonda 11, essendo quest'ultima disposta nella parte centrale dell'area di propagazione delle forzanti. Al fine di far comprendere quali siano gli effetti della corrente sull'altezza d'onda H vengono riportate, a titolo di esempio, e messe a confronto due prove, una di sola onda (Run 44) e una di onda più corrente (Run 39) aventi gli stessi parametri idrodinamici, in presenza di fondo con ripples con le seguenti caratteristiche: $d=0.4m$, $T=2s$ e $H=0.08m$.

Per il confronto fra le due prove si sono scelti i dati acquisiti da tre sonde, in corrispondenza della medesima elevazione del Vetrino, e disposte lungo un allineamento parallelo all'asse x centrate rispetto all'area di propagazione della corrente. Più precisamente si sono esaminate le sonde WG2, WG11 ed WG23 (si veda la Figura 3.15). La sonda 2 e la sonda 23 si trovano al di fuori della zona caratterizzata da scabrezza, mentre la sonda 11 si trova al suo interno (in prossimità del centro). Le sonde sono tutte e tre allineate, pertanto sono poste alla medesima distanza dai battitori e dagli assorbitori. Considerato poi il verso del flusso di corrente, le sonde vengono investite nell'ordine 2, 11, 23.

Capitolo 4 - Campagna sperimentale e risultati ottenuti nel caso di onde e correnti ortogonali

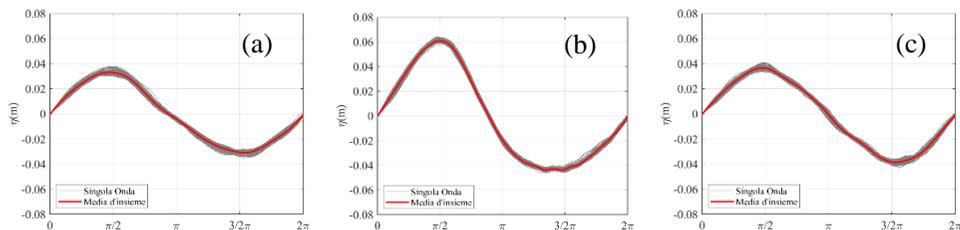


Figura 4.4 Analisi dell'altezza d'onda per la prova di sola onda (Run 44, WO, $d=0.4$ m, $T=2$ s, $H=0.08$ m). a) Sonda WG2; b) Sonda WG11; c) Sonda WG23.

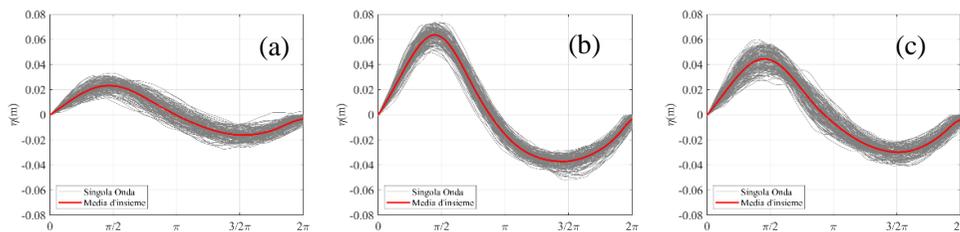


Figura 4.5 Analisi dell'altezza d'onda per la prova di onde e correnti (Run 39, WC, $d=0.4$ m, $T=2$ s, $H=0.08$ m $U_c=0.21$ m·s⁻¹). a) Sonda WG2; b) Sonda WG11; c) Sonda WG23.

Osservando la Figura 4.4 e la Figura 4.5 è possibile individuare le serie temporali dell'elevazione dell'acqua η (rappresentate in grigio) che sono state utilizzate per ottenere l'altezza d'onda media misurata H_m ottenuta come il $\max(\hat{\eta}) - \min(\hat{\eta})$ avendo indicato con $\hat{\eta}$ la media d'insieme tracciata nelle figure in rosso.

Analizzando l'altezza d'onda misurata dalla WG2 (Figura 4.4a e Figura 4.5a) e come riportato in Tabella 4.VI per entrambe le condizioni di moto si osserva una riduzione dell'altezza d'onda rispetto al valore target imposto al battitore, che risulta essere ancora più accentuato in presenza di corrente. Dal confronto fra le due condizioni (WO e WC), si può dedurre che le modifiche subite dall'altezza d'onda H sono imputabili sia all'influenza della corrente sia alla posizione della sonda che è disposta al di fuori dell'area caratterizzata dai ripples e al limite del generatore.

La sonda centrale (WG11) restituisce nelle due situazioni di presenza e assenza di corrente, un'altezza d'onda incrementata rispetto al valore target di una quantità simile per entrambe le condizioni WO e WC. Pare quindi che l'influenza della corrente sulle onde, nell'area con ripples, non produca significative variazioni in termini di altezza d'onda.

Infine osservando la sonda WG23 posta fuori l'area scabra si osserva che l'altezza d'onda, nella Run 44 di WO, ha subito una modesta variazione (in decremento) rispetto al valore di prova. Per quanto riguarda la prova in presenza di corrente, si nota che l'altezza d'onda è pari al valore di prova restituendo un valore misurato coincidente al valore di input. Si può dedurre quindi che l'altezza d'onda misurata in tale sonda non risenta particolarmente della presenza della corrente trovandosi ad una distanza di oltre 20 m dall'inlet. In Tabella 4.VI vengono riportati i valori misurati dell'altezza media H_m per la condizione di sola onda e di onde e correnti nelle tre sonde analizzate con l'errore in percentuale (ε_r) calcolato rispetto al valore target imposto al battitore.

Tabella 4.VI Altezza media misurata nelle 3 sonde per la prova di sola onda e per la prova di onde e correnti con l'errore percentuale rispetto al valore di altezza target imposto al battitore.

	Run 44 (WO)		Run 39 (WC)	
	$H_m [m]$	$\varepsilon_r (\%)$	$H_m [m]$	$\varepsilon_r (\%)$
WG2	0.039	-51	0.06	-25
WG11	0.101	26	0.11	37.5
WG23	0.074	-8	0.08	0

Da notare anche che nel caso della Run 39 di onda più corrente, il segnale elaborato presenta una dispersione maggiore rispetto alla media, mentre nel caso di sole onde (Run 44) gli andamenti risultano molto più prossimi a quello medio. Appare quindi utile evidenziare come la sovrapposizione della corrente sia tale da indurre un maggior disturbo al moto ondoso, disturbo che invece evidentemente non pare imputabile alla presenza di una scabrezza importante al fondo come i ripples, come mostra la Figura 4.4b relativa alla sonda posta sul fondo con ripples per il caso di sola onda, che non presenta nessun genere di dispersione nel segnale. A conferma di ciò si riportano in Figura 4.6 il segnale relativo al caso di sola onda e al caso di onde e correnti della prova corrispondente su fondo con sabbia aventi le stesse caratteristiche della prova riportata in Figura 4.4. Come si può notare il segnale continua a non mostrare nessun genere di dispersione per il caso di sola onda mentre anche per il fondo avente una scabrezza nettamente inferiore al caso precedentemente visto (ripples), è la presenza della corrente la maggior causa di disturbo del moto ondoso.

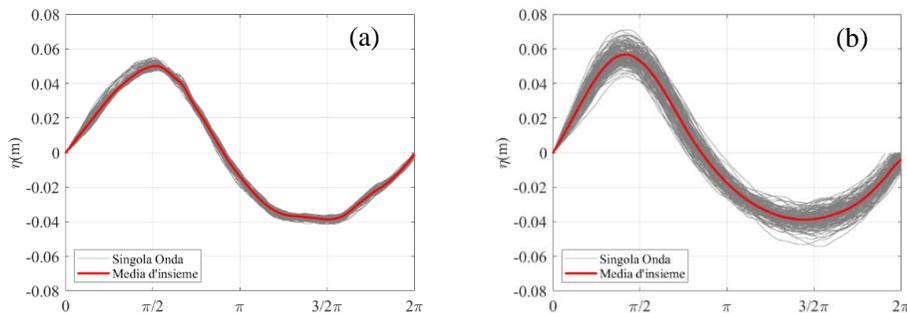


Figura 4.6 Analisi dell'altezza d'onda per la prova su fondo con sabbia (Sonda WG11, $d=0.4$ m, $T=2$ s, $H=0.08$ m $U_c=0.21$ m·s⁻¹). a) Run 4, caso solo onda WO; b) Run 8, caso onda e corrente WC.

Sulla stessa prova prima citata di condizioni di onda e corrente (Run39), è stato effettuato lo studio della variabilità dell'altezza d'onda nelle prove registrate durante l'acquisizione dei 16 punti di misura, rilevati per il Vectrino lungo la colonna d'acqua, per tutte e 24 le sonde di livello. In particolare la Figura 4.7 mostra l'andamento del rapporto tra altezza d'onda misurata e target (H_m/H) al variare delle prove corrispondenti a z/d raggruppando nello stesso plot le sonde aventi la stessa ascissa

Capitolo 4 - Campagna sperimentale e risultati ottenuti nel caso di onde e correnti ortogonali

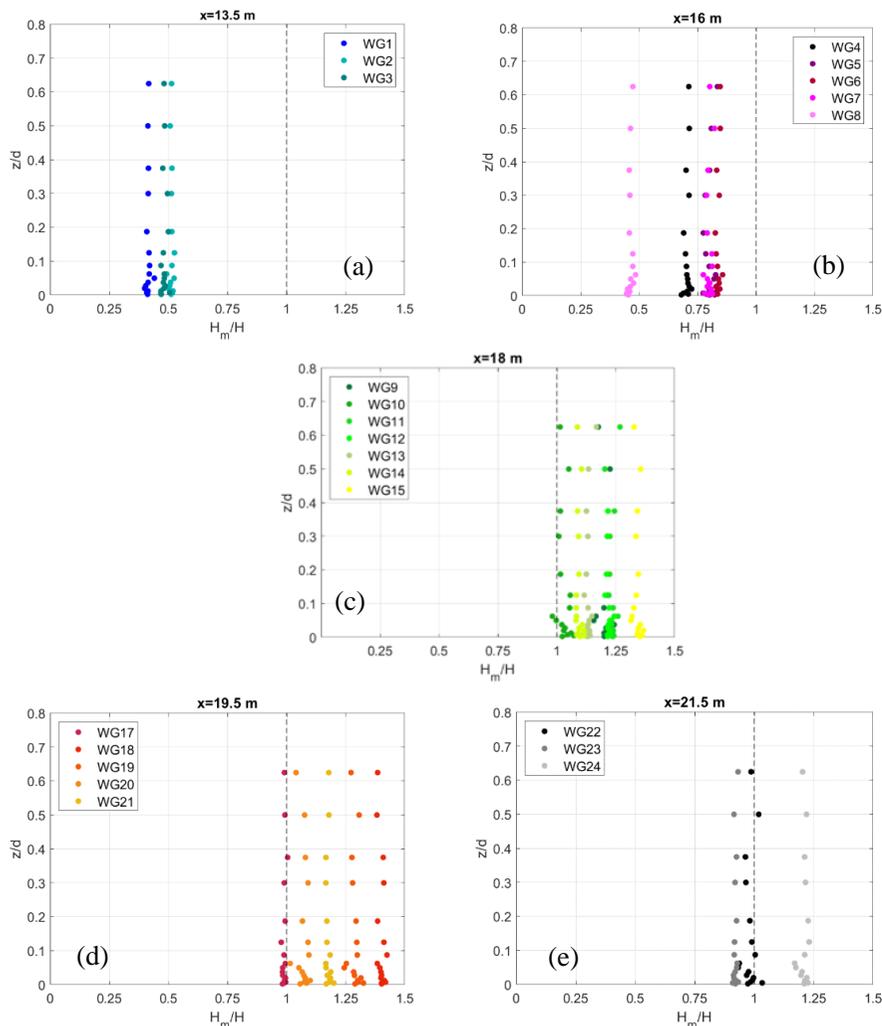


Figura 4.7 Rapporto tra altezza d'onda misurata e altezza target al variare di z/d per la Run 39 (WC, $d=0.4\text{m}$, $H=0.08\text{m}$ $T=2\text{s}$). a) WG1-2-3 $x=13.5\text{m}$; b) WG4-5-6-7-8 $x=16\text{m}$; c) WG9-10-11-12-13-14-15 $x=18\text{m}$; d) WG17-18-19-20-21 $x=19.5\text{m}$; e) WG22-23-24 $x=21.5\text{m}$.

. Attraverso tale analisi si può affermare che:

- le sonde disposte lungo $x=13.5\text{ m}$ (WG1-2-3) misurano un'altezza d'onda H_m ridotta del 50% rispetto ad H target in quanto sono le sonde più perimetrali rispetto al battitore e potrebbero risentire di un effetto Venturi;
- le sonde poste a $x=16\text{ m}$ (WG4-5-6-7-8) misurano un'altezza d'onda ridotta del 25% circa essendo queste già più centrate rispetto la generazione del moto.
- viene registrato dalle sonde disposte lungo $x=18\text{ m}$ e $x=19.5\text{ m}$ un incremento dell'altezza d'onda misurata rispetto all'altezza target compreso tra l'1 e il 25% (da WG9 a WG21) probabilmente dovuto al fenomeno della riflessione;
- in corrispondenza di $x=21.5\text{ m}$ si misura una H_m coincidente con l'altezza target per le sonde più vicina al battitore (WG22-23-24) in quanto risulta la posizione

meno influenzata da eventuali effetti che si generano all'interno del campo di moto.

- Infine comune a tutte le sonde si individua una maggiore stabilità del segnale per le prove corrispondenti all'elevazioni più alte mentre una dispersione più accentuata per le prove corrispondenti alle elevazioni del Vectrino più basse. Tale dispersione è stata misurata individuando il valore massimo e minimo dell'altezza H_m lungo l'elevazione per ogni singola sonda WG e ricavandone la variazione (Δ) in percentuale:

$$\Delta_{WG} = \frac{H_m^{max} - H_m^{min}}{H_m^{max}} \times 100$$

Tale variazione è comunque poco rilevante in quanto risulta essere sempre al di sotto del 10% con un valor medio del 5.6 %.

A seguito di ciò si può affermare inoltre che la posizione ottimale delle sonde che restituiscono un'altezza d'onda coincidente con quella imposta al battitore sono le sonde WG9, WG17 e WG22 aventi cioè $y=4$ m e x compreso tra 18m e 21.5m. Questo è probabilmente dovuto al fatto che queste sonde sono quelle più centrate e vicine rispetto al battitore e quindi non sono particolarmente influenzate dal fenomeno della riflessione né risentono di un eventuale effetto Venturi legato alla posizione delle sonde come avviene per le sonde WG1 e WG4 poste nella parte terminale del battitore.

In Figura 4.8 è mostrato il segnale di acquisizione delle 5 sonde di livello resistive (WG11-WG15) distanziate appositamente per poter applicare il metodo delle 4 sonde per il calcolo del coefficiente di riflessione (Faraci et al. 2015)

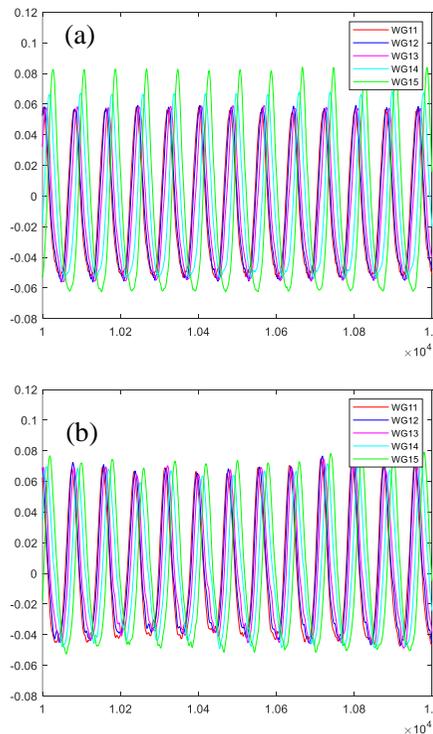


Figura 4.8 Segnale delle 5 sonde resistive (WG11-WG15) per lo studio della riflessione. a) WO; b) WC.

Capitolo 4 - Campagna sperimentale e risultati ottenuti nel caso di onde e correnti ortogonali

In particolare la Figura 4.8a e Figura 4.8b, mostrano rispettivamente un caso di sola onda (Run 47) e un caso di onda più corrente (Run 52) aventi $d=0.6$ m $H=0.12$ m e $T=2$ s (elevazione 14). Osservando la Figura 4.8a si può notare che i segnali delle sonde più vicine tra loro (WG11-WG13) sono pressoché coincidenti. Le sonde WG14 e WG15 sono ragionevolmente posizionate vicino agli antinodi dell'onda e questo porta ad un aumento dell'altezza dell'onda dovuto alla riflessione. La presenza della corrente (Figura 4.8b) livella la riflessione restituendo un andamento dell'altezza d'onda più uniforme tra le sonde. In base a ciò, mappando la superficie dell'onda acquisita mediante le 24 sonde, come mostrato su una prova a campione (vedi Figura 4.7), è stato possibile osservare una riflessione massima, sfruttando le sonde WG9–WG15 poste lungo la parte centrale del serbatoio, pari al 12% nel caso WO, mentre nel caso WC questo effetto si riduce al 9%. A tal proposito per tutte le prove è stato utilizzato un codice di calcolo che consentisse di calcolare l'altezza d'onda incidente H_i e il coefficiente di riflessione K_r , ovvero l'altezza d'onda riflessa H_r , con il metodo delle 3 e 4 sonde studiato rispettivamente da Mansard e Funke (1980) e Faraci et al. (2015). Per tale analisi sono stati tenuti in conto i limiti imposti dai metodi precedentemente nominati, relativi alle distanze che devono esserci tra le varie sonde e in particolare, seguendo il metodo di Goda (2000), sono state scelti i limiti inferiori e superiori per l'effettivo range di risoluzione delle armoniche da tenere in considerazione.

Seguendo le relazioni proposte da Goda 2000:

$$\begin{aligned} \text{Limite superiore } (f_{max}) &: \Delta l/L_{min} \cong 0.45 \\ \text{Limite inferiore } (f_{min}) &: \Delta l/L_{max} \cong 0.05 \end{aligned}$$

avendo indicato con Δl le distanze relative tra le sonde (vedi Figura 3.16) e L la lunghezza d'onda, per la presente campagna sono state considerate per le prove con $T=1$ s ovvero $L=1.56$ m le sonde WG11-13-14 e 15 per il calcolo di K_{r3} e K_{r4} e per le prove con $T=2$ s ovvero $L=6.24$ m le sonde WG11-12-13 e 14.

Tabella 4.VII Valutazione della riflessione nel caso di fondo con ripples.

Ripples						
<i>Run</i>	<i>Tipo</i>	<i>H [m]</i>	<i>H_{i3} [m]</i>	<i>K_{r3}</i>	<i>H_{i4}[m]</i>	<i>K_{r4}</i>
37/65	WO	0.05	0.051	0.150	0.051	0.115
38/62	WC	0.05	0.049	0.223	0.049	0.139
39	WC	0.08	0.088	0.154	0.094	0.185
40	CO	-	-	-	-	-
41/61	WC	0.12	0.125	0.168	0.132	0.173
42/64	WC	0.08	0.078	0.214	0.078	0.150
43/67	WO	0.08	0.081	0.129	0.080	0.120
44	WO	0.08	0.076	0.235	0.079	0.314
45/66	WO	0.12	0.110	0.272	0.110	0.331
46/56	WO	0.08	0.078	0.038	0.085	0.079
47	WO	0.12	0.115	0.105	0.115	0.124
48	WO	0.08	0.095	0.092	0.092	0.120
49/55	WO	0.05	0.054	0.120	0.053	0.118
50	WC	0.08	0.075	0.093	0.078	0.086
51	CO	-	-	-	-	-
52/60	WC	0.12	0.114	0.087	0.119	0.070
53	WC	0.08	0.076	0.169	0.078	0.114
54/57	WC	0.05	0.048	0.145	0.049	0.112

Vengono riportate in Tabella 4.VII per le Run relative al fondo con ripples Hi3, Kr3 e Hi4, Kr4 avendo indicato con Hi3 e H_{i4} e con K_{r3} e K_{r4} l'altezza d'onda incidente e il coefficiente di riflessione rispettivamente calcolati con il metodo delle 3 e 4 sonde.

Dal momento che il metodo delle 4 sonde risulta essere più accurato in quanto maggiore è il numero di sonde, maggiore è il numero di armoniche considerate e più accurato è il risultato, per completezza viene riportato il coefficiente di riflessione K_{r4} per tutte le prove svolte durante l'intera campagna sperimentale per le tre scabrezze riprodotte. In Tabella 4.VIII viene anche riportato per tutte le prove il valore dell'altezza d'onda misurata H_m relativo alla sonda WG11 come precedentemente descritto.

Tabella 4.VIII Coefficiente di riflessione K_{r4} e H_m per tutte le prove della campagna WINGS

<i>Sabbia</i>				<i>Ghiaia</i>				<i>Ripples</i>			
<i>Run</i>	K_{r4}	$H [m]$	$H_m [m]$	<i>Run</i>	K_{r4}	$H [m]$	$H_m [m]$	<i>Run</i>	K_{r4}	$H[m]$	$H_m [m]$
1	-	-	-	19	-	-	-	37/65	0.12	0.05	0.050
2	-	0.18	-	20	0.09	0.05	0.046	38/62	0.14	0.05	0.047
3	0.21	0.12	0.124	21	0.11	0.08	0.072	39	0.19	0.08	0.098
4	0.27	0.08	0.091	22	0.09	0.08	0.084	40	-	-	-
5	0.26	0.08	0.085	23	0.1	0.12	0.121	41/61	0.17	0.12	0.141
6	0.24	0.18	0.179	24	0.15	0.05	0.053	42/64	0.15	0.08	0.075
7	0.1	0.12	0.139	25	0.09	0.08	0.093	43/67	0.12	0.08	0.076
8	0.1	0.08	0.088	26	0.1	0.08	0.086	44	0.31	0.08	0.110
9	0.18	0.08	0.078	27	0.07	0.12	0.118	45/66	0.33	0.12	0.157
10	-	-	-	28	0.13	0.05	0.049	46/56	0.08	0.08	0.082
11	0.17	0.08	0.12	29	0.33	0.08	0.099	47	0.12	0.12	0.111
12	0.16	0.12	0.175	30	0.1	0.08	0.073	48	0.12	0.08	0.102
13	0.33	0.18	0.182	31	0.07	0.05	0.047	49/55	0.12	0.05	0.054
14	0.12	0.08	0.078	32	-	-	-	50	0.09	0.08	0.080
15	0.06	0.08	0.085	33	0.18	0.08	0.1	51	-	-	-
16	0.08	0.08	0.097	34	0.18	0.12	0.147	52/60	0.07	0.12	0.120
17	0.06	0.12	0.122	35	0.15	0.08	0.077	53	0.11	0.08	0.078
18	0.08	0.18	0.175	36	0.29	0.12	0.155	54/57	0.11	0.05	0.049

4.3.2 Profili di Velocità

In questo paragrafo vengono illustrate le analisi delle velocità mediate nel tempo nelle due direzioni principali di propagazione della corrente e dell'onda, x e y .

L'affidabilità delle velocità misurate è legata a due parametri che sono stati opportunamente scelti secondo le indicazioni di van der Zanden et al. (2017) e Yoon e Cox (2010): correlazione (COR) e rapporto segnale-rumore (SNR). L'SNR è stato impostato ovunque maggiore di 20, tranne in prossimità della regione di Weak Spots (paragrafo 3.5.2), cioè tra 50 e 65mm al di sotto del ricetrasmittitore, dove è stata considerata una soglia di accettazione più alta ovvero $SNR > 30$. Invece, $COR \geq 90$ è stato il limite adottato durante tutti gli esperimenti. Durante tali analisi i dati sono stati filtrati

Capitolo 4 - Campagna sperimentale e risultati ottenuti nel caso di onde e correnti ortogonali

con il metodo Goring e Nikora (2002) e i dati inaffidabili sono stati sostituiti da interpolazioni lineari.

Sono stati calcolati parametri dimensionali e adimensionali al fine di caratterizzare il campo di moto. In particolare, come mostrato nella Tabella 4.IX, e Tabella 4.X e Tabella 4.XI, rispettivamente per le tre scabrezze, indicheremo con U_c la velocità target della corrente calcolata come il rapporto tra la portata ($1\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e l'area della sezione d'uscita della corrente ($12\text{ m} \times d$) e con U_0 la velocità orbitale target dell'onda data dal prodotto dell'ampiezza orbitale dell'onda per la velocità angolare; la velocità della corrente misurata \hat{U}_c è stata calcolata come l'interpolazione lineare tra la misura effettuata prima e dopo la quota di $0.17d$ in accordo con Fredsøe et al. (1999), la velocità misurata dell'onda \hat{U}_0 invece è stata calcolata come media del valore assoluto delle velocità in corrispondenza alle fasi di cresta e cavo dell'onda per z compreso tra 35mm e 150mm. Tali velocità restituite da ogni Vectrino sono state a loro volta mediate sui 5 Vectrino per ottenere il valore di velocità orbitale mediato spazialmente lungo y .

Una volta noti \hat{U}_c e \hat{U}_0 i numeri di Reynolds della corrente (Re_c) e dell'onda (Re_w) sono stati calcolati secondo le seguenti relazioni:

$$Re_c = \frac{\hat{U}_c \cdot d}{\nu} \quad Re_w = \frac{\hat{U}_0 \cdot A}{\nu}$$

avendo indicato con A l'ampiezza orbitale dell'onda e con ν la viscosità cinematica dell'acqua.

Tabella 4.IX Parametri dimensionali e adimensionali per le prove su fondo con sabbia: U_c velocità target della corrente, U_0 velocità target dell'onda, \hat{U}_c velocità misurata della corrente, \hat{U}_0 velocità misurata dell'onda, \hat{U}_c/\hat{U}_0 parametro di velocità indice del regime dominante onda-corrente, Re_w numero di Reynolds dell'onda e Re_c numero di Reynolds della corrente.

Sabbia									
<i>Run</i>	<i>Tipo</i>	$U_c [m \cdot s^{-1}]$	$U_0 [m \cdot s^{-1}]$	$\hat{U}_c [m \cdot s^{-1}]$	$\hat{U}_0 [m \cdot s^{-1}]$	\hat{U}_c/\hat{U}_0	Re_w	Re_c	
1	CO	0.208	-	0.231	-	-	-	92326	
2	WO	-	0.283		0.249	-	19714		
3	WO	-	0.188		0.220	-	15461		
4	WO	-	0.126		0.140	-	6243		
5	WO	-	0.251		0.074	-	865		
6	WC	0.208	0.283	0.202	0.265	0.76	22275	80942	
7	WC	0.208	0.188	0.216	0.261	0.83	21653	86399	
8	WC	0.208	0.126	0.208	0.183	1.13	10684	83037	
9	WC	0.208	0.251	0.206	0.099	2.09	1545	82207	
10	CO	0.139	-	0.142	-	-	-	85353	
11	WC	0.139	0.126	0.123	0.123	1.00	4795	73179	
12	WC	0.139	0.188	0.124	0.194	0.64	12036	74459	
13	WC	0.139	0.283	0.124	0.190	0.65	11549	74562	
14	WC	0.139	0.251	0.107	0.040	2.65	257	63941	
15	WO	-	0.126		0.112	-	3996		
16	WO	-	0.251		0.051	-	417		
17	WO	-	0.188		0.177	-	10024		
18	WO	-	0.283		0.296	-	27943		

Capitolo 4 - Campagna sperimentale e risultati ottenuti nel caso di onde e correnti ortogonali

Tabella 4.X Parametri dimensionali e adimensionali per le prove su fondo con ghiaia.

<i>Ghiaia</i>									
<i>Run</i>	<i>Tipo</i>	$U_c [m \cdot s^{-1}]$	$U_0 [m \cdot s^{-1}]$	$\hat{U}_c [m \cdot s^{-1}]$	$\hat{U}_0 [m \cdot s^{-1}]$	\hat{U}_c/\hat{U}_0	Re_w	Re_c	
19	CO	0.14		0.124		-	-	74555	
20	WC	0.14	0.16	0.120	0.030	4.01	142	71722	
21	WC	0.14	0.25	0.117	0.041	2.86	266	70038	
22	WC	0.14	0.13	0.120	0.115	1.05	4178	72198	
23	WC	0.14	0.19	0.126	0.194	0.65	12000	75476	
24	WO	-	0.16		0.007	-	8	-	
25	WO	-	0.25		0.026	-	110	-	
26	WO	-	0.13		0.071	-	1626	-	
27	WO	-	0.19		0.202	-	12939	-	
28	WC	0.21	0.16	0.203	0.055	3.68	484	81148	
29	WO	-	0.13		0.150	-	7207	-	
30	WO	-	0.25		0.104	-	1732	-	
31	WO	-	0.16		0.056	-	506	-	
32	CO	0.21		0.204		-	-	81671	
33	WC	0.21	0.13	0.218	0.164	1.33	8605	87194	
34	WC	0.21	0.19	0.233	0.235	0.99	17616	93028	
35	WC	0.21	0.25	0.224	0.090	2.49	1281	89536	
36	WO	-	0.19		0.211	-	14202	-	

Tabella 4.XI Parametri dimensionali e adimensionali per le prove su fondo con ripples.

<i>Ripples</i>										
<i>Run_a</i>	<i>Run_b</i>	<i>Tipo</i>	$U_c [m \cdot s^{-1}]$	$U_0 [m \cdot s^{-1}]$	$\hat{U}_c [m \cdot s^{-1}]$	$\hat{U}_0 [m \cdot s^{-1}]$	\hat{U}_c/\hat{U}_0	Re_w	Re_c	
37	65	WO	-	0.16	-	0.079	-	994	97253	
38	62	WC	0.21	0.16	0.243	0.051	4.72	421	94972	
39	-	WC	0.21	0.13	0.237	0.149	1.59	7108	82921	
40	-	CO	0.21	-	0.207	-	-	-	96608	
41	61	WC	0.21	0.19	0.242	0.209	1.15	13956	97165	
42	64	WC	0.21	0.25	0.243	0.085	2.87	1144	-	
43	67	WO	-	0.25	-	0.123	-	2412	-	
44	-	WO	-	0.13	-	0.175	-	9726	-	
45	66	WO	-	0.19	-	0.255	-	20756	-	
46	56	WO	-	0.13	-	0.132	-	5552	-	
47	-	WO	-	0.19	-	0.199	-	12562	-	
48	-	WO	-	0.25	-	0.063	-	625	-	
49	55	WO	-	0.16	-	0.037	-	216	75968	
50	-	WC	0.14	0.13	0.127	0.134	0.95	5679	-	
51	-	CO	0.14	-	-	-	-	-	61428	
52	60	WC	0.14	0.19	0.102	0.202	0.51	12977	72820	
53	-	WC	0.14	0.25	0.121	0.035	3.46	196	53932	
54	57	WC	0.14	0.16	0.090	0.020	4.55	62	-	

Capitolo 4 - Campagna sperimentale e risultati ottenuti nel caso di onde e correnti ortogonali

Nella Figura 4.9, per tre prove di sola corrente caratterizzate da una profondità d'acqua $d=0.4$ m per le tre diverse scabrezze del fondo sono riportati i dati dei singoli Vetrino insieme al profilo mediato spazialmente. In particolare, la Figura 4.9a) e la Figura 4.9b) riportano rispettivamente le componenti di velocità in direzione x e y della Run 1 (SB, CO), Figura 4.9c) e Figura 4.9d) si riferiscono allo stesso modo alla Run 32 (GB, CO) e infine Figura 4.9e) e Figura 4.9f) alla Run 40 (RB, CO). La velocità è stata adimensionalizzata rispetto alla velocità della corrente target U_c e le elevazioni rispetto alla profondità d'acqua d . È possibile osservare che nel caso SB le velocità U_x misurate sono quasi sovrapposte una sopra l'altra in tutti i punti di misura. La componente y mostra uno schema irregolare il che porta a ipotizzare l'esistenza di circolazioni trasversali all'interno del bacino.

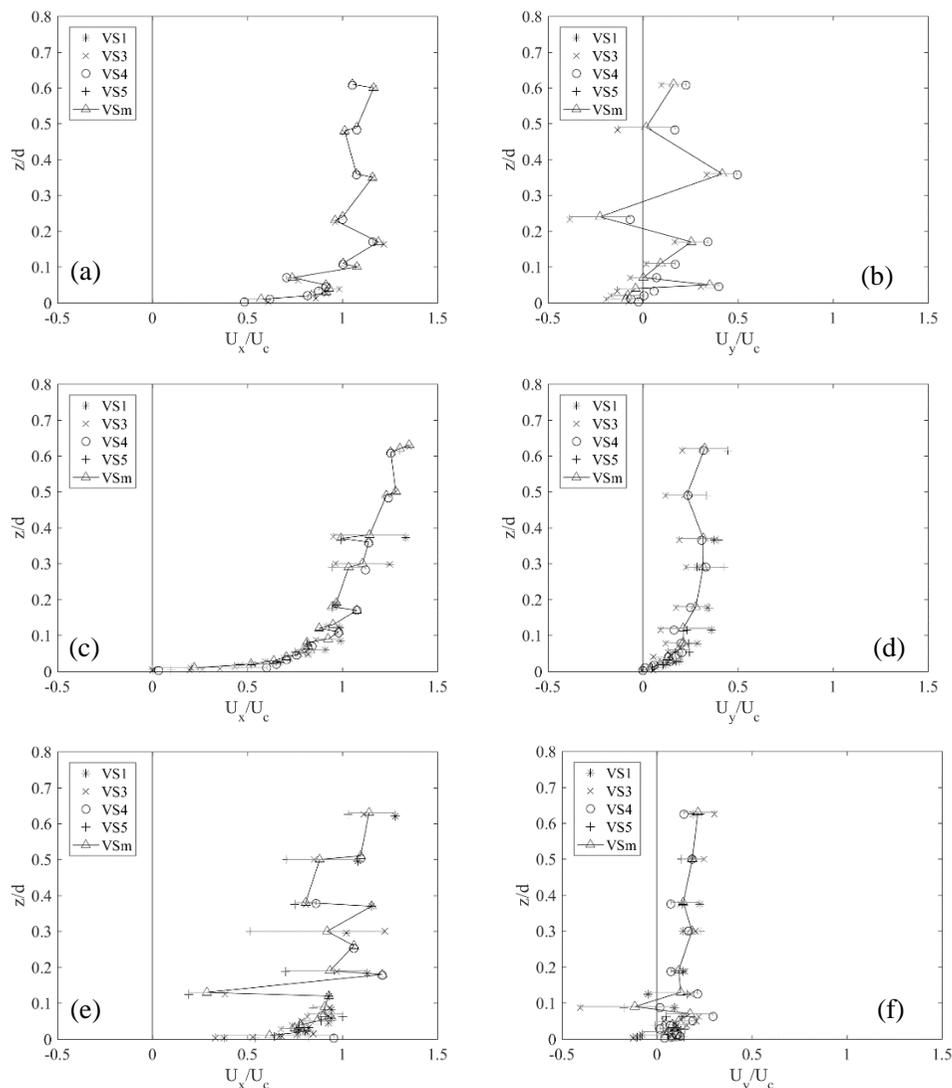


Figura 4.9 Profili di velocità media acquisiti dai Vetrino nel caso di sola corrente (CO, $d=0.4$ m). a) Run 1 (SB, U_x); b) Run 1 (SB, U_y); c) Run 32 (GB, U_x); d) Run 32 (GB, U_y); e) Run 40 (RB, U_x); f) Run 40 (RB, U_y).

Nel caso GB invece, la dispersione tra ogni Vectrino Single Point è più rilevante (fino al 20% nella regione del Weak spots) anche se il profilo medio è meno influenzato da brusche variazioni. Il caso RB mostra uno schema irregolare lungo la componente x probabilmente causato da un rilevante circolazione trasversale influenzata dalla presenza di un fondo con una scabrezza rilevante. Inoltre, si nota anche una variabilità significativa tra ciascun Vectrino Single Point. Lungo la direzione dell'onda l'andamento è più regolare e il profilo medio mostra un andamento più vicino ai dati di ciascun Vectrino Single Point. A seguito di ciò è risultato rilevante plottare i profili di velocità nei cinque punti di misura acquisiti lungo il ripples raggruppando le prove a parità di condizioni idrodinamiche confrontando il caso di sola corrente, il caso di sola onda e il caso di onda più corrente (CO, WO e WC) nelle due direzioni di propagazione delle forzanti (U_x e U_y). Di seguito sono riportate due set di prove (Figura 4.10 e Figura 4.11) rispettivamente in regime dominato dalla corrente (CD, $U_c/U_0 > 1$) e in regime dominato dall'onda (WD, $U_c/U_0 < 1$). Per il regime dominato dalla corrente, osservando i profili nella direzione x (Figura 4.10a), si riscontra che il profilo di velocità mediato nel tempo per il caso di sola onda (WO), assume valori pressoché pari a zero o devia leggermente verso valori negativi.

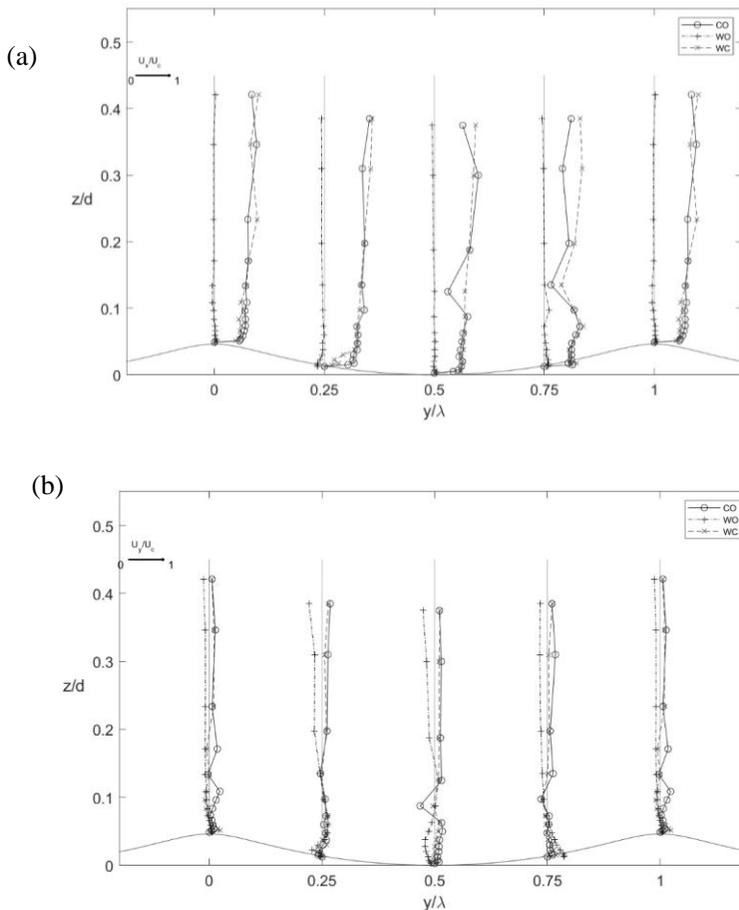


Figura 4.10 Confronto profili di velocità lungo il ripple per Run 40 (CO), Run 45 (WO) e Run 41 (WC) ($d=0.4\text{m}$ $H=0.12\text{m}$ e $T=2\text{s}$, $\hat{U}_c/\hat{U}_0=1.15$). a) direzione della corrente U_x ; b) direzione dell'onda U_y . CD

Capitolo 4 - Campagna sperimentale e risultati ottenuti nel caso di onde e correnti ortogonali

Per il caso CO e il caso WC, la presenza dell'onda sulla corrente comporta un incremento di velocità lontano dal fondo mentre un comportamento pressoché coincidente tra i due casi in prossimità di esso. Analizzando i profili in direzione dell'onda (Figura 4.10b) in tutte e 3 le condizioni di moto, vicino al fondo si individua un'inversione di velocità in quasi tutte le posizioni del ripple raggiungendo poi un andamento costante in segno via via che ci si allontana dalla parete. In particolare per il caso WO si riscontra una maggiore inversione di velocità con un punto di flesso in corrispondenza di $z/d=0.1$ con l'individuazione dell'undertow, via via che ci si allontana dal fondo. Tale corrente di ritorno è possibile calcolarla come media delle velocità in corrispondenza dell'ultimo punto di misura lungo la colonna d'acqua e verrà trattata e quantificata più nel dettaglio nei paragrafi successivi.

Inoltre, l'inversione di velocità, ci dà indicazioni sulla presenza di eventuali formazioni di celle di ricircolazione che sono saranno discusse successivamente.

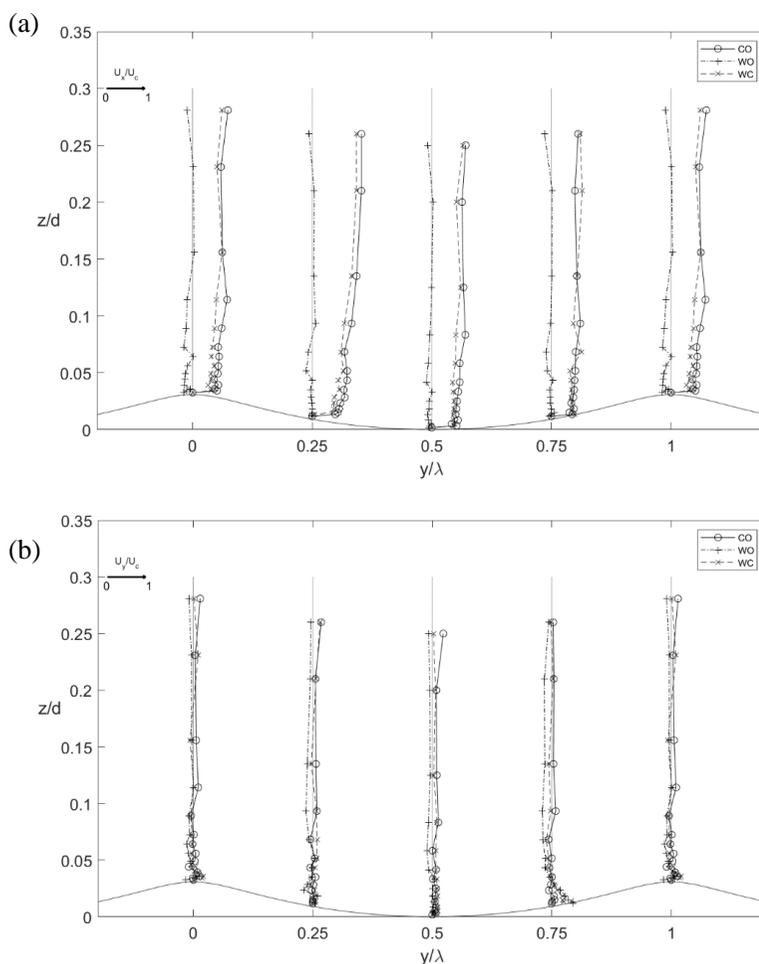


Figura 4.11 Confronto tra i profili di velocità lungo il ripple per Run 51 (CO), Run 47 (WO) e Run 52 (WC) ($d=0.6\text{m}$, $H=0.12\text{m}$ e $T=2\text{s}$, $\hat{U}_o/\hat{U}_o=0.51$, WD). a) direzione della corrente U_x ; b) direzione dell'onda U_y .

Analizzando il secondo set di prove, i profili in presenza di onde e correnti assumono comportamenti differenti rispetto al caso precedentemente illustrato. Questo è probabilmente dovuto al regime dominante. Difatti mentre al fondo il comportamento resta pressoché invariato nei due regimi, lontano dal fondo quando l'onda si sovrappone alla corrente, in regime WD in direzione x (Figura 4.11a), la sovrapposizione di questa forzante non comporta un incremento di velocità come avviene in regime CD ma il profilo assume un comportamento pressoché coincidente con il caso di sola corrente presentando in alcuni casi un leggero decremento di velocità.

In direzione dell'onda (Figura 4.11b) la velocità della corrente al di sotto di $0.1 z/d$ è nulla mentre mostra una leggera deviazione verso la spiaggia che potrebbe essere correlata alla presenza di corrente stazionaria secondaria. Sia per il caso di sola onda che per il caso di onde e correnti, si individua un'inversione della velocità più in basso rispetto al precedente caso, ovvero a $0.075 z/d$. Difatti si ha un cambio di segno del vettore velocità, che porta ad ipotizzare anche in questo caso l'esistenza di celle di ricircolo nella parte inferiore della colonna d'acqua. Inoltre è presente una piccola corrente di risacca sul restante profilo z/d .

Entrambi i casi illustrati sono caratterizzati da un'altezza d'onda $H=0.12\text{m}$; a seguire, per completezza vengono riportate le restanti analisi al variare dei parametri idrodinamici. Come si può notare in direzione dell'onda, l'inversione di velocità, individuata per $H=0.12\text{m}$ tende ad essere direttamente proporzionale rispetto l'altezza d'onda arrivando a valori nulli in corrispondenza del fondo per $H=0.05\text{m}$. Osservando il profilo di WC questo fenomeno tende a ripresentarsi con entità ridotta, motivo per cui è lecito attendere delle celle di ricircolo più evidenti per il caso WO che per il caso WC. Per quasi tutte le prove in regime dominato dalla corrente la velocità al di fuori dello strato limite in presenza di onde e correnti risulta essere maggiore rispetto al caso di sola corrente mentre in regime WD come già visto in Figura 4.11a) e si ripete in Figura 4.17a) la velocità nel caso CO e nel caso WC non presenta particolari variazioni.

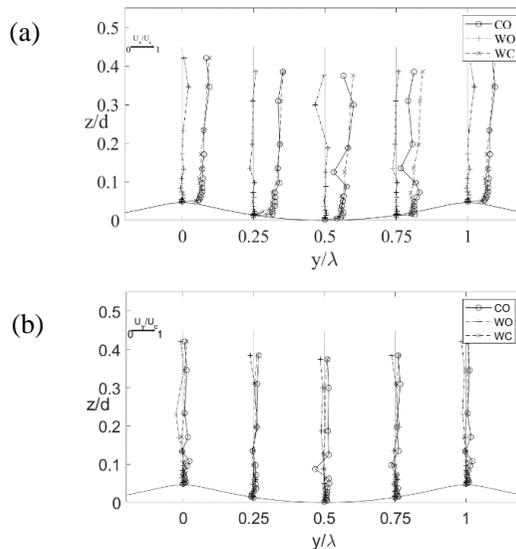


Figura 4.12 Confronto tra i profili di velocità lungo il ripple per Run 40 (CO), Run 37 (WO) e Run 38(WC) ($d=0.4\text{m}$, $H=0.05\text{m}$ e $T=1\text{s}$, $\hat{U}/\hat{U}_0=4.72$, CD). a) direzione della corrente U_x ; b) direzione dell'onda U_y .

Capitolo 4 - Campagna sperimentale e risultati ottenuti nel caso di onde e correnti ortogonali

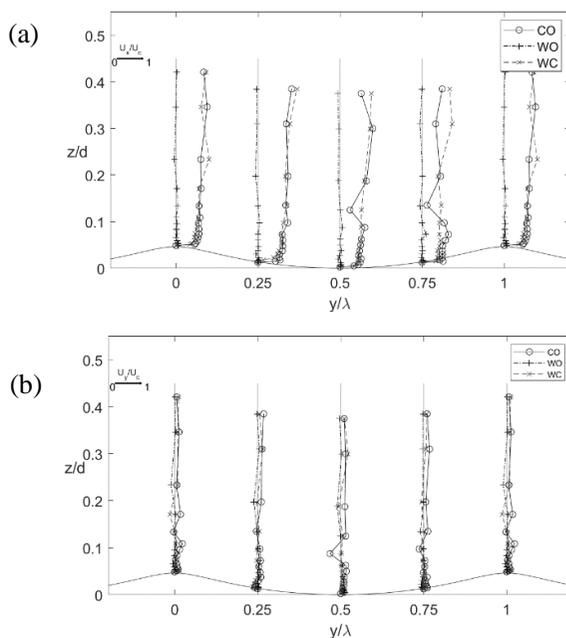


Figura 4.13 Confronto tra i profili di velocità lungo il ripple per Run 40 (CO), Run 43 (WO) e Run 42 (WC) ($d=0.4m$ $H=0.08m$ e $T=1s$, $\hat{U}_c/\hat{U}_0=2.87$, CD). a) direzione della corrente U_x ; b) direzione dell'onda U_y .

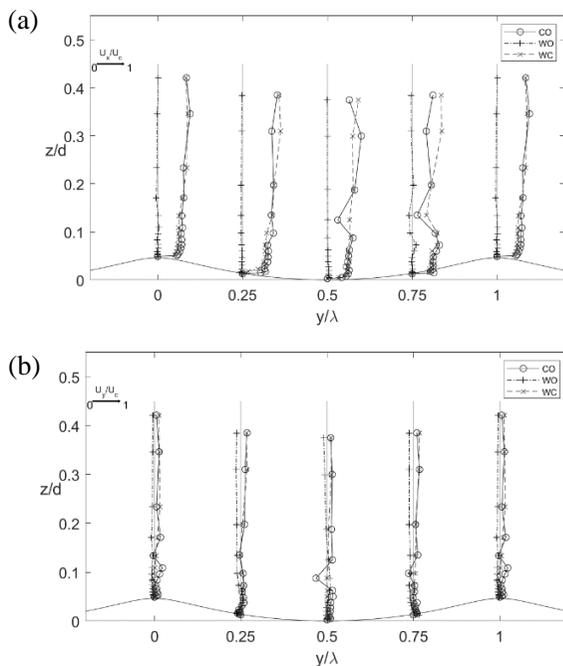


Figura 4.14 Confronto tra i profili di velocità lungo il ripple per Run 40 (CO), Run 44 (WO) e Run 39 (WC) ($d=0.4m$ $H=0.08m$ e $T=2s$, $\hat{U}_c/\hat{U}_0=1.59$, CD). a) direzione della corrente U_x ; b) direzione dell'onda U_y .

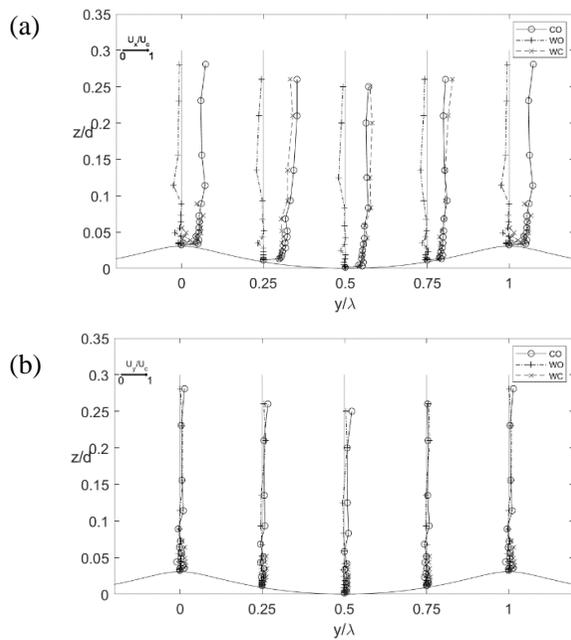


Figura 4.15 Confronto tra i profili di velocità lungo il ripple per Run 51 (CO), Run 49 (WO) e Run 54 (WC) ($d=0.6\text{m}$, $H=0.05\text{m}$ e $T=1\text{s}$, $\hat{U}_o/\hat{U}_0=4.55$, CD). a) direzione della corrente U_x ; b) direzione dell'onda U_y .

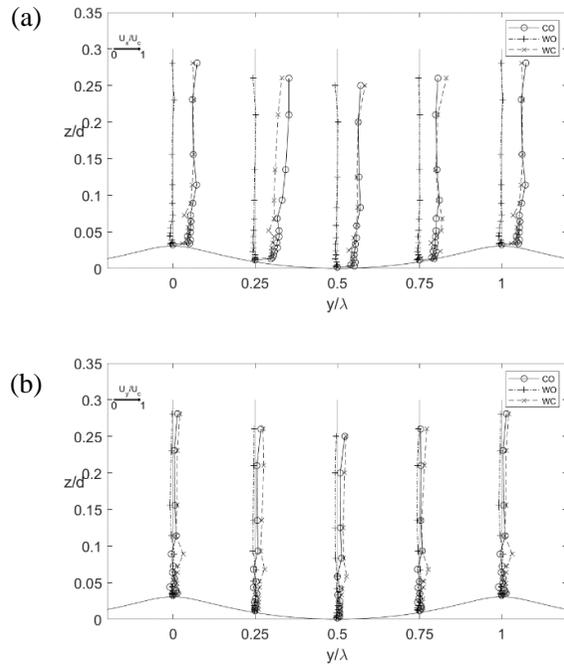


Figura 4.16 Confronto tra i profili di velocità lungo il ripple per Run 51 (CO), Run 48 (WO) e Run 53 (WC) ($d=0.6\text{m}$, $H=0.08\text{m}$ e $T=1\text{s}$, $\hat{U}_o/\hat{U}_0=3.46$, CD). a) direzione della corrente U_x ; b) direzione dell'onda U_y .

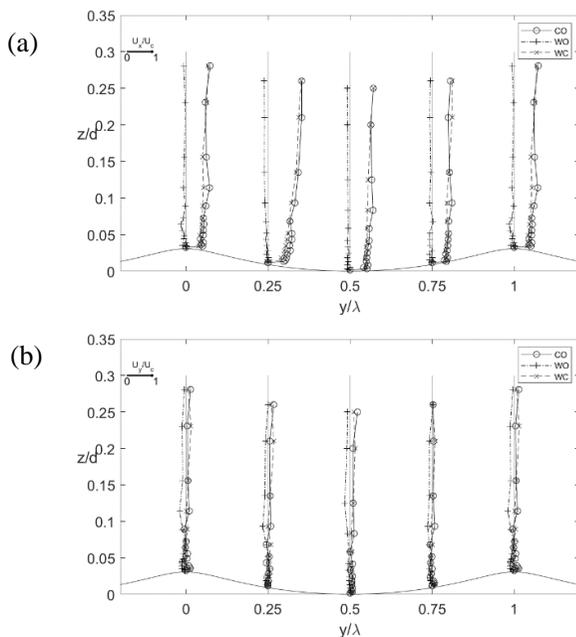


Figura 4.17 Confronto tra i profili di velocità lungo il ripple per Run 51 (CO), Run 46 (WO) e Run 50 (WC) ($d=0.6\text{m}$, $H=0.08\text{m}$ e $T=2\text{s}$, $\hat{U}_c/\hat{U}_0=0.95$, WD). a) direzione della corrente U_x ; b) direzione dell'onda U_y .

Al fine di individuare il ruolo della scabrezza al fondo sono stati scelti 6 set di dati a parità di condizioni idrodinamiche relativi rispettivamente alle tre scabrezze (SB, GB e RB) accoppiandoli per regime dominante (WD o CD).

Più in particolare, in Figura 4.18 e Figura 4.19 sono riportati i profili in direzione della corrente e in direzione dell'onda per sabbia ghiaia e ripples, rispettivamente per una prova di sola corrente, una di sola onda e una di onda e corrente in regime dominato dall'onda. La Figura 4.18a mostra per il caso di fondo con sabbia le tre prove in condizione CO, WO e WC aventi $d=0.6\text{m}$, $H=0.12\text{m}$, $T=2\text{s}$ e $U_c=0.14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Lungo la direzione x (Figura 4.18a) il profilo WO, negativo, potrebbe essere dovuto a una leggera diffrazione causata dalla forma della vasca ed alla presenza del bacino di dissipazione a tergo degli assorbitori, mentre i casi CO e WC mostrano profili intrecciati tra loro sia al fondo che lontano da esso. Lungo la direzione y (Figura 4.19a) il profilo WO non evidenzia la presenza dell'undertow previsto, tuttavia va considerato che in questo caso a causa della presenza del ponte di sostegno, tale fenomeno potrebbe verificarsi in corrispondenza di valori superiori a $z/d \cong 0.40$, limite superiore di acquisizione per queste prove.

Osservando la Figura 4.18b per il caso di fondo con ghiaia in direzione x , la presenza dell'onda porta ad un aumento della componente di velocità U_x , rispetto il caso di sola corrente a partire da circa $0.10 z/d$ e via via che ci si allontana dal fondo. Il profilo di sola onda, assume un andamento pressoché nullo, con valori negativi per z/d compreso tra 0.2 e 0.35, per tornare ad annullarsi di nuovo nell'ultimo punto di misura. Le Figura 4.18c e Figura 4.19c mostrano le velocità acquisite da ciascun Vectrino per il caso di fondo con ripples rispettivamente in direzione della corrente U_x e in direzione dell'onda U_y . Per controllare la ripetibilità del segnale, alla stessa figura sono state sovrapposte due prove

con le stesse caratteristiche di flusso acquisite in due diverse configurazioni del supporto. WC_a , ad esempio, rappresenta il profilo verticale della media delle 5 misurazioni acquisite dal Vectrino alle 5 sezioni lungo il ripple nella prima posizione del carrello in presenza di onde e correnti.

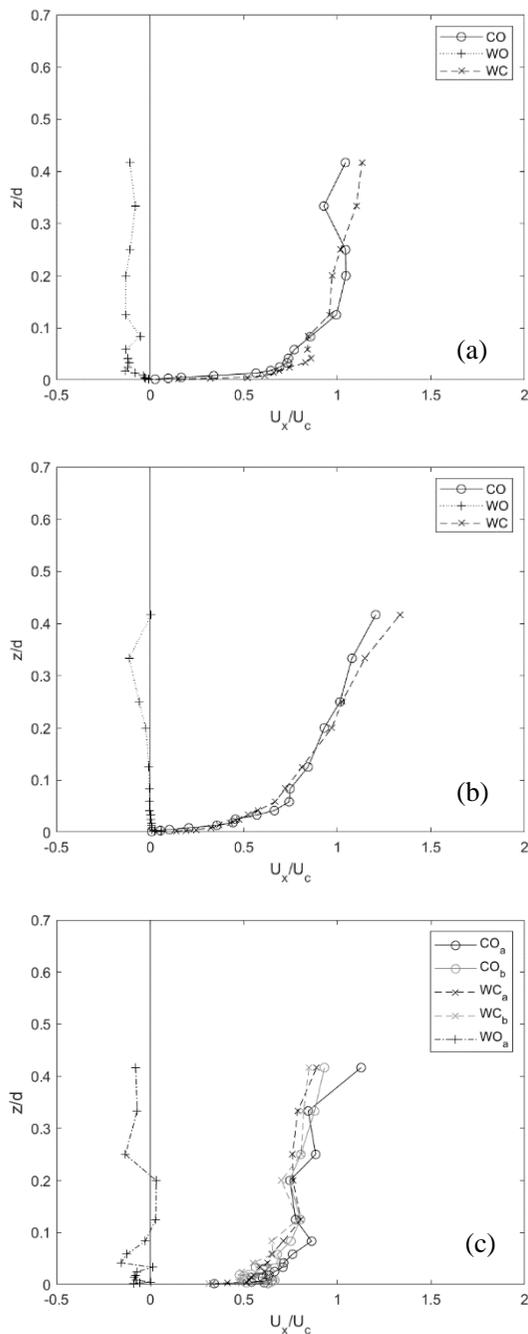


Figura 4.18 Profilo di velocità in condizioni CO, WO e WC in direzione della corrente U_x in regime dominato dall'onda ($d=0.6m$, $H=0.12m$, $T=2s$ e $U_c=0.14m \cdot s^{-1}$, WD). a) caso SB (Run10-17-12); b) caso

Capitolo 4 - Campagna sperimentale e risultati ottenuti nel caso di onde e correnti ortogonali

GB (Run19-27-23); c) caso RB (Run 51-47-52), i pedici a e b per il caso CO e WC, si riferiscono rispettivamente alla prima e alla seconda configurazione del carrello.

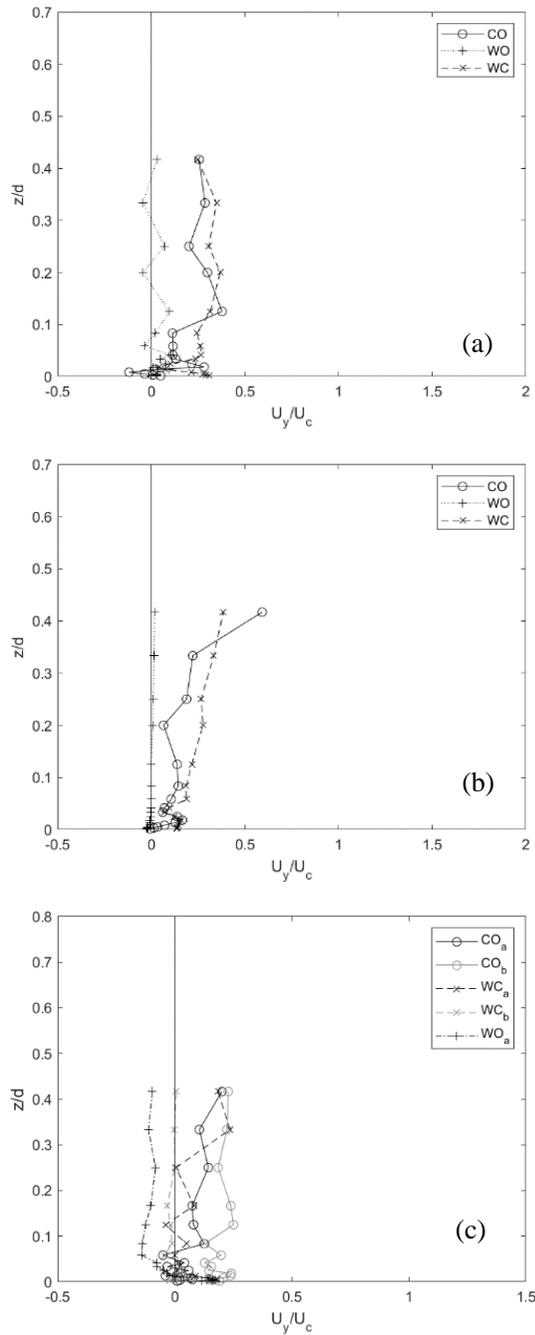


Figura 4.19 Profilo di velocità in condizioni CO, WO e WC in direzione dell'onda U_y in regime dominato dall'onda ($d=0.6\text{m}$, $H=0.12\text{m}$, $T=2\text{s}$ e $U_c=0.14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, WD). a) caso SB (Run10-17-12); b) caso GB (Run19-27-23); c) caso RB (Run 51-47-52), i pedici a e b per il caso CO e WC, si riferiscono rispettivamente alla prima e alla seconda configurazione del carrello.

Allo stesso modo, WC_b è un test con le stesse caratteristiche di flusso, acquisito quando gli strumenti sono stati spostati indietro di $1/8$ della lunghezza d'onda del ripple. Il caso WO, per la seconda configurazione del carrello (WO_b), non è presente, in quanto non tutti gli esperimenti sono stati replicati.

Questi confronti mostrano che soprattutto nella direzione della corrente vi è un'ottima ripetibilità della velocità. Nella direzione dell'onda la ripetibilità è leggermente meno precisa ma comunque ragionevole. Infatti, lo scostamento massimo riscontrato nella direzione della corrente è del 9% mentre quello ottenuto nella direzione dell'onda è del 14%. Questa deviazione rappresenta l'errore di misura.

Guardando il caso di sola onda in direzione x (Figura 4.18c), la velocità media è molto piccola e si inverte più volte fino a $0.2 z/d$, dopodiché assume stabilmente valori negativi. In direzione dell'onda (Figura 4.19c), l'inversione avviene molto vicino al letto ($\cong 0.05 z/d$), ed è possibile individuare chiaramente l'undertow.

Inoltre, nella direzione dell'onda, la corrente non è perfettamente allineata sullo zero e, quindi, esiste una deviazione verso la spiaggia che potrebbe essere correlata alla presenza di una lieve corrente residua.

È probabile che questi ultimi due effetti, l'undertow per il caso WO (valore negativo) e la presenza di una corrente residua costante per il caso CO (valore positivo), si annullino a vicenda, in modo tale che il profilo di velocità per il caso WC risulti quasi sempre nullo.

Osservando il comportamento nella direzione della corrente e confrontando le tre scabrezze si può apprezzare che la struttura del profilo sia per WO che per WC assume un andamento diverso: nel caso SB la velocità crescono fino a circa $0.10 z/d$ variando di poco lungo l'elevazione; nel caso GB e RB al contrario, le velocità aumentano fino a $0.40 z/d$ e oltre, e questo indica la propagazione verticale della turbolenza indotta dalla scabrezza del fondo. In direzione y in presenza di sola onda la velocità assume valori negativi via via più grandi con segno negativo al crescere della scabrezza.

Con lo stesso criterio esposto precedente, in Figura 4.20 e Figura 4.21 vengono riportati i profili in direzione x e y , rispettivamente, per prove in regime dominato dalla corrente (CD). Nel caso di fondo con sabbia, in direzione della corrente (Figura 4.20a), il profilo WO, differentemente dal regime WD, ha più volte un'inversione di velocità per valori vicini allo zero, i profili di CO e WC continuano ad intrecciarsi tra loro non mostrando cambiamenti apprezzabili rispetto al caso precedentemente esposto (Figura 4.18a). Per il fondo con ghiaia (Figura 4.20b) il profilo di sola onda ha valore ovunque nullo e il profilo di WC si discosta dal caso di sola corrente da $0.1 z/d$ in poi. La sovrapposizione dell'onda sulla sola corrente in questo caso comporta un incremento di velocità massimo di circa il 20%; incremento maggiore rispetto al caso dominato dall'onda, che invece si attesta intorno al 10%.

In regime CD il comportamento tra fondo con ghiaia e fondo con ripples assume caratteristiche simili. Difatti anche in presenza di ripples si individua un incremento di velocità, pari in questo caso al 30%. Pare quindi che quando l'onda si sovrappone alla sola corrente in regime CD, questo incremento di velocità ovvero lo scostamento dal caso di CO rispetto a WC, sia in qualche modo proporzionale alla scabrezza.

Tali risultati possono essere confrontati con precedenti studi; difatti in presenza di ripples (Faraci et al. (2008)) quando l'onda si sovrappone alla sola corrente, determina un incremento di velocità. A parità di regime dominante (WD) tale incremento è maggiore

Capitolo 4 - Campagna sperimentale e risultati ottenuti nel caso di onde e correnti ortogonali

nello studio di Faraci et al. rispetto al presente caso e ciò è verosimilmente legato agli effetti di scala.

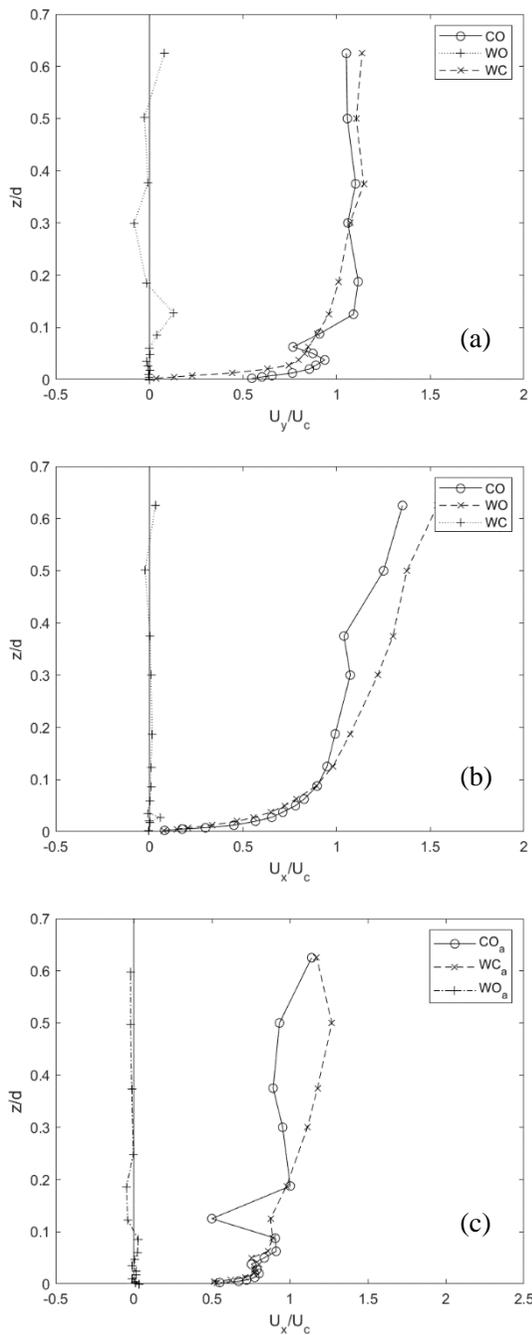


Figura 4.20 Profilo di velocità in condizioni CO, WO e WC in direzione della corrente U_x in regime dominato dalla corrente ($d=0.4\text{m}$, $H=0.08\text{m}$, $T=2\text{s}$ e $U_c=0.21\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, CD). a) caso SB (Run1-4-8); b) caso GB (Run32-29-33); c) caso RB (Run 40-44-39).

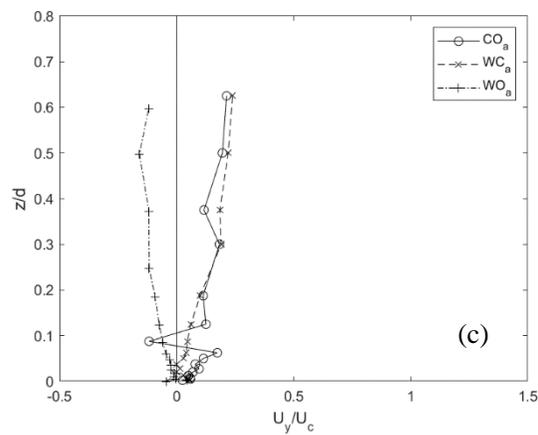
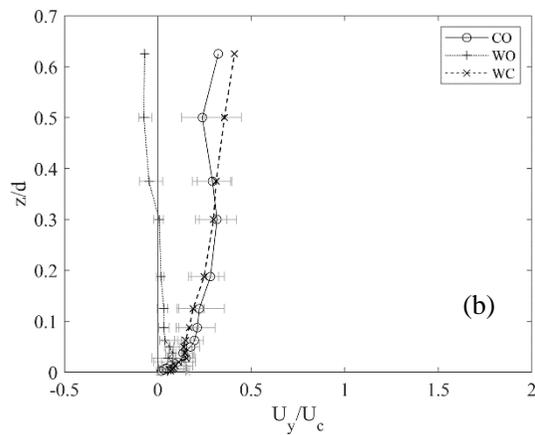
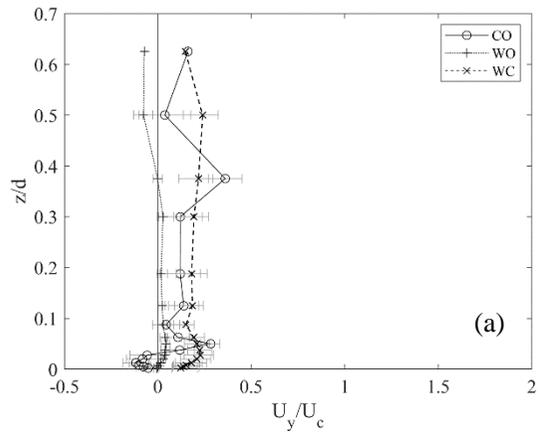


Figura 4.21 Profilo di velocità in condizioni CO, WO e WC in direzione dell'onda U_y in regime dominato dalla corrente ($d=0.4\text{m}$, $H=0.08\text{m}$, $T=2\text{s}$ e $U_c=0.21\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{CD}$). a) caso SB (Run1-4-8); b) caso GB (Run32-29-33); c) caso RB (Run 40-44-39).

Anche in Musumeci et al. (2006) il cui lavoro vede prove in regime esclusivamente WD per il caso di fondo con ghiaia e sabbia, in condizioni idrodinamiche

simili al presente studio riscontra un incremento di velocità dal caso CO al caso WC molto simile al caso illustrato in Figura 4.20b.

Tutto questo mette in risalto l'importanza di ottenere durante la stessa campagna entrambi i regimi, CD e WD. Infatti nel presente lavoro si è potuto mettere in luce che l'incremento di velocità per le prove in presenza di onde e corrente rispetto al caso di sola corrente risulta essere sia legato al valore di corrente misurata sia correlato al regime dominante in quanto è molto più marcato in regime CD rispetto al regime WD.

Per quantificare la deviazione della velocità rispetto alla direzione della corrente, in Figura 4.22 è riportato l'angolo formato dal flusso con l'asse x nel caso WC per le tre scabrezze. In particolare sono riportati una Run per il caso SB, una per il caso GB e una per RB, ovvero le Run 7, 34 e 39 ($d=0.40$ m, $H=0.08$ m, $T=2$ s, $U_c=0.21$ m·s⁻¹). In tutti e 3 i casi si nota che la deviazione del flusso tende a aumentare vicino al fondo.

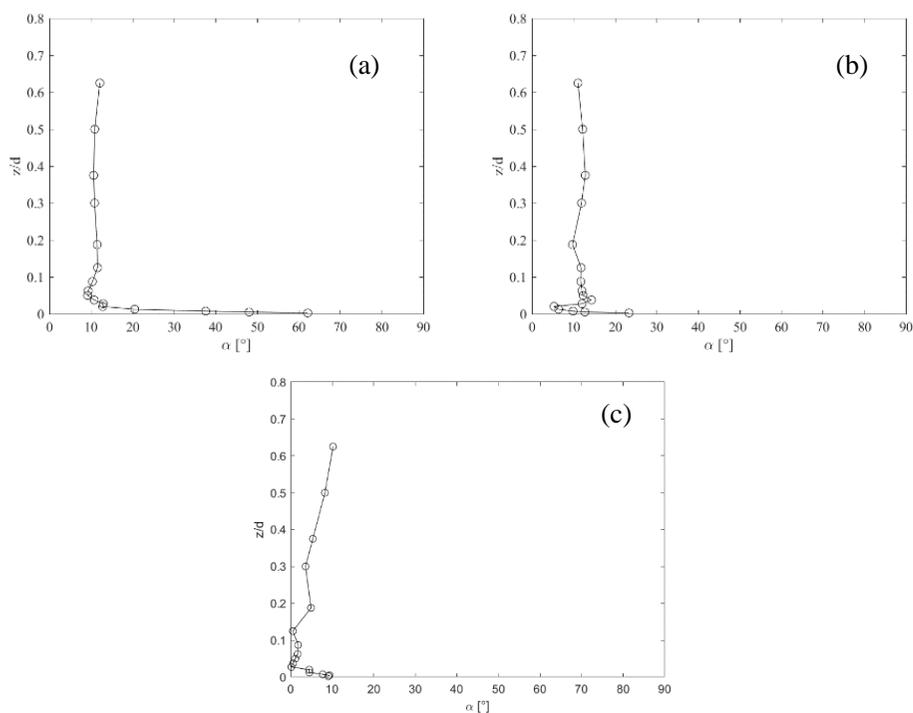


Figura 4.22 Direzione del flusso per il caso di onde e correnti ($d=0.4$ m $H=0.12$ m e $T=2$ s, $U_c=0.21$ m·s⁻¹). a) fondo con sabbia (Run7); b) fondo con ghiaia (Run34); c) fondo con ripples (Run39).

Per studiare la dipendenza dell'angolo di virata dalle condizioni idrodinamiche, è stata studiato l'angolo medio in profondità formato dal flusso al di fuori dello strato limite al variare del rapporto tra le velocità target della corrente e dell'onda U_c/U_0 . I risultati sono esposti in Figura 4.23. I dati sono raggruppati a seconda della condizione della scabrezza al fondo (GB, SB o RB). Nei tre casi, anche se con una certa dispersione (maggiore nel caso GB), l'angolo formato con l'asse x tende a diminuire all'aumentare del rapporto di velocità. In particolare, nei flussi dominati dalla corrente tende ad assumere un valore costante. Questo è in buon accordo con i risultati di Lim e Madsen (2016) e può essere correlato all'asimmetria di turbolenza tra i due semi-cicli d'onda. Come mostrato in Figura 4.23 per ogni set di dati relativi alle tre scabrezza è stata implementata una curva di tipo

polinomiale funzione di $\frac{U_c}{U_0}$ e d_{50} espresso in cm posto pari a 0.09 per la sabbia, 2.5 per la ghiaia e 2η per il fondo con ripple con η altezza del ripple:

$$\alpha = a \cdot \frac{U_c^b}{U_0} + c - (d_{50}^2)$$

essendo a, b e c tre coefficienti di seguito riportati:

$$a = 0.03771 \quad b = -7.693 \quad c = 18.97$$

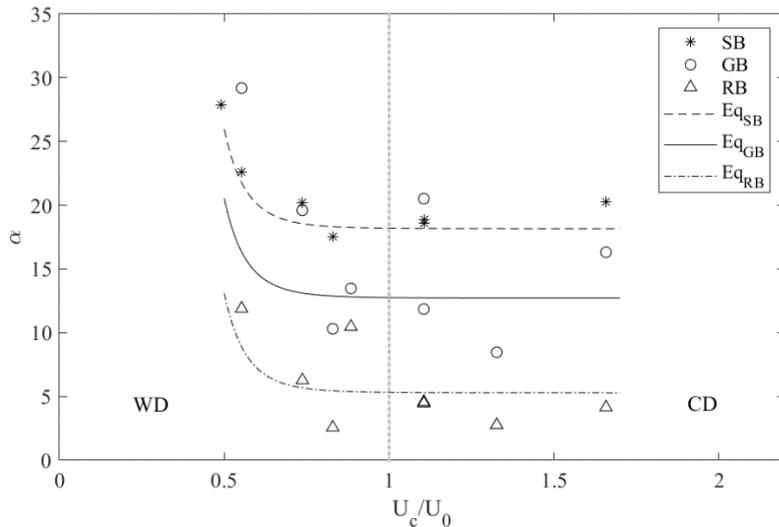


Figura 4.23 Direzione media del flusso rispetto al rapporto tra la velocità target della corrente e la velocità dell'onda.

4.3.3 Strato Logaritmico e Sforzi tangenziali

Seguendo la procedura suggerita da Fredsøe et al. (1999), è possibile tracciare in scala semi-logaritmica i profili di velocità già mostrati per visualizzare lo strato logaritmico nell'intervallo di $0.20 \cdot k_s < y < (0.20 \sim 0.30) d$ (Monin e Yaglom, 1973). Dal momento che i dati della presente campagna appartengono al regime di scabrezza turbolento, è possibile determinare la scabrezza apparente k_s e la velocità di attrito u^* rispettivamente come 30 volte l'intercetta dell'interpolazione del profilo logaritmico e come il coefficiente angolare come mostrato nelle successive figure.

In Figura 4.24 viene riportato il profilo logaritmico per una prova di sola corrente e una prova di onde e correnti al variare del limite superiore imposto. Secondo precedenti studi tale limite può essere variato in funzione dell'andamento del profilo con un valore non superiore al 30% della profondità d'acqua; difatti per la stessa prova è stato fatto variare il limite superiore: nel primo caso, seguendo Faraci et al. (2008) il limite è stato posto pari a $0.12d$ (Figura 4.24a), nel secondo caso (Figura 4.24b) il limite è stato posto pari a $0.2d$ (Monin e Yaglom, 1973) ed infine nel terzo caso è stato scelto un valore intermedio tra i precedenti casi limite pari a $0.17d$ (Figura 4.24c). In particolare si è visto che per la maggior parte delle prove in corrispondenza di quest'ultimo valore si individua un'apprezzabile variazione del coefficiente angolare della retta interpolante i punti

Capitolo 4 - Campagna sperimentale e risultati ottenuti nel caso di onde e correnti ortogonali

costituenti il profilo. Per tal motivo su tutte le prove è stato impostato come limite superiore $0.17d$ con d profondità d'acqua.

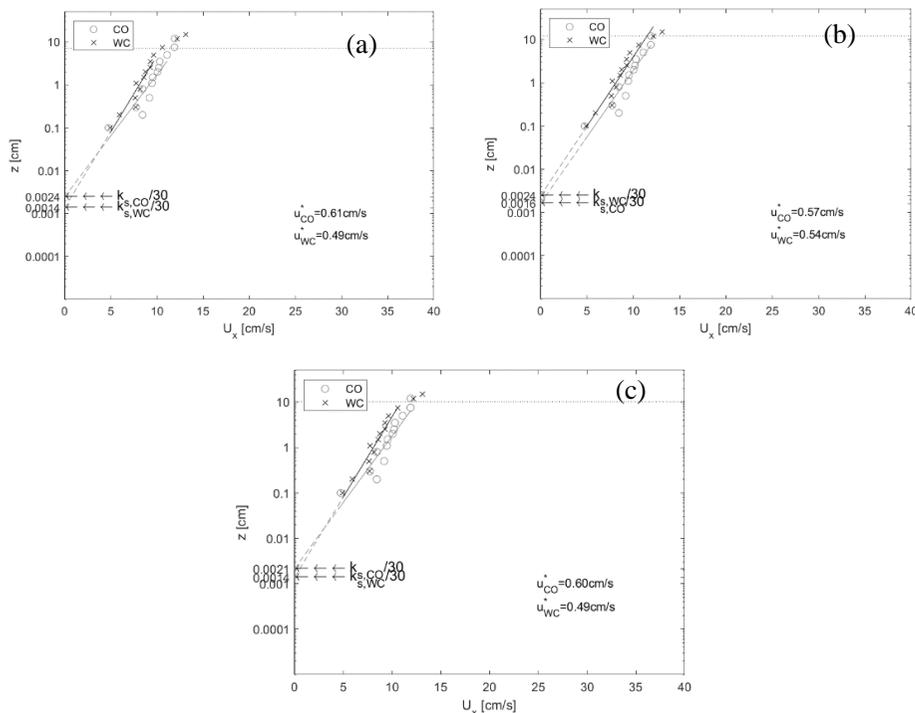


Figura 4.24 Profilo logaritmico al variare del limite superiore (CO e WC, $d=0.6m$, $H=0.12m$, $T=2s$ e $U_c=0.14m \cdot s^{-1}$). a) $0.12 d$; b) $0.20 d$; c) $0.17 d$.

Come è stato già messo in luce attraverso l'analisi dei profili di velocità, anche per questa tipologia di analisi si sono scelte, per le tre scabrezze, le coppie di prove (CO e WC) aventi stesse caratteristiche idrodinamiche. Tale criterio è stato adottato mettendo a confronto prove in regime CD (Figura 4.25) con prove in regime WD (Figura 4.26). Le prove plottate per regime dominato dalla corrente (Figura 4.25) aventi $d=0.4m$, $H=0.08m$, $T=2s$ e $U_c=0.21m \cdot s^{-1}$ mostrano un comportamento comune al variare della scabrezza. Difatti sia la scabrezza apparente k_s sia la velocità d'attrito u^* risultano essere maggiori nel caso WC rispetto al caso CO ed inoltre le rette interpolanti tendono ad essere quasi parallele.

In regime WD (Figura 4.26) avviene l'esatto contrario e le rette interpolanti si intersecano tra loro per tutte e tre le scabrezze.

Confrontando il regime WD e il regime CD si individua che in entrambi i casi, passando da fondo con ghiaia a fondo con ripples, sia la velocità d'attrito sia la scabrezza apparente si riducono, rispettivamente, del 50% la prima e di due ordini di grandezza la seconda, per entrambe le condizioni di moto (CO e WC). Inoltre la velocità di attrito in presenza di sola corrente risulta essere maggiore in regime dominato dalla corrente rispetto a quella individuata in regime dominato dall'onda; anche la velocità d'attrito in presenza di onde e correnti assume lo stesso andamento.

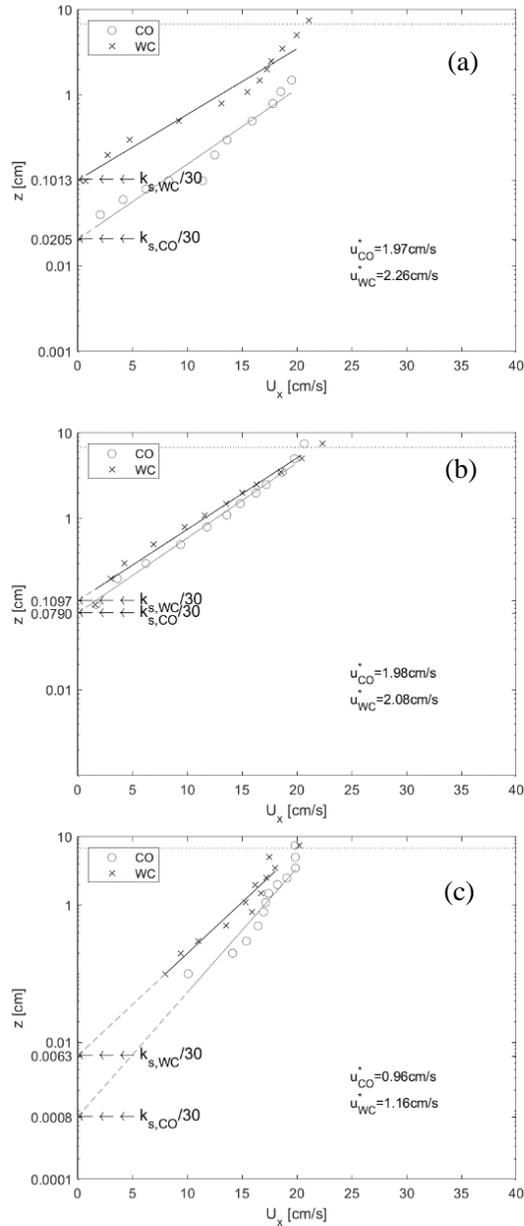


Figura 4.25 Profilo logaritmico prova di sola corrente e prova di onda più corrente in regime dominato dalla corrente (CD) per le tre scabrezze (CO e WC, $d=0.4$ m, $H=0.08$ m, $T=2$ s e $U_c=0.21$ m·s⁻¹). a) fondo con sabbia (SB, Run 1-8, $\hat{U}/\hat{U}_0=1.13$, $Re_c=83037$); b) fondo con ghiaia (GB, Run 32-33, $\hat{U}/\hat{U}_0=1.33$, $Re_c=87194$); c) fondo con ripples (RB, Run 40-39, $\hat{U}/\hat{U}_0=1.59$, $Re_c=94972$).

Capitolo 4 - Campagna sperimentale e risultati ottenuti nel caso di onde e correnti ortogonali

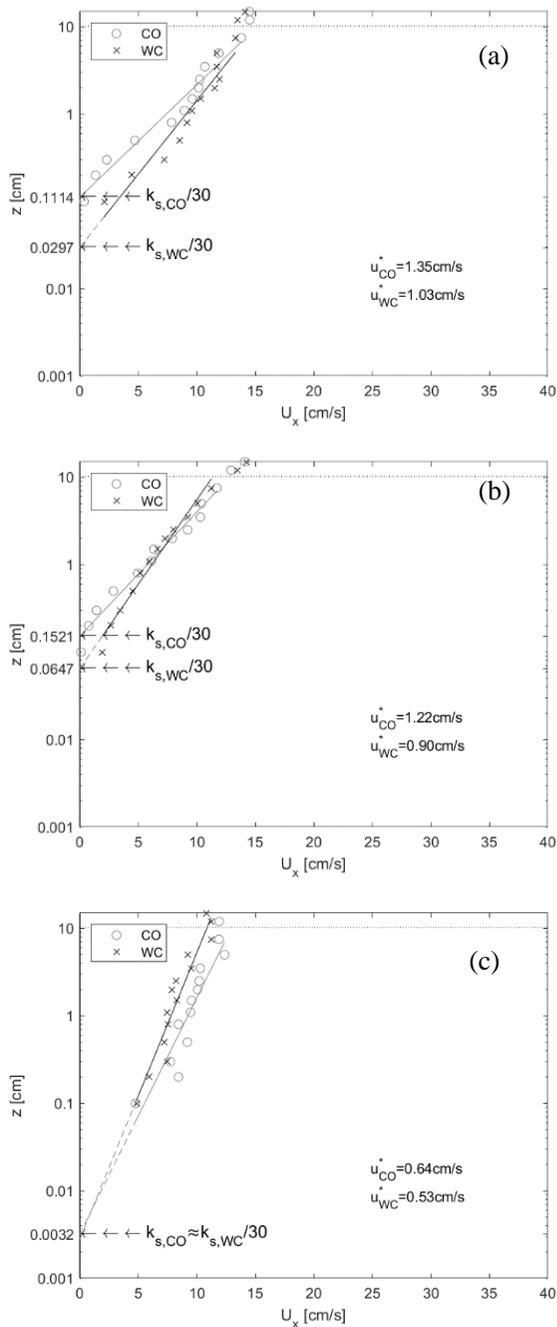


Figura 4.26 Profilo logaritmico prova di sola corrente e prova di onda più corrente in regime dominato dall'onda (WD) per le tre scabrezze (CO e WC, $d=0.6m$, $H=0.12m$, $T=2s$ e $U_c=0.14m \cdot s^{-1}$). a) fondo con sabbia (SB, Run 10_12, $\hat{U}_c/\hat{U}_0=0.64$, $Re_c=74459$); b) fondo con ghiaia (GB, Run 19_23, $\hat{U}_c/\hat{U}_0=0.65$, $Re_c=75476$); c) fondo con ripples (RB, Run 51_52, $\hat{U}_c/\hat{U}_0=0.51$, $Re_c=61428$).

Una volta determinate per tutte le prove la velocità d'attrito e la scabrezza apparente, è stato calcolato il Re^* (vedi Tabella 4.XII) come di seguito riportato:

$$Re^* = \frac{u^* \cdot d_{50}}{\nu}$$

Tabella 4.XII Velocità d'attrito, scabrezza apparente e Re^* per la campagna WINGS

Sabbia				Ghiaia				Ripples			
<i>Run</i>	u^* [cm·s-1]	k_s [cm]	Re^*	<i>Run</i>	u^* [cm·s-1]	k_s [cm]	Re^*	<i>Run</i>	u^* [cm·s-1]	k_s [cm]	Re^*
1	1.970	0.615	18	19	1.225	6.919	306	38/62	1.105	0.163	204
6	2.257	3.114	20	20	1.066	5.858	267	39	1.162	0.189	215
7	2.395	3.023	22	21	1.030	5.973	258	40	0.956	0.024	177
8	2.260	3.040	20	22	1.055	5.926	264	41/61	1.014	0.063	187
9	2.143	2.601	19	23	0.900	2.659	225	42/64	1.133	0.186	210
10	1.348	5.120	12	28	2.169	5.136	542	50	0.492	0.041	91
11	1.115	2.193	10	32	1.983	2.371	496	51	0.644	0.096	119
12	1.034	1.498	9	33	2.083	3.290	521	52/60	0.531	0.084	98
13	1.037	1.506	9	34	2.158	3.227	540	53	0.751	0.430	139
14	0.865	1.031	8	35	1.772	1.625	443	54/57	0.664	0.252	123

Estendendo tali analisi all'intero campo di prove, è possibile riscontrare un comportamento comune della scabrezza relativa e della velocità d'attrito per quasi tutte le prove in funzione del numero di Reynolds della corrente. In particolare si è visto che per valori di Re_c maggiori di 80000 in presenza di onde e correnti la scabrezza e la velocità di attrito risultano essere maggiori rispetto al caso di sola corrente; al di sotto di $Re_c=80000$ avviene l'esatto contrario. Più precisamente:

$$\begin{aligned} \text{per } Re_c > 80000 & \quad \frac{k_{s,wc}}{k_{s,co}} > 1 \quad e \quad \frac{u_{wc}^*}{u_{co}^*} > 1 \\ \text{per } Re_c < 80000 & \quad \frac{k_{s,wc}}{k_{s,co}} < 1 \quad e \quad \frac{u_{wc}^*}{u_{co}^*} < 1 \end{aligned}$$

Si è quindi individuato un valore di numero di Reynolds della corrente che funge da spartiacque tra i due comportamenti mettendo in luce quindi come la velocità d'attrito della corrente assuma un ruolo determinante per gli sforzi tangenziali quando si ha la contemporanea presenza delle forzanti.

Seguendo altri studi di letteratura, la scabrezza apparente può essere correlata all'intensità relativa della corrente (Nielsen 1992). Difatti in Figura 4.27 e Figura 4.28 vengono riportati il confronto tra i dati di letteratura esistenti e i dati del presente lavoro plottando il rapporto tra le scabrezze apparenti del caso di onde e correnti e il caso di sola corrente rispetto al rapporto tra la velocità target dell'onda sulla velocità d'attrito del caso di onde e correnti.

Capitolo 4 - Campagna sperimentale e risultati ottenuti nel caso di onde e correnti ortogonali

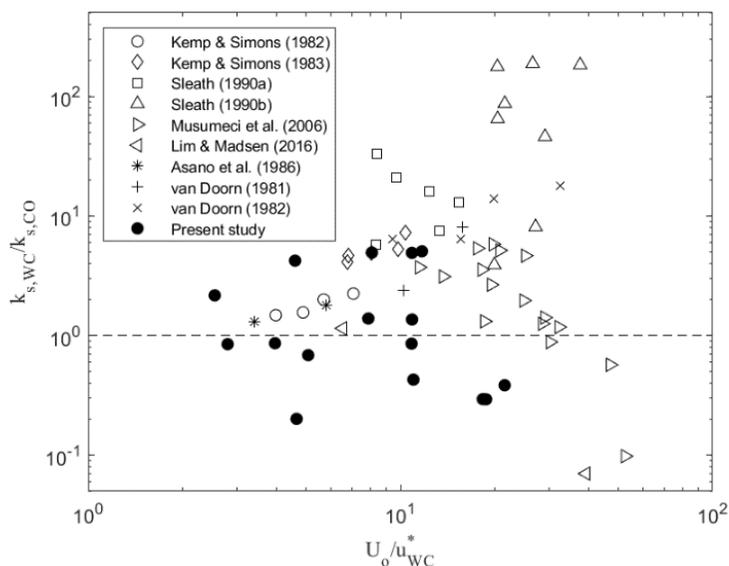


Figura 4.27 Confronto tra scabrezza apparente $k_{s,WC}/k_{s,CO}$ in funzione del rapporto U_0/u_{WC}^* dei dati della campagna WINGS con dati di letteratura in presenza di onde e correnti su fondo con sabbia o ghiaia.

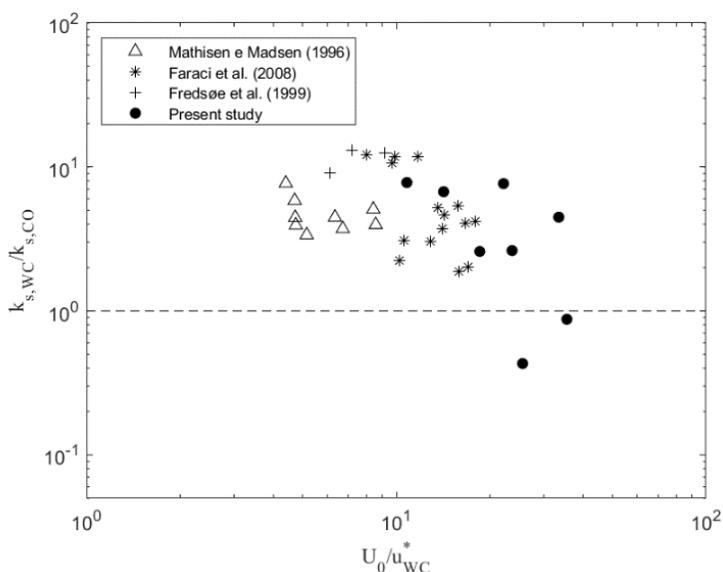


Figura 4.28 Confronto tra scabrezza apparente $k_{s,WC}/k_{s,CO}$ in funzione del rapporto U_0/u_{WC}^* dei dati della campagna WINGS con dati di letteratura in presenza di onde e correnti su fondo con ripples.

Le due figure comprendono, oltre agli esperimenti effettuati nella presente campagna, anche gli studi precedenti con analoga scabrezza del fondo; ovvero la Figura 4.27 è relativa a studi su fondo con scabrezze assimilabili al caso di sabbia e ghiaia in particolare i dati di Kemp e Simons (1982), (1983), Asano et al. (1986), van Doorn (van Doorn, 1981, 1982), Sleath (1990) Lim e Madsen (2006) e Musumeci et al. (2006); la 98

Figura 4.28 invece è inerente a studi in presenza di ripples che sono in numero minore, e ovvero Mathisen e Madsen (1996), Fredsøe et al. (1999) e Faraci et al. (2008).

È possibile osservare che la dispersione è significativa, anche se tende a ridursi leggermente all'aumentare del rapporto di scabrezza. Si individua una leggera tendenza ad avere rapporti di scabrezza più grandi al crescere del rapporto di velocità, in quanto nella maggior parte dei casi l'interazione onda-corrente comporta uno shift dell'intercetta del profilo logaritmico, che risulta essere maggiore al crescere dell'altezza d'onda (Fredsøe et al. (1999)). Poiché la velocità orbitale dell'onda è strettamente dipendente dall'altezza dell'onda, questo risulta verificato. Come è possibile notare con la linea tratteggiata nelle figure, l'originale rappresentazione di tali dati, effettuata da Nielsen (1992), prevedeva l'origine dell'ordinate in corrispondenza di $k_{s,wc}/k_{s,co}=1$. La presente campagna sperimentale ci ha permesso di ampliare il range di valori di letteratura indagando anche l'area caratterizzata da $k_{s,wc}/k_{s,co}<1$. Difatti sia in presenza di fondo con sabbia e ghiaia che in presenza di ripples è stato possibile mostrare anche i punti appartenenti al regime di scabrezza apparente dominato dall'onda ($\frac{k_{s,wc}}{k_{s,co}} < 1$).

Per approfondire l'analisi del regime di scabrezza in cui sono dominanti gli effetti dell'onda, in Figura 4.29 viene riportata la scabrezza apparente adimensionalizzata rispetto al rapporto tra la velocità d'attrito della onda e corrente su quella della sola corrente. Nella stessa figura vengono riportati anche i dati inerenti al lavoro di Lim e Madsen (2016) poiché solo questi tra quelli esaminati prima, presentano range di parametri investigati analoghi a quelli della presente campagna.

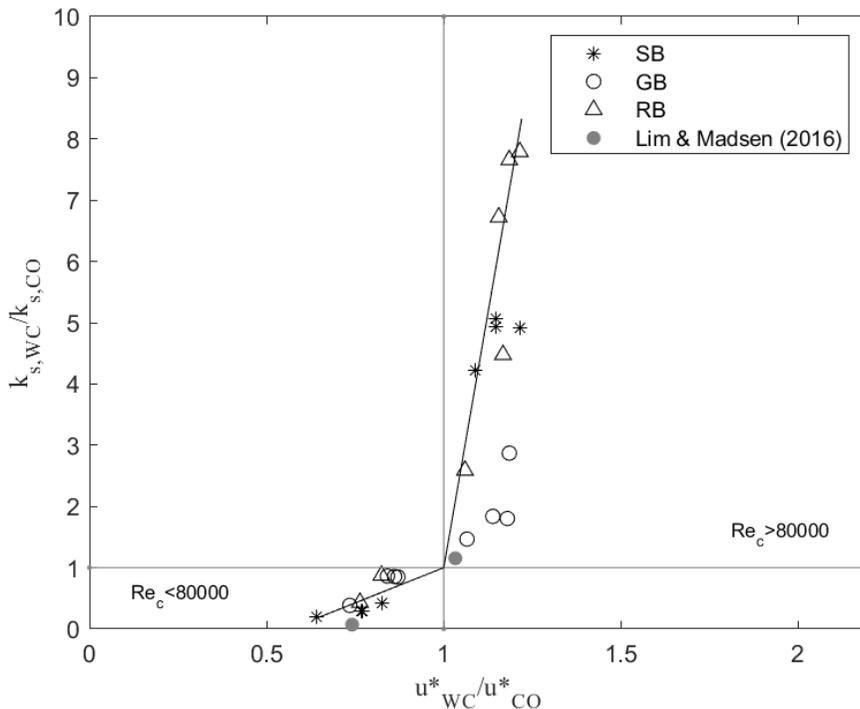


Figura 4.29 Rapporto tra scabrezza apparente $k_{s,wc}/k_{s,co}$ in funzione del rapporto della velocità d'attrito u_{wc}^*/u_{co}^* .

La Figura 4.29 mostra che la scabrezza apparente adimensionale cresce al crescere della velocità d'attrito adimensionale. Tuttavia si osserva che, indipendentemente dalla scabrezza al fondo, quando la velocità d'attrito dell'onda e corrente è maggiore di quella della sola corrente e quindi per valori di $Re_c > 80000$, si ha un brusco incremento della scabrezza apparente adimensionale. Per tal motivo sono state individuate due rette che interpolano bene i punti nelle due regioni. È interessante notare che il repentino cambio di pendenza delle curve avviene proprio quando la velocità d'attrito misurata nell'interazione onda-corrente coincide con il caso di sola corrente. Viene di seguito riportata la legge analitica delle due curve funzione dei due rapporti adimensionalizzati:

$$\frac{k_{s,wc}}{k_{s,co}} = A \cdot \frac{u_{wc}^*}{u_{co}^*} - B$$

dove A e B sono:

- A= 2.30 e B=1.30 quando $u_{wc}^*/u_{co}^* < 1$ ovvero per $Re_c < 80000$
- A= 20.24 e B=19.24 quando $u_{wc}^*/u_{co}^* > 1$ ovvero per $Re_c > 80000$

Come si evince dal confronto con studi precedenti di letteratura (Figura 4.28) appare chiaro che l'interazione onda-corrente su fondo con ripples è stata molto meno indagata rispetto ad altre scabrezze.

Al fine di delineare le variazioni che si verificano in presenza di interazione onda-corrente sullo strato limite nel caso di fondo con ripples e di approfondire l'inversione di velocità riscontrata nei profili, sono state effettuate ulteriori analisi del campo di moto medio con particolare riferimento alla formazione di celle di ricircolo in presenza sia di sole onde sia di interazione onda-correnti su fondale con ripples.

4.3.4 Celle di Ricircolo

Come anticipato, l'analisi delle componenti stazionarie di velocità che si generano lungo il profilo di un ripple è stata effettuata calcolando le velocità medie temporali nelle direzioni y e z. Al fine di comprendere quali siano i parametri che innescano la generazione di tali componenti, vengono di seguito riportati i casi più significativi confrontando, a parità di condizioni idrodinamiche, la condizione di sola onda e quella di onde e correnti. Durante la campagna sperimentale, come precedentemente accennato, in presenza di fondo con ripples sono state effettuate prove in due diverse configurazioni del Vectrino al fine di avere informazioni sulla velocità in più punti di misura lungo il ripple. Difatti, come mostrato in alcune delle figure successive, in gran parte delle prove sono state sfruttate entrambe le configurazioni del supporto. Dalla Figura 4.30 alla Figura 4.33 sono riportate la composizione vettoriale delle velocità lungo la direzione y e z nei 5 o 9 punti di misura, a secondo della prova, lungo il ripple per tutta la colonna d'acqua indagata al variare dei parametri idrodinamici.

In particolare, la Figura 4.30a e la Figura 4.30b sono relative alle Run 44 e Run 39, rispettivamente ottenute per la condizione di sola onda (WO) e la condizione di onde e correnti (WC) aventi $d=0.4\text{m}$, $H=0.08\text{m}$, $T=2\text{s}$ e $U_c=0.21\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Come si evince dalla figura, in entrambe le condizioni di moto si individua la formazione di celle di ricircolo al fondo. Appare evidente che ad esempio, osservando la cella formatasi prima della cresta del ripple di destra avente senso antiorario, quando la corrente si sovrappone alla sola onda, l'entità di tale cella tende a ridursi in un'ellisse più piatta. Tale dimensione delle celle è stata stimata sulla base dei transetti di misura verticali disponibili; in particolare

dove la velocità media si inverte, è lì che si individua il contorno di una cella di ricircolo. In entrambi i casi (WO e WC) la cella si è formata al di sotto di $0.15 z/d$ e, in presenza di corrente, l'estensione di tale cella si è ridotta del 17%. Tale numero è calcolato come differenza percentuale tra le due diagonali minori dell'ellissi (ξ) del caso WO e WC.

A parità di periodo T e tirante idrico d , al crescere dell'altezza d'onda $H=0.12m$ (Figura 4.31) si forma una cella di ricircolo di entità maggiore rispetto al caso precedente (Figura 4.30); anche per questa condizione idrodinamica la presenza di corrente riduce la dimensione di tale cella.

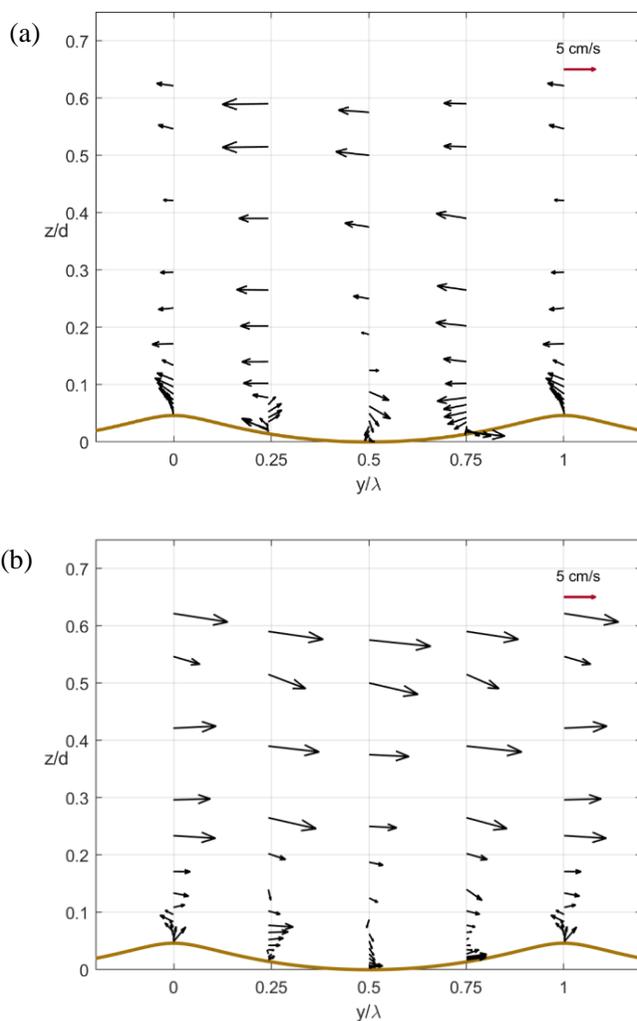


Figura 4.30 Formazione celle di ricircolo ($d=0.4m$, $H=0.08m$, $T=2s$ e $U_c=0.21m \cdot s^{-1}$). a) Run 44, WO; b) Run 39 WC (CD).

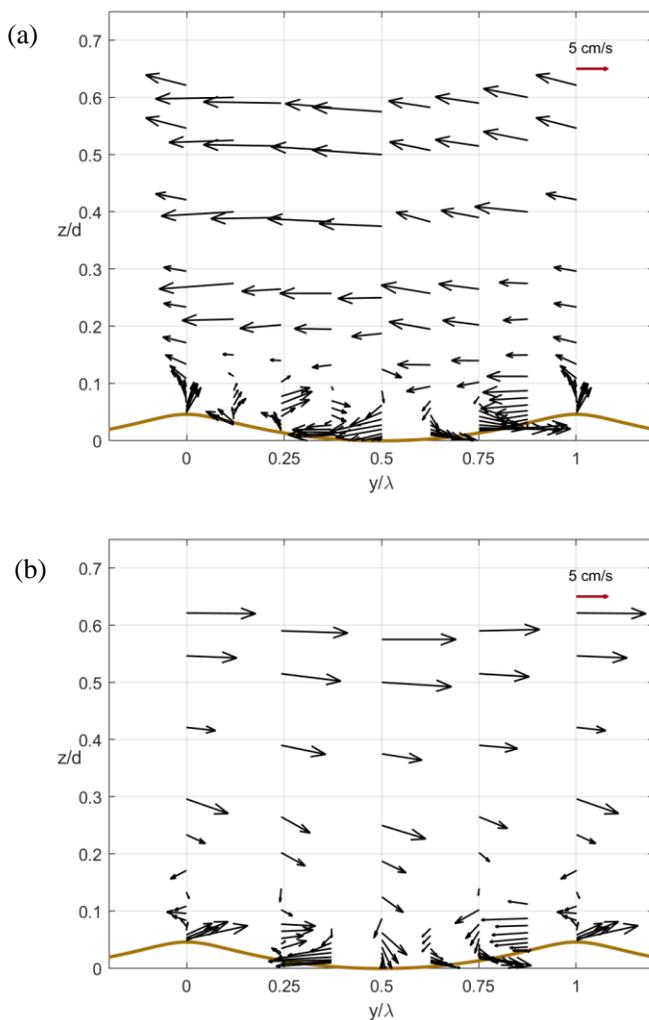


Figura 4.31 Formazione celle di ricircolo ($d=0.4\text{m}$, $H=0.12\text{m}$, $T=2\text{s}$ e $U_c=0.21\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). a) Run 45-66, WO; b) Run 41-61 WC (CD).

La Figura 4.32 e la Figura 4.33 sono relative a due prove aventi tirante idrico $d=0.6\text{m}$ ovvero $U_c=0.14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, la prima con $H=0.12\text{m}$ e $T=2\text{s}$ e la seconda con $H=0.08\text{m}$ e $T=1\text{s}$. Dal confronto tra i primi due casi esaminati con questi due casi si evince che la dimensione di tali celle è fortemente influenzata da tutti parametri idrodinamici (d , H e T). Difatti anche se nel primo caso a tirante idrico maggiore (Figura 4.32) si individua chiaramente la formazione della cella di ricircolo, quest'ultima è in dimensione ridotta rispetto al caso duale avente stessa altezza d'onda e periodo ma con tirante idrico più basso (Figura 4.31). Infine a parità di H (Figura 4.30 e Figura 4.33) nella prova con tirante idrico maggiore e periodo più piccolo non si individua completamente la formazione di tali celle.

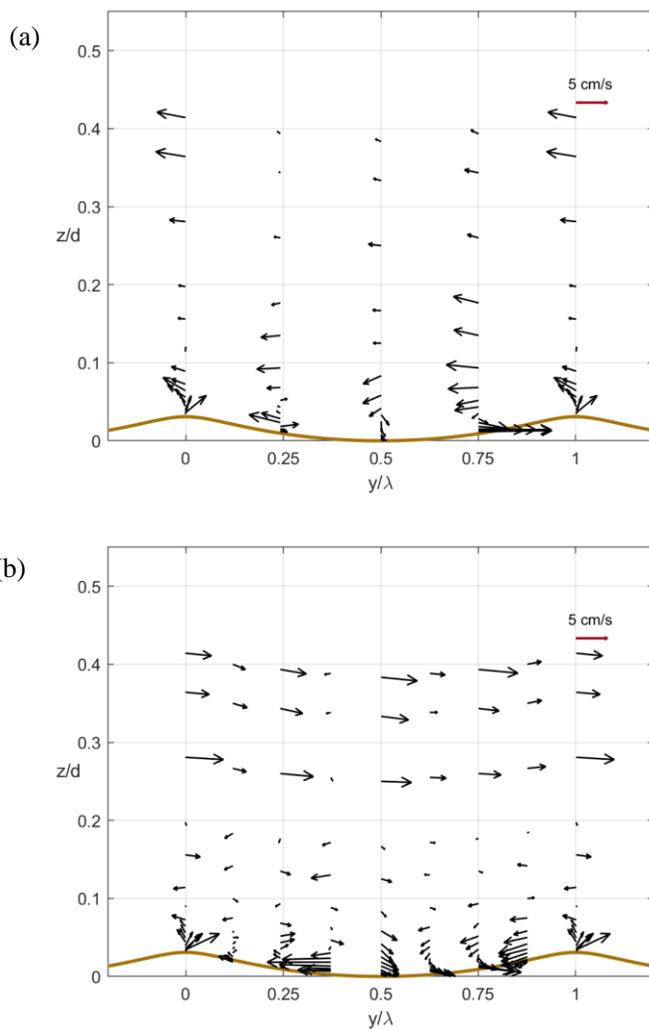


Figura 4.32 Formazione celle di ricircolo ($d=0.6\text{m}$, $H=0.12\text{m}$, $T=2\text{s}$ e $U_c=0.14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). a) Run 47, WO; b) Run 52-58 WC (WD).

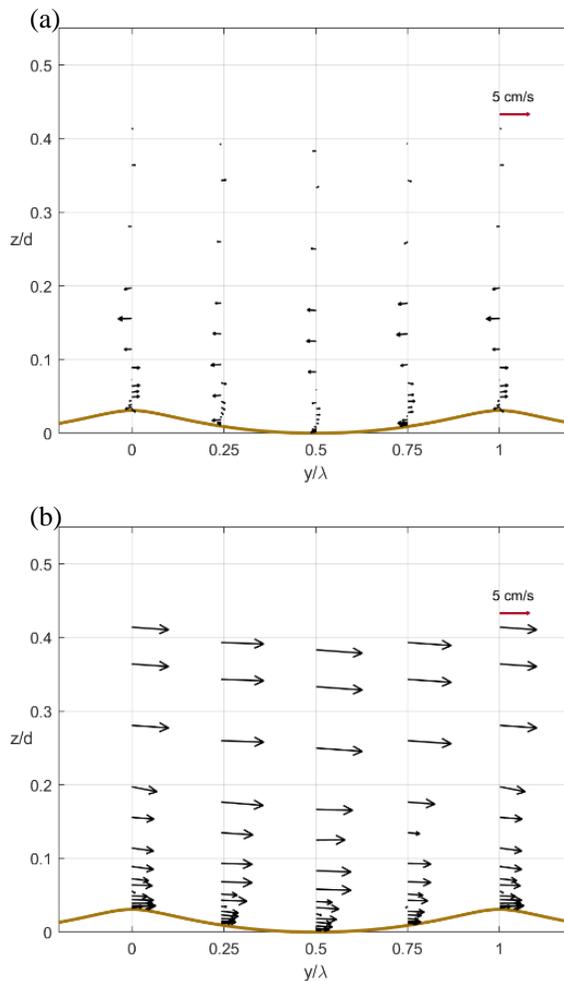


Figura 4.33 Formazione celle di ricircolo ($d=0.6\text{m}$, $H=0.08\text{m}$, $T=1\text{s}$ e $U_c=0.14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). a) Run 48, WO; b) Run 53 WC (CD).

Attraverso queste considerazioni appare chiaro che l'estensione di tali celle lungo la colonna d'acqua è funzione crescente tanto del periodo T che dell'altezza d'onda H ed inversamente proporzionale al tirante idrico d . Per tale ragione in Figura 4.34 viene riportato l'andamento del rapporto tra i due assi dell'ellisse che circonda la cella (ξ/ζ) formatasi in tutte le prove rispetto al parametro adimensionale (kd^3/LH). Tale parametro è funzione di tutti e tre i parametri idrodinamici caratteristici delle prove, avendo indicato con k il numero d'onda, con d la profondità d'acqua, con L la lunghezza d'onda e con H l'altezza d'onda target. Da questo grafico si individua che per valori di H grande e d piccolo le celle tendono ad avere una forma più circolare invece al crescere di kd^3/LH le celle tendono ad assottigliarsi ed assumere una forma più ellittica.

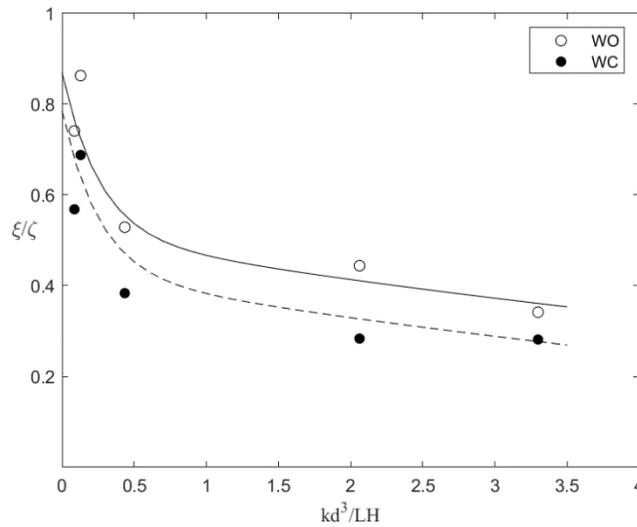


Figura 4.34 Rapporto tra le diagonali dell'ellissi della cella ξ/ζ al variare del parametro adimensionale kd^3/LH .

È stata individuata una legge interpolante di tipo esponenziale funzione dei parametri prima descritti. Le due curve si distinguono in funzione di un parametro legato alla velocità della corrente secondo la seguente legge:

$$\xi/\zeta = A \cdot e^{B(kd^3/LH)} + C \cdot e^{D(kd^3/LH)} - 10^6 \cdot Re_c$$

essendo Re_c il Reynolds della corrente e avendo indicato con

$$A = 0.35 \quad B = -3.83 \quad C = 0.51 \quad D = -0.11$$

In letteratura non sono molti gli studi inerenti la valutazione di tali celle; tra i pochi va ricordato Blondeaux et al. (1991) il quale, con uno studio numerico in presenza della sola onda ha trovato che la forma, l'intensità e la direzione delle celle di ricircolo dipendono da tre parametri, in particolare altezza del ripple (η), numero di Reynolds dello strato limite al fondo (R_δ) e numero d'onda del profilo inferiore (k) calcolato come:

$$R_\delta = \frac{U_o \delta}{\nu} \quad k = \frac{2\pi \delta}{\lambda} \quad \delta = \left(\frac{\nu T}{\pi}\right)^{1/2}$$

dove ν è la viscosità cinematica dell'acqua, δ lo spessore dello strato limite e U_o la velocità dell'onda orbitale target. Rispetto al presente studio, in condizioni simili a meno del numero di Reynolds (R_δ), le celle di ricircolo di Blondeaux hanno dimensioni inferiori sia in larghezza che in altezza. Tale differenza è probabilmente imputabile ai numeri di Reynolds, che nel presente studio ($R_\delta \cong 100$) sono circa 4 volte maggiori di quelli di Blondeaux ($R_\delta \cong 25$). Il senso di rotazione delle celle di ricircolo, invece, mantiene lo stesso andamento in entrambi gli studi.

In ultimo, partendo da tali analisi è stato possibile individuare la presenza di una rilevante corrente di ritorno o undertow. Difatti come appare ben chiaro in tutte le figure inerenti alla condizione di moto di sola onda, tale corrente di ritorno è individuabile ad ogni prova in modo più o meno evidente. Più precisamente, osservando ad esempio la Figura 4.30a da 0.2 z/d in poi, è visibile la presenza dell'undertow pari a $U_u=2.84$ cm/s. Quest'ultimo valore è stato calcolato come la velocità media dei cinque punti di misurazione lungo il ripple alla massima elevazione. Il valore di undertow riscontrato

Capitolo 4 - Campagna sperimentale e risultati ottenuti nel caso di onde e correnti ortogonali

sperimentalmente è circa il 30% in meno dell'undertow teorico U_t , in condizioni di fondo piano e liscio, calcolato come:

$$U_t = \frac{M}{\rho d} = 3.92 \text{ cm/s}$$

dove M è la velocità di trasporto di massa data dal rapporto tra l'energia dell'onda e la celerità ($M = E/C$), ρ la densità dell'acqua e d la profondità dell'acqua (Dean e Dalrymple, (1991)). Tale differenza dipende probabilmente dalla diversa scabrezza del fondo, ma potrebbero aver avuto un ruolo rilevante anche gli effetti 2D dovuti alla non uniformità della vasca nella direzione longshore.

La sovrapposizione della corrente, invece, allontanandosi dal fondo, compensa l'effetto di inversione di velocità e, quindi, l'undertow non è più individuabile (Figura 4.30b). Questo risultato è in accordo con il profilo di velocità già mostrato (Figura 4.21c). Infatti, come precedentemente detto, in direzione dell'onda, in entrambi i casi (CO e WC) è possibile osservare una componente di velocità positiva in direzione della spiaggia correlata alla presenza di una piccola corrente residua nella vasca.

Le stesse considerazioni fatte per la prova prima citata sono state estese a tutte le prove in condizioni di sola onda individuando un andamento crescente dell'undertow al variare di H/d . Di fatti osservando le analisi effettuate su tutte prove precedentemente mostrate, l'undertow risulta massimo per $d=0.4\text{m}$ $H=0.12\text{m}$ (Figura 4.31a) e minimo per $d=0.6\text{m}$ $H=0.08\text{m}$ (Figura 4.33a); tende a 0 per $H/d= 0.083$ cioè prova con tirante idrico maggiore e $H=0.05\text{m}$.

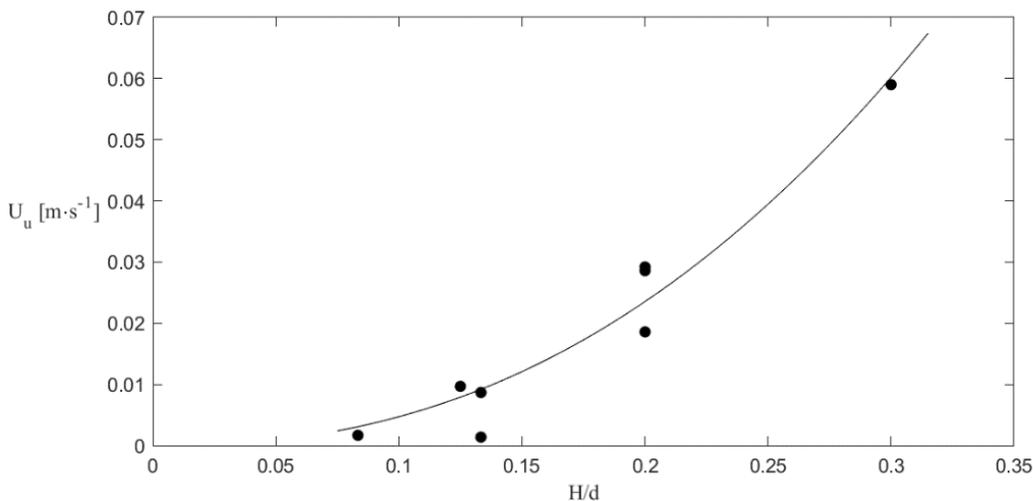


Figura 4.35 Corrente di ritorno (undertow) U_u al variare del rapporto H/d .

Interpolando il set di dati mostrati in Figura 4.35 è stata individuata una legge avente la seguente equazione

$$U_u = a \cdot \frac{H^b}{d}$$

avendo indicato con

$$a = 0.98 \quad b = 2.31$$

4.3.5 Vorticità

In questo paragrafo, poiché la conoscenza delle strutture vorticose è certamente utile per comprendere meglio la dinamica del trasporto di sedimenti su un letto con ripples, è riportato uno studio di vorticità calcolata a partire dei dati sperimentali come il rotore della velocità rispetto alle direzioni y e z .

Per ogni condizione idrodinamica sono stati selezionati due test con identica condizione di flusso acquisiti rispettivamente alla prima e alla seconda configurazione del carrello. In questo modo, sovrapponendo opportunamente le misure, è stato possibile ottenere 9 sezioni di misura verticali nella direzione di propagazione dell'onda lungo un unico ripple per 14 quote lungo la colonna d'acqua. Per infittire la griglia dei dati acquisiti, alla stessa quota lungo la colonna d'acqua, i dati sono stati interpolati linearmente calcolando così la vorticità su un totale di 17 sezioni trasversali verticali lungo un unico ripple.

La dinamica della vorticità sotto le onde di mare, tipica dei ripples, varia al variare della fase del ciclo dell'onda. Inoltre, come noto in letteratura, generalmente all'inizio si genera vorticità in senso orario lungo il profilo del letto ed in particolare in corrispondenza delle creste del ripple. Scandura et al. (2000) hanno mostrato attraverso uno studio numerico che all'interno di un'onda lo strato limite si ispessisce fino al distacco del vortice (Figura 3, Scandura et al. (2000)).

Partendo da questa considerazione e considerando che gli studi di letteratura che indagano tale aspetto sono pochi e perlopiù numerici, si è deciso di studiare la vorticità anche da un punto di vista sperimentale analizzando l'evoluzione di tali vortici in 8 fasi di un ciclo d'onda. In particolare nelle figure di seguito (Figura 4.36 e Figura 4.37) è riportato l'andamento della vorticità per la prova di solo onda (WO, colonna di sinistra) e per la duale prova di onde e corrente (WC, colonna di destra) in 8 fasi dell'onda partendo da $\pi/4$ fino a 2π ogni $\pi/4$, rispettivamente per due condizioni idrodinamiche differenti ($d=0.4\text{m}$, $H=0.12\text{m}$, $T=2\text{s}$ e $d=0.6\text{m}$, $H=0.08\text{m}$, $T=2\text{s}$).

La vorticità, adimensionalizzata rispetto al tempo T , è stata rappresentata per mezzo di un contour di iso-linee (filled contour plot) graficamente rappresentato per mezzo di una scala di colori da blu (valore massimo negativo, -100,) a rosso (valore massimo positivo, +100) rispettivamente correlata alla vorticità antioraria e oraria. La Figura 4.36 è relativa alle Run 45-66 e Run 41-61, rispettivamente WO e WC per le due configurazioni del supporto, aventi $d=0.4\text{m}$, $H=0.12\text{m}$, $T=2\text{s}$ e $U_c=0.21\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ nelle 8 fasi dell'onda indagate.

Per il caso di sola onda, già alla fase $\pi/4$ (Figura 4.36a) è possibile individuare un vortice positivo che si stacca dalla cresta di sinistra ed aumenta in intensità nella fase successiva dell'onda dove in corrispondenza della cresta di destra del ripple si individua un ampio vortice antiorario negativo che si estende fino a $0.2 z/d$ (Figura 4.36c). In condizioni di flusso simili, i risultati di Scandura et al. (2000) mostrano che il distacco del vortice è identificato a partire dalla fase $3/4 \pi$ mentre nel presente studio i vortici sono già identificabili alla fase $\pi/4$.

Capitolo 4 - Campagna sperimentale e risultati ottenuti nel caso di onde e correnti ortogonali

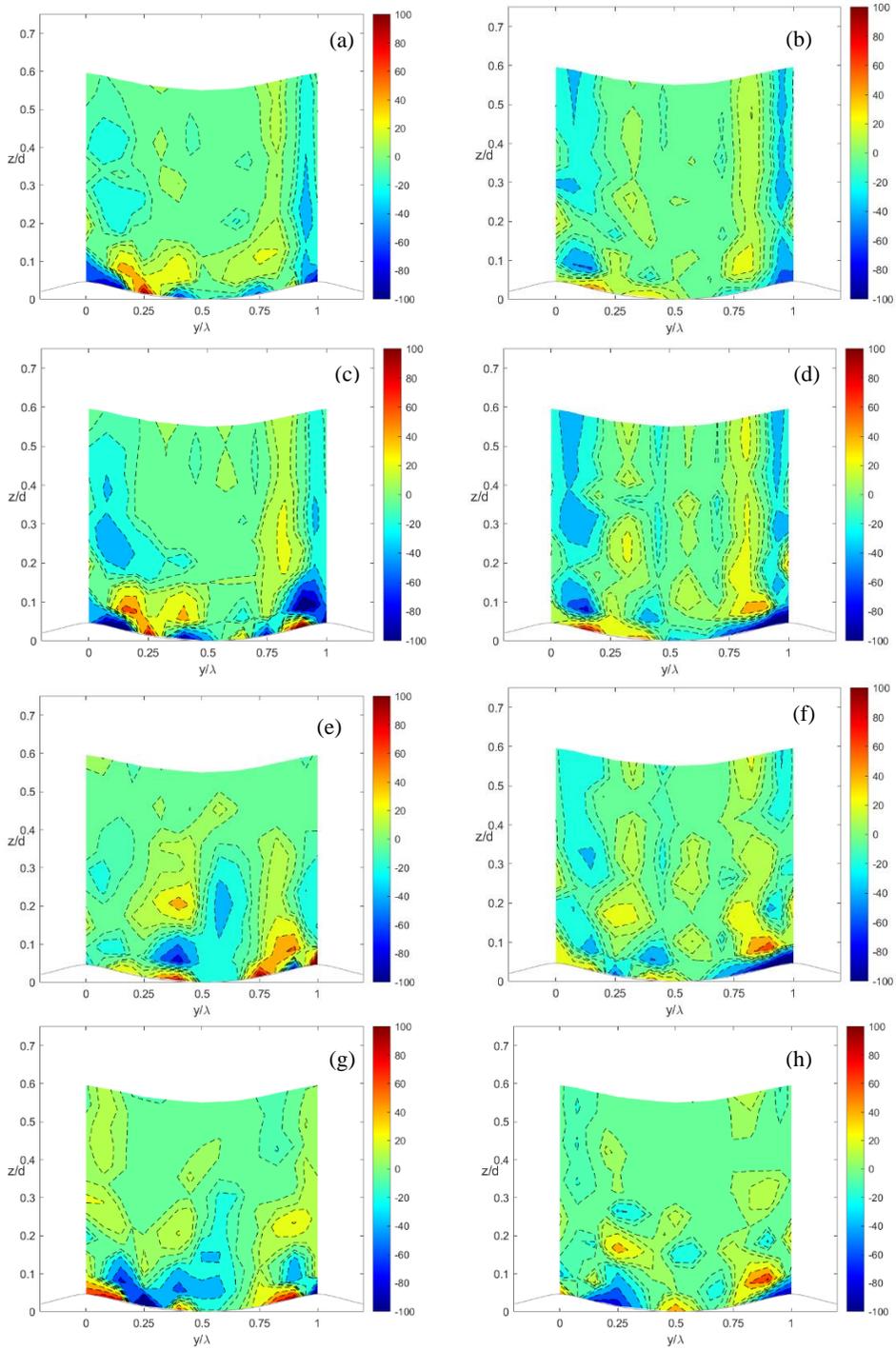


Figura 4.36 (continua)

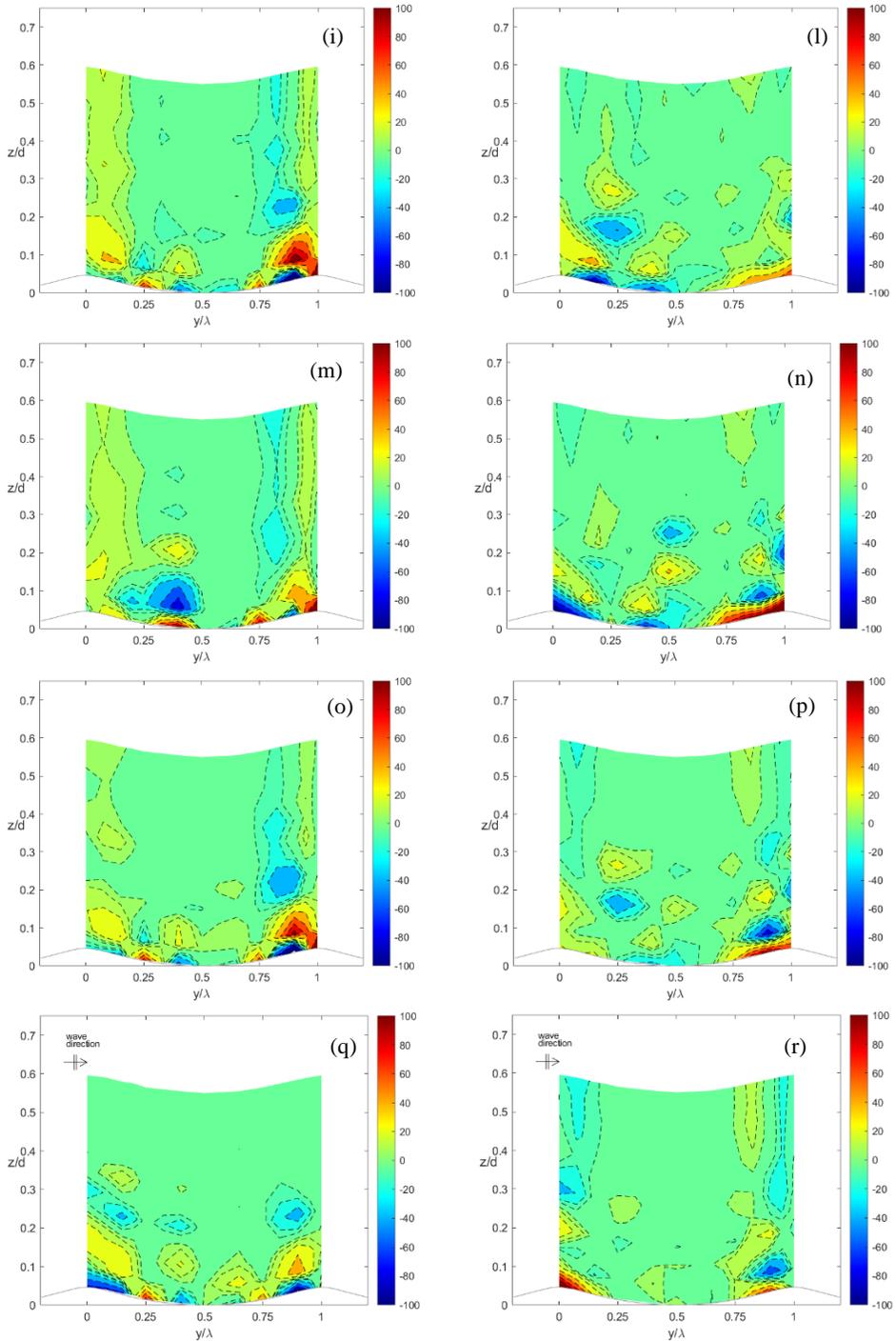


Figura 4.36 Campo di vorticità in diverse fasi del periodo d'onda per il caso di sola onda e onde e correnti ($d=0.4\text{m}$, $H=0.12\text{m}$, $T=2\text{s}$ e $U_c=0.21\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). a) caso WO fase $\pi/4$; b) caso WC fase $\pi/4$; c) caso WO fase $\pi/2$; d) caso WC fase $\pi/2$; e) caso WO fase $3/4\pi$; f) caso WC fase $3/4\pi$; g) caso WO fase π ; h) caso WC fase π ; i) caso WO fase $5/4\pi$; l) caso WC fase $5/4\pi$; m) caso WO fase $3/2\pi$; n) caso WC fase $3/2\pi$; o) caso WO fase $7/4\pi$; p) caso WC fase $7/4\pi$; q) caso WO fase 2π ; r) caso WC fase 2π .

Lungo la fase decrescente dell'onda da $3/4 \pi$ a $3/2 \pi$ (Figura 4.36e, g, i, m) tale vortice tende a ridursi fino che si riforma un vortice orario della stessa entità di quello individuato alla fase $\pi/2$ ma in segno positivo (Figura 4.36c e Figura 4.36o); a tal proposito appare quindi evidente la presenza di una simmetria tra le fasi opposte lungo il ciclo d'onda. Difatti oltre al caso individuato precedentemente, il vortice positivo che si riscontra tra le fasi $\pi/4$ e $\pi/2$ (Figura 4.36a-c) torna ad essere visibile con segno negativo alla fase opposta (Figura 4.36m) e il vortice positivo schiacciato lungo la cresta di sinistra individuato alla fase π (Figura 4.36g) riappare in segno negativo alla fase 2π (Figura 4.36q).

Nella colonna di destra della Figura 4.36 è possibile visualizzare il comportamento della vorticità nelle stesse fasi della colonna di sinistra ma per la prova di onde e correnti. Osservando le fasi da $\pi/4$ a π (Figura 4.36b, d, f, h) appare in modo chiaro che quando la corrente si sovrappone alla sola onda comporta una riduzione e uno schiacciamento dei vortici all'interno dello strato limite e un incremento della vorticità via via che ci si allontana dal fondo. In particolare confrontando la Figura 4.36c e la Figura 4.36d, il vortice che per il caso di sola onda si estende fino a $0.2z/d$ in presenza di corrente risulta schiacciato sulla cresta del ripple con un'estensione fino a $0.075 z/d$. Tali risultati trovano conferma nello studio numerico di Faraci et al. (2008), dove si sono riscontrate considerazioni simili; tale lavoro si è focalizzato sul comportamento dei vortici su una cresta del ripple in diverse fasi dell'onda all'interno dello strato limite; l'andamento della vorticità riscontrato con lo studio numerico sopra citato risulta comparabile in termini di segno col presente lavoro sperimentale sia confrontando le medesime fasi sia per gli effetti che la presenza della corrente induce. Difatti, anche in Faraci et al. (2008) si individua per fasi opposte, una simmetria e un decremento di vorticità in presenza di corrente.

I confronti tra il presente lavoro e studi precedenti sono strettamente correlati alla sola zona prossima al fondo in quanto non vi sono, a conoscenza di chi scrive lavori sperimentali o numerici che indagano l'intera colonna d'acqua. Attraverso il presente studio, già alla fase $\pi/4$, si individuano due vortici al di fuori dello strato limite, uno negativo e l'altro positivo, che si estendono paralleli lungo l'intera colonna d'acqua indagata sulla cresta di destra (Figura 4.36a); tali vortici a conferma di quanto precedentemente affermato risultano di entità maggiore nel caso WC (Figura 4.36b) rispetto al caso WO. Nelle fasi da $5/4\pi$ a $7/4\pi$ (Figura 4.36l, n, p, r) non si individua tale incremento di vorticità al di fuori dello strato limite. In corrispondenza della fase 2π , invece la vorticità torna ad avere, fuori dallo strato limite, entità maggiore in presenza di interazione onda-corrente rispetto al caso di sola onda.

Questo risultato trova un riscontro nella teoria di Sleath (1976) sul moto dei sedimenti in presenza di ripples. In particolare, per rapporti tra ampiezza d'onda (A) e lunghezza d'onda del ripple (λ) inferiori a 1 e per valori elevati dello spessore dello strato limite viscoso, si individuano lungo la colonna d'acqua due vortici di segno opposto. Queste condizioni sono verificate nel caso in esame poiché $A/\lambda = 0.2 \div 0.5$ e $Re_w \cong 15000$. In accordo con Sleath (1976), i due vortici opposti sono chiaramente riconoscibili nella maggior parte delle fasi, e sono generalmente responsabili del sollevamento dei sedimenti che dà luogo alla crescita del ripple.

La Figura 4.37 è una rappresentazione analoga alla figura precedente, inerente ad una prova avente un'altezza d'onda più piccola e un tirante idrico maggiore (Run 46-56, Run 50 $d=0.6m$, $H=0.08m$, $T=2s$ e $U_c=0.14m \cdot s^{-1}$).

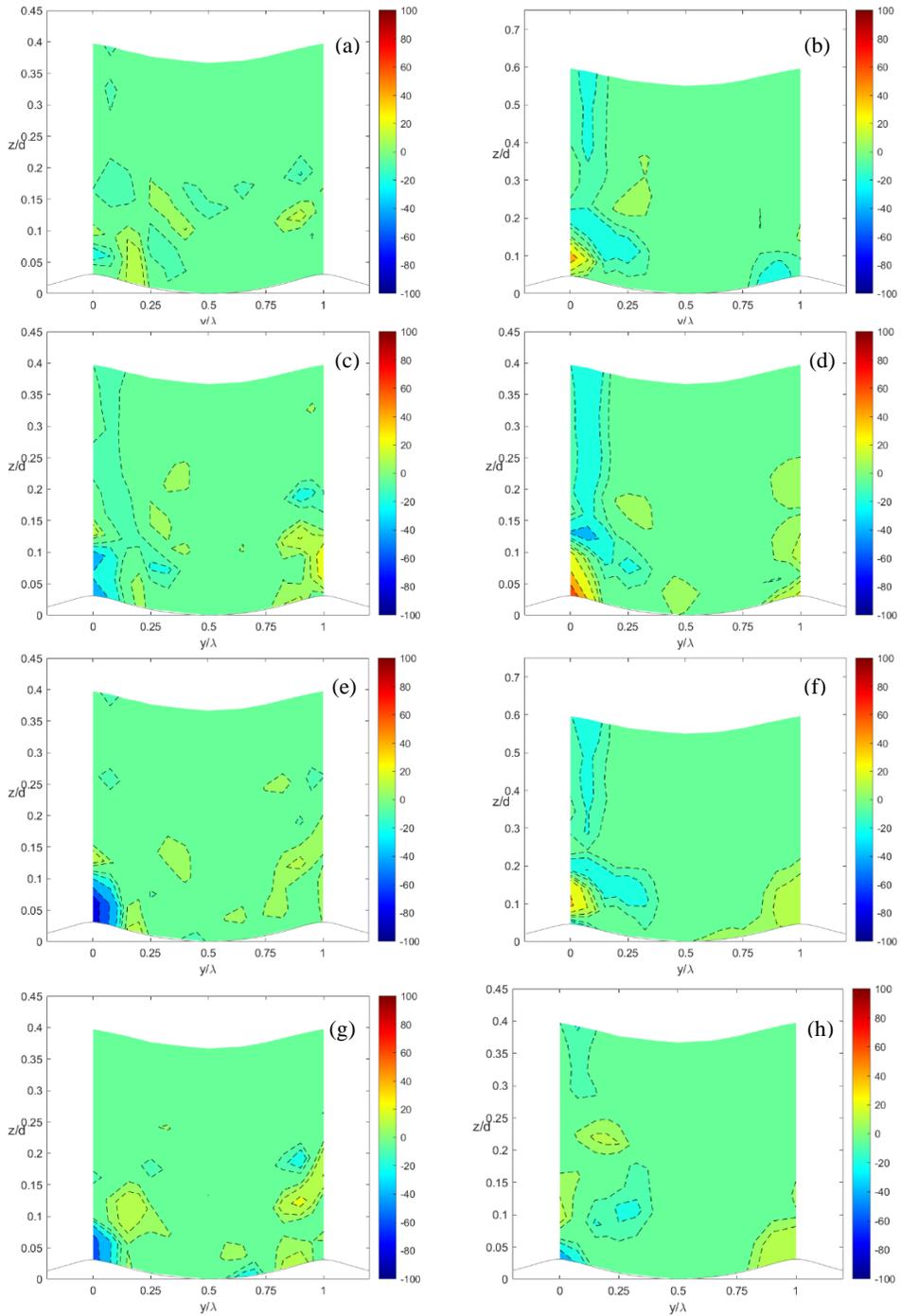


Figura 4.37 (continua)

Capitolo 4 - Campagna sperimentale e risultati ottenuti nel caso di onde e correnti ortogonali

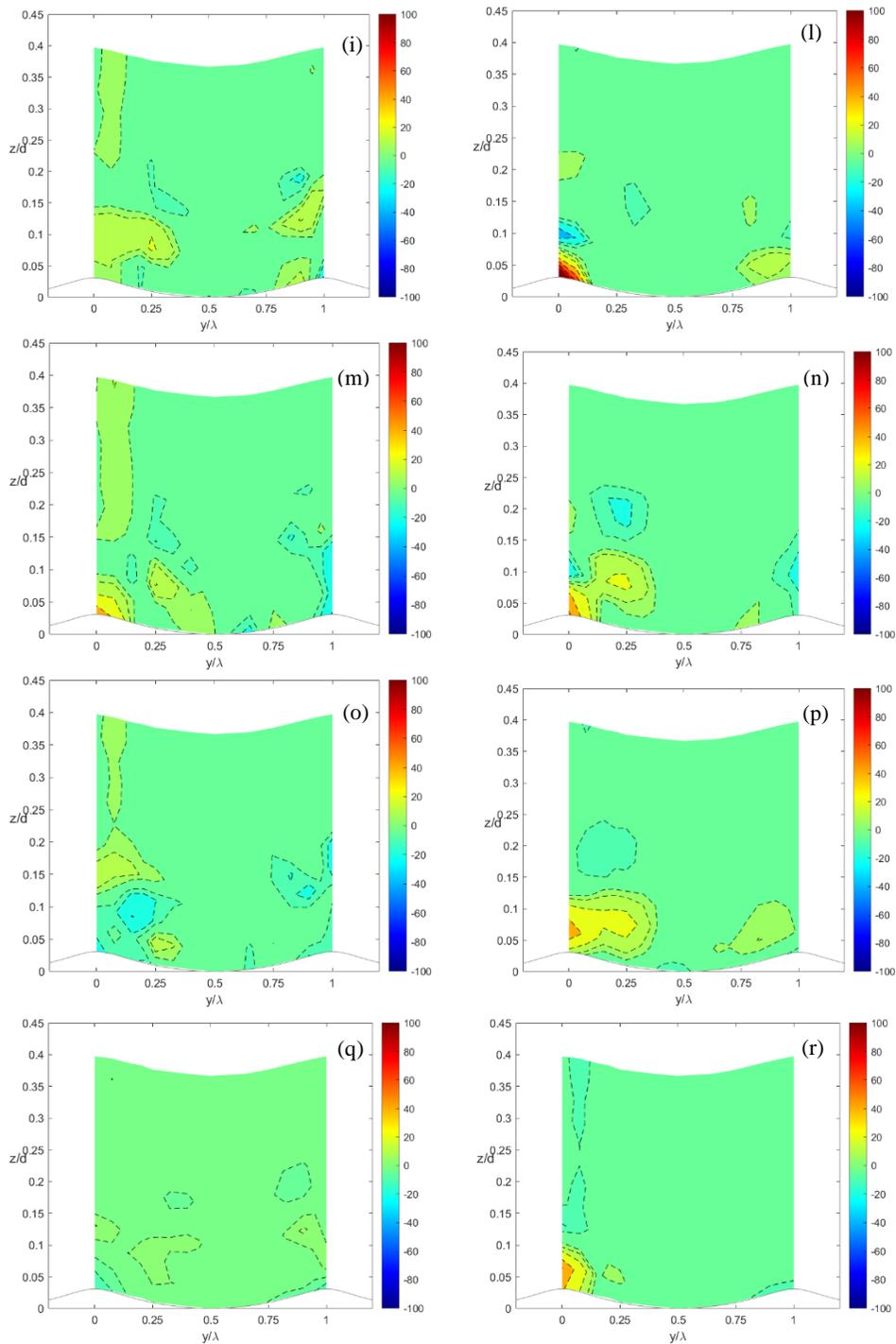


Figura 4.37 Campo di vorticità in diverse fasi del periodo d'onda per il caso di sola onda e onde e correnti ($d=0.6\text{m}$, $H=0.08\text{m}$, $T=2\text{s}$ e $U_c=0.14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). a) caso WO fase $\pi/4$; b) caso WC fase $\pi/4$; c) caso WO fase $\pi/2$; d) caso WC fase $\pi/2$; e) caso WO fase $3/4\pi$; f) caso WC fase $3/4\pi$; g) caso WO fase π ; h) caso WC fase π ; i) caso WO fase $5/4\pi$; l) caso WC fase $5/4\pi$; m) caso WO fase $3/2\pi$; n) caso WC fase $3/2\pi$; o) caso WO fase $7/4\pi$; p) caso WC fase $7/4\pi$; q) caso WO fase 2π ; r) caso WC fase 2π .

Per queste condizioni idrodinamiche, nonostante le considerazioni fatte precedentemente continuano ad essere per lo più soddisfatte, la vorticità assume valori nettamente inferiori rispetto alla prova precedentemente mostrata (Figura 4.36).

Più precisamente, confrontando ad esempio la Figura 4.37c e Figura 4.37m, relative rispettivamente alle fasi $\pi/2$ e $3/2\pi$, lo stesso vortice negativo che alla fase $\pi/2$ si stacca in corrispondenza della cresta di sinistra e si estende fino a $0.1 z/d$, alla fase $3/2\pi$ appare con la stessa entità a meno del segno. Inoltre confrontando la Figura 4.37c e Figura 4.37d, il vortice negativo che si estende lungo la colonna d'acqua cresce in entità in presenza di corrente rispetto al caso di sola onda.

Confrontando le due prove mostrate (Figura 4.36 e Figura 4.37) e mappando la vorticità sui dati sperimentali ottenuti in questa campagna lungo tutto il ciclo dell'onda, appare chiaro che l'entità della vorticità riscontrata a parità di periodo d'onda risulta influenzata dall'altezza d'onda e dal tirante idrico. Si è riscontrata una maggiore vorticità in corrispondenza delle prove aventi tirante idrico più basso e altezza d'onda più grande rispetto alle prove aventi tirante idrico più grande e altezza d'onda più piccola dove la vorticità è risultata minima o pressoché nulla.

Infine, la chiara e netta identificazione dei vortici non risulta sempre evidente e questo può essere legato al profilo dei ripples. Difatti, Horikawa e Mizutani (1992), confrontando nel loro modello due profili di ripples, il primo con creste affilate e l'altro con creste più tondeggianti, hanno mostrato che la separazione del flusso avviene all'inizio del semi-ciclo per le creste affilate, prima di quanto avvenga per le creste tonde. Hanno inoltre individuato che i vortici che si staccano in presenza di creste appuntite sono più grandi e con vorticità maggiore rispetto a quelli che si formano in presenza di creste arrotondate. A conferma di ciò, è possibile confrontare il presente studio con quello di Faraci et al. (2008) e Fredsøe et al. (1999); si riscontra nel nostro caso un comportamento all'interno dello strato limite molto simile a quello individuato da Faraci et al. (2008) in quanto le caratteristiche dei ripples sono le stesse ($\lambda=125\text{mm}$ $\eta=18.5\text{mm}$). Il profilo del ripple utilizzato in questa campagna sperimentale risulta essere meno appuntito di quello utilizzato da Fredsøe et al. (1999) dove, anche se non sempre in modo netto, il distacco dei vortici può essere individuato più facilmente e per quasi tutte le fasi.

In conclusione in quasi tutte le fasi dell'onda la presenza di corrente sulla sola onda induce un decremento di vorticità al fondo e un incremento via via che si allontana da esso e tra fasi opposte del ciclo è individuabile una buona simmetria della vorticità.

Capitolo 5

Campagna sperimentale e risultati ottenuti nel caso di onde e correnti collineari

5.1 Generalità

Presso il laboratorio di Idraulica e Costruzioni Idrauliche del Dipartimento di Ingegneria di Messina è stata condotta una campagna sperimentale riproducendo moti stazionari e oscillanti all'interno del tubo a U, apparecchiatura in dotazione del suddetto laboratorio. Tale apparato ha anche consentito di simulare contemporaneamente le due forzanti riuscendo a riprodurre esperimenti di interazione tra onde e correnti collineari su diversi fondali.

La conformazione dell'apparato consente di sostituire agevolmente il materiale costituente il fondale. A tal proposito, nella presente campagna, dopo una serie di prove preliminari atte all'individuazione delle prestazioni ottimali dell'apparecchiatura, sono state effettuate prove in presenza di fondo mobile e prove in presenza di fondo fisso (sabbia, ghiaia e ripples). In presenza di tutte le tipologie di fondali sono state effettuate prove di sola corrente (CO), prove di sole onde (WO) e prove di onde e corrente collineari (WC).

Poiché come già detto, si ritiene che le strutture vorticose che si sviluppano all'interno dello strato limite siano responsabili dell'innescio dei fenomeni di trasporto solido al fondo, viene nella prima parte di questo capitolo riportato lo studio dell'evoluzione dei ripples in presenza di fondo mobile sotto l'effetto di moti oscillanti e combinati (onde e corrente collineari) e l'individuazione dei vortici che si generano durante la fase del ciclo d'onda.

La seconda parte è invece inerente allo studio della scabrezza idraulica e della velocità d'attrito, in presenza di onde e correnti collineari al variare delle tre tipologie di

fondali, i cui parametri sono stati individuati per via indiretta per mezzo dell'indagine dei profili di velocità tramite velocimetro acustico.

5.2 Campagna condotta

5.2.1 Esperimenti preliminari

Le prove preliminari, effettuate in presenza di fondo liscio, hanno avuto come obiettivo quello di comprendere quali siano i parametri da imporre al pistone che genera il moto oscillante, in modo da individuare le sue prestazioni ottimali.

Sono stati effettuati 27 test al variare di ampiezza ($a=0.1 \div 1.25$ Volt) e frequenza ($f=0.1 \div 0.8$ Hz) del pistone. Da queste informazioni e conoscendo la massima escursione del pistone in termini di Volt e cm, 3.5 V con 40 cm rispettivamente, è stato possibile ad ogni prova, per mezzo di una semplice proporzione, ricavare in relazione al parametro di input (a in Volt) la corrispondente escursione totale in cm del pistone (h^*). Nota tale quantità è stato possibile calcolare il volume della colonna verticale di fluido mobilitata dal pistone (V_c) e l'area della sezione trasversale dell'impianto (S) ricavando così l'ampiezza di oscillazione nella sezione trasversale (A) come semi-rapporto tra le due precedenti quantità ($A = V_c/S \cdot 1/2$). Nota l'ampiezza dell'onda è stato possibile determinare la velocità orbitale dell'onda ($u_0 = A \cdot \omega$) e il numero di Reynolds corrispondente avendo indicato con ν la viscosità cinematica del fluido ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$):

$$Re = \frac{u_0 \cdot A}{\nu}$$

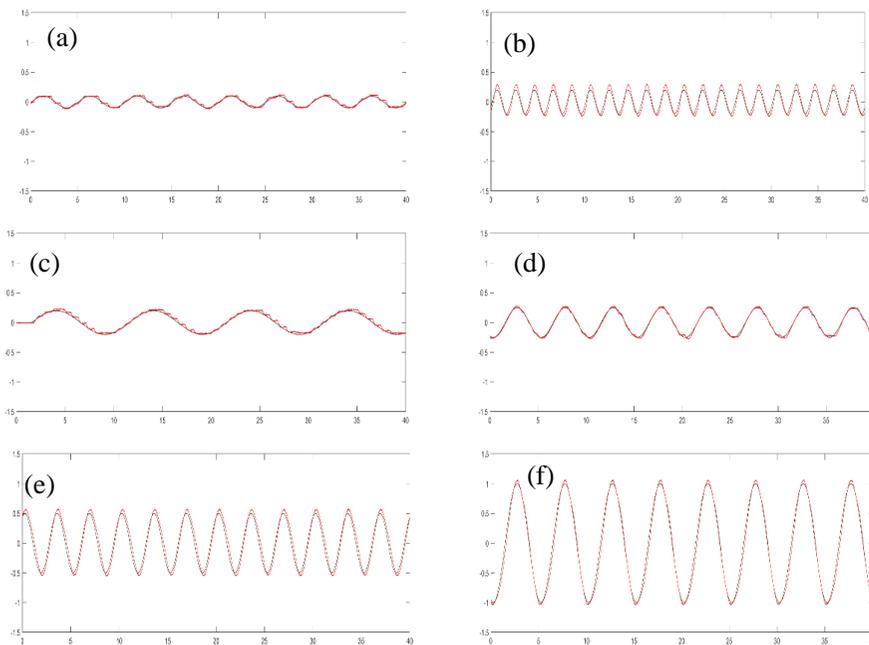


Figura 5.1 Segnali input (linea nera) e output (linea rossa) per i tre range individuati (rosso, giallo e verde vedi Figura 5.2). a) zona rossa $f=0.2\text{Hz}$ $a=0.2\text{V}$; a) zona rossa $f=0.5\text{Hz}$ $a=0.25\text{V}$; c) zona gialla $f=0.1\text{Hz}$ $a=0.5\text{V}$; d) zona gialla $f=0.2\text{Hz}$ $a=0.5\text{V}$; e) zona verde $f=0.3\text{Hz}$ $a=0.5\text{V}$; f) zona verde $f=0.2\text{Hz}$ $a=0.75\text{V}$.

In prima analisi sono stati individuati i corretti parametri da assegnare alle oscillazioni, tramite il Software dedicato (GefraN), per ridurre l'errore fra il segnale impostato (input) e quello generato dal sistema (output).

In Figura 5.1 vengono riportati alcuni dei segnali di input e output relativi a determinate prove, mentre in Figura 5.2, calcolando l'errore percentuale tra i due segnali (ε_r compreso tra 0.1 e 9%), è stato rappresentato il range di funzionamento del “tubo a U” tramite uno schema diviso per aree. Tale errore è stato determinato come media temporale delle singole differenze tra il segnale di input (linea nera in Figura 5.1) e il segnale restituito di output (linea rossa in Figura 5.1), diviso per il valore assoluto del segnale di input, moltiplicato per 100.

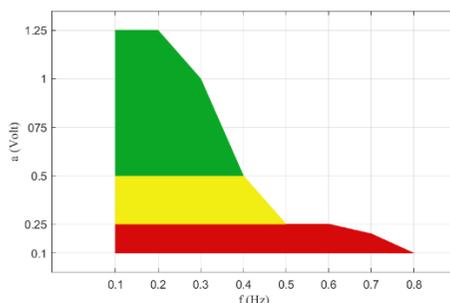


Figura 5.2 Range funzionamento “tubo a U”.

Tabella 5.I Esperimenti preliminari: parametri di input (a e f) e calcolati (h^* , V_c , A , u_0 , Re , ε_r).

$Test_U$	f [Hz]	a [V]	h^* [m]	V_c [m ³]	A [m]	u_0 [m·s ⁻¹]	Re	ε_r (%)
1	0.1	0.2	0.046	0.020	0.041	0.026	1054	2.545
2	0.1	0.25	0.057	0.025	0.051	0.032	1647	2.374
3	0.1	0.5	0.114	0.049	0.102	0.064	6589	1.031
4	0.1	0.75	0.171	0.074	0.154	0.097	14824	0.522
5	0.1	1	0.229	0.098	0.205	0.129	26354	0.671
6	0.1	1.25	0.286	0.123	0.256	0.161	41178	0.364
7	0.2	0.1	0.023	0.010	0.020	0.026	527	8.91
8	0.2	0.2	0.046	0.020	0.041	0.051	2108	2.815
9	0.2	0.25	0.057	0.025	0.051	0.064	3294	1.620
10	0.2	0.5	0.114	0.049	0.102	0.129	13177	0.495
11	0.2	0.75	0.171	0.074	0.154	0.193	29648	0.247
12	0.2	1	0.229	0.098	0.205	0.257	52708	0.702
13	0.2	1.25	0.286	0.123	0.256	0.322	82357	1.250
14	0.3	0.2	0.046	0.020	0.041	0.077	3162	2.405
15	0.3	0.25	0.057	0.025	0.051	0.097	4941	1.344
16	0.3	0.5	0.114	0.049	0.102	0.193	19766	0.114
17	0.3	0.75	0.171	0.074	0.154	0.290	44473	1.475
18	0.3	1	0.229	0.098	0.205	0.386	79062	1.423
19	0.4	0.2	0.046	0.020	0.041	0.103	4217	2.265
20	0.4	0.25	0.057	0.025	0.051	0.129	6589	1.534
21	0.4	0.5	0.114	0.049	0.102	0.257	26354	0.977
22	0.4	0.75	0.171	0.074	0.154	0.386	59297	3.210
23	0.5	0.2	0.046	0.020	0.041	0.129	5271	1.925
24	0.5	0.25	0.057	0.025	0.051	0.161	8236	1.202
25	0.6	0.2	0.046	0.020	0.041	0.154	6325	1.570
26	0.7	0.2	0.046	0.020	0.041	0.180	7379	1.705
27	0.8	0.1	0.023	0.010	0.020	0.103	2108	2.890

Capitolo 5 - Campagna sperimentale e risultati ottenuti nel caso di onde e correnti collineari

Come riportato in Tabella 5.I, si è individuato che la miglior risposta del segnale (zona verde nella Figura 5.2) si ottiene in corrispondenza di frequenze comprese tra 0.1 e 0.4 Hz e per ampiezze maggiori o uguali a 0.5 V. In particolare, il minimo errore percentuale tra segnale di input e output si ottiene in corrispondenza del $Test_U_{11}$ e $Test_U_{16}$ mostrati in grassetto in Tabella 5.I e rispettivamente nella Figura 5.1f e nella Figura 5.1e.

5.2.2 Esperimenti Condotti

Partendo dalle considerazioni fatte attraverso gli esperimenti preliminari, nella prima parte della campagna sperimentale sono state effettuate una prova di sola corrente (CO), 4 prove di sola onda (WO) e 3 prove di onde e correnti (WC) in presenza di fondo mobile volte ad individuare le caratteristiche delle forme di fondo generate, e 4 di sola corrente una di sola onda e una di onde e correnti rispettivamente per i tre fondi fissi con sabbia, ghiaia e ripples. Inoltre in presenza di fondo con ripples le misure sono state effettuate lungo 3 punti di misura lungo il profilo del ripple (cresta, intermedio e cavo). Si sono indicate con Run_m le prove inerenti al fondo mobile e con Run_f le prove inerenti a fondo fisso.

Tabella 5.II Parametri adottati durante la campagna per le prove su fondo mobile.

Run_m	Tipo	f [Hz]	a [V]	c [giri/s]
1	CO	-	-	10
2	WO	0.2	0.75	-
3	WO	0.3	0.5	-
4	WO	0.3	0.75	-
5	WO	0.3	1	-
6	WC	0.2	0.75	10
7	WC	0.3	0.5	10
8	WC	0.3	0.75	10

Tabella 5.III Parametri adottati durante la campagna per le prove su fondo fisso (sabbia, SB; ghiaia, GB; ripples, RB).

Nome e Tipologia Fondale		Condizioni idrodinamiche associate ad ogni Fondo			
Run_f	Fondo	Tipo	f [Hz]	a [V]	c
1÷6	SB	CO	-	-	10
7÷12	GB	CO	-	-	13
13÷18	RB _{cresta}	CO	-	-	15
19÷24	RB _{intermedio}	CO	-	-	20
25÷30	RB _{cavo}	WO	0.3	0.5	-
		WC	0.3	0.5	10

Per le prove con fondo mobile, come già accennato nel paragrafo 3.5.3, le misure sono state effettuate per mezzo di una videocamera disposta ortogonalmente rispetto alla parete verticale in vetro del tubo con la quale si è acquisito l'intero evolversi delle forme

di fondo. Il tempo di acquisizione per le prove su fondo mobile è stato fissato pari a 10 min (tempo limite di utilizzo in continuo del pistone).

Per le prove con fondo fisso invece, si è acquisito per mezzo di un Vectrino Profiler un profilo di velocità che si estende dal fondo fino a circa 15 cm da esso, in funzione sia del tipo di fondo presente sia dei limiti fisici della strumentazione all'interno del canale. Per le prove su fondo fisso i tempi di acquisizione sono stati di 2 minuti per le prove di sola corrente per ogni posizione del Vectrino e di 5 min per le prove di sola onda e onda e corrente. Per queste ultime due tipologie di prove per considerare esclusivamente un processo a regime è stato eliminato il primo e l'ultimo minuto della prova per un totale effettivo di 3 minuti di dati.

La posizione esatta lungo la verticale per la disposizione del Vectrino è stata ottenuta combinando l'informazione restituita dal Vectrino relativa alla distanza dal fondo (bottom distance) con quella fornita da delle aste graduate collocate verticalmente ed orizzontalmente sul vetro esterno della vasca come mostrato nella Figura 5.3a. Vista la disomogeneità del fondo con ghiaia legata alla variabilità della forma delle singole pietre, si riporta l'esatta posizione del Vectrino sul fondo con ghiaia (vedi Figura 5.3b); tale informazione è stata omessa nel caso di fondo con sabbia vista l'omogeneità della distribuzione dei grani.

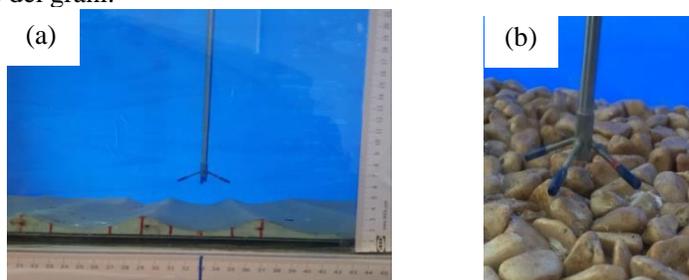


Figura 5.3 Posizione Vectrino in corrispondenza del fondo all'interno della vasca. a) cavo del ripple; b) fondo con ghiaia.

Al fine di evitare le problematiche legate ai limiti del Vectrino come già esposto nel precedente capitolo (paragrafo 3.5.2), è stato fatto variare lungo la colonna d'acqua la velocity range, compreso tra 0.7 e 2.5, mentre si è mantenuta sempre costante la frequenza di acquisizione pari a 100 Hz. A titolo di esempio si riporta una tabella “tipo” del Logbook organizzato per l'intera campagna (Run_f 13, 11 elevazioni, Prova RB, forzante CO, Posizione Cresta).

Tabella 5.IV Esempio dei parametri di settaggio per esperimenti condotti su una generica Run_f (Run13).

Run_f	Distanza dal fondo	$Z_{misurata}$	Velocity Range
13_1	18	14.5÷11.5	0.7
13_2	16.5	12.5÷9.5	0.7
13_3	15	11÷8	1
13_4	14	10÷7	1
13_5	12.5	8.5÷5.5	1
13_6	11.5	7.5÷4.5	1
13_7	10.5	6.5÷3.5	2
13_8	9	5÷2	2
13_9	8	4÷1	2.5
13_10	7	3÷0	2
13_11	6	2÷0	2

5.3 Analisi dei Risultati

5.3.1 Fondo Mobile

In questo paragrafo si riportano i risultati ottenuti dall'analisi dei dati acquisiti in presenza di fondo mobile. Più specificamente, nella prima parte è stata analizzata l'evoluzione delle forme di fondo, successivamente, per una prova caratteristica, si è proceduto con l'individuazione della formazione di vortici durante le fasi del ciclo dell'onda.

5.3.1.1 Generazione delle forme di fondo

È stata studiata l'evoluzione temporale di un fondo piano costituito da sabbia ($d_{50}=0.125\text{mm}$), sottoposto ad un campo di moto caratterizzato sia dalla presenza di sola onda sia dalla contemporanea presenza di onde e correnti collineari. In particolare, imposta una condizione iniziale uguale in ogni prova di fondo con sabbia opportunamente livellato (Figura 5.4a), è stato generato all'interno del tubo a U un campo di moto (solo onda o onda e corrente) osservando, per mezzo di una videocamera, le modifiche subite nel tempo dalla superficie costituente il fondale (Figura 5.4b-c).

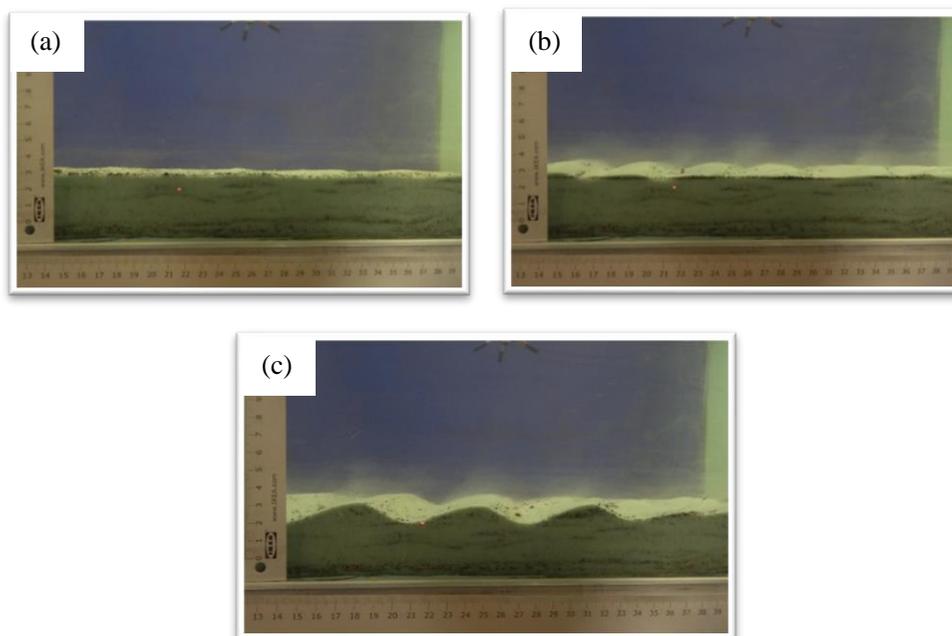


Figura 5.4 Evoluzione temporale del fondo con formazione dei ripples Run_m 7. a) fase iniziale t_0 ; b) fase intermedia t_{320s} ; c) fase finale t_{600s} .

I video acquisiti sono stati suddivisi in frame (di cui ne è stato selezionato 1 ogni 10 sec) e per ogni frame, ricostruendo una griglia di misura coerente con le aste graduate precedentemente incollate sul vetro usate come sistema di riferimento, come mostrato in Figura 5.5, è stato possibile studiare l'andamento temporale delle due grandezze caratteristiche del ripple (lunghezza, $\lambda_t(t)$ e altezza $\eta_t(t)$). Questi due parametri sono stati determinati come la media dei parametri (altezza e lunghezza del singolo ripple) individuabile in ognuna delle immagini ottenute nell'arco temporale dell'esperimento.

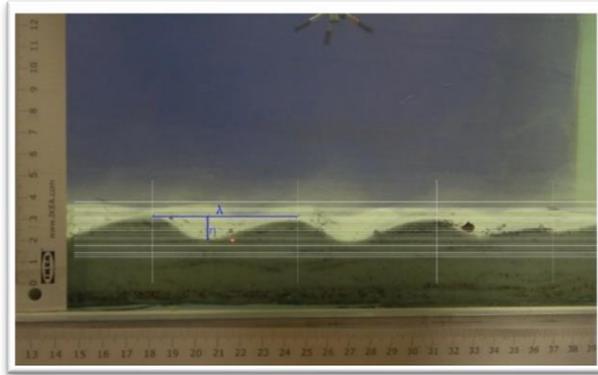


Figura 5.5 Costruzione della griglia per la misurazione delle grandezze caratteristiche del ripple (λ_t e η_t)

L'andamento di queste due grandezze nel tempo (λ_t e η_t) è stato studiato per tutte le prove effettuate; vengono riportati i casi più rappresentativi (Run_m 2, Run_m 3, Run_m 6, Run_m 7) in quanto, a differenza di queste, le restanti prove non ricadono nel range di parametri di Shields entro cui ci si aspetta la completa formazione delle forme di fondo; difatti in tali prove o tali forme non si sono completamente generate o per tutta la durata della prova presentavano continue variazioni in range molto ampi senza mai stabilizzarsi del tutto. In presenza di sola corrente (Run_m 1), come ci si aspettava, non si sono formate forme di fondo di nessun tipo ma si è individuata solo una migrazione dei granelli di sabbia costituenti il fondale.

In Figura 5.6 è riportato l'andamento della lunghezza d'onda del ripple al variare del tempo; nella colonna di sinistra sono riportate due prove in presenza di sola onda (Run_m 2 e Run_m 3, nella colonna di destra sono riportate due prove aventi le stesse caratteristiche in termini di frequenza f e ampiezza a di quelle riportate a sinistra, ma in presenza di onde e correnti collineari (Run_m 6 e Run_m 7). In particolare si nota che in presenza di onde e correnti sono necessari tempi più lunghi affinché le forme di fondo si stabilizzino rispetto al caso di sole onde in entrambi i casi analizzati. Inoltre confrontando le due prove WO e WC con $f=0.2\text{Hz}$ e $a=0.75\text{V}$ $c=10$ giri/s (Run_m 2 e Run_m 6, Figura 5.6a-b) si nota un incremento della lunghezza del ripple nel caso WC rispetto al caso WO mentre questo non avviene per le prove con $f=0.3\text{Hz}$ e $a=0.5\text{V}$ (Run_m 3 e Run_m 7, Figura 5.6c-d) dove a regime la lunghezza del ripple rimane pressoché invariata intorno a 6 cm.

Osservando l'altezza del ripple al variare del tempo (Figura 5.7) si nota che, l'altezza tende a crescere fino a stabilizzarsi raggiungendo valori leggermente più grandi in presenza di onde e correnti rispetto al caso di sole onde.

Come già detto, per entrambi i parametri (altezza e lunghezza) tale incremento è leggermente più accentuato per la prova con ampiezza d'onda più grande; più specificamente in relazione alla lunghezza del ripple, dove si nota maggiore scostamento tra i due casi, tale incremento da WO a WC è pari al 14% e all' 8% rispettivamente per le prove con $f=0.2\text{Hz}$ e $a=0.75\text{V}$ e $f=0.3\text{Hz}$ e $a=0.5\text{V}$. Questo è probabilmente legato al fatto che la presenza delle due forzanti collineari, onda e corrente, può comportare un incremento complessivo degli sforzi tangenziali agenti sul fondo che generano ripples aventi lunghezza e altezza caratteristica più grande.

Capitolo 5 - Campagna sperimentale e risultati ottenuti nel caso di onde e correnti collineari

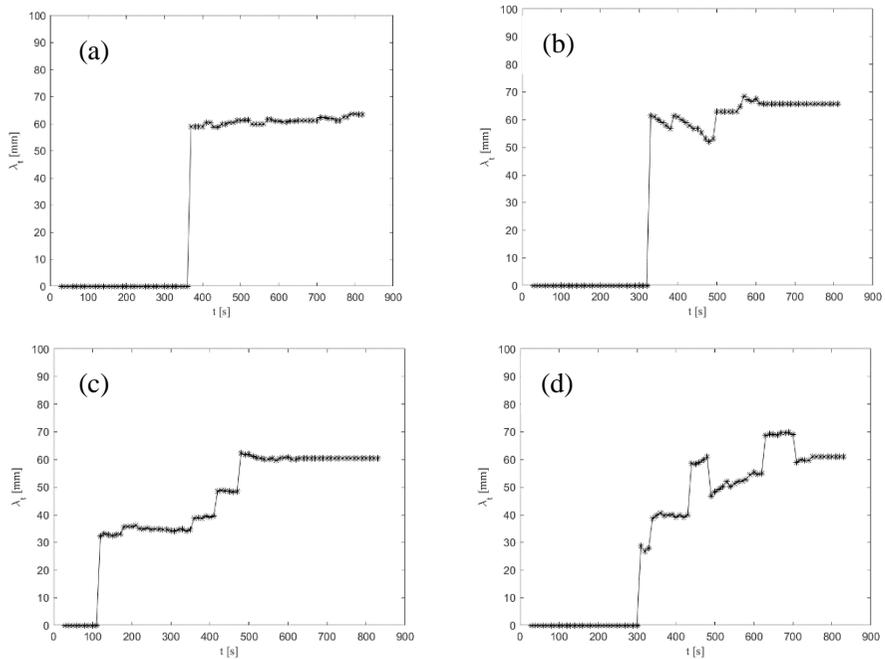


Figura 5.6 Andamento della lunghezza del ripple in funzione del tempo. a) Run_m 2, Prova WO f=0.2 Hz a= 0.75 V; b) Run_m 6, Prova WC f=0.2Hz a= 0.75V c=10 giri/s; c) Run_m 3, Prova WO f=0.3 Hz a= 0.5 V; d) Run_m 7, Prova WC f=0.3Hz a= 0.5V c=10 giri/s.

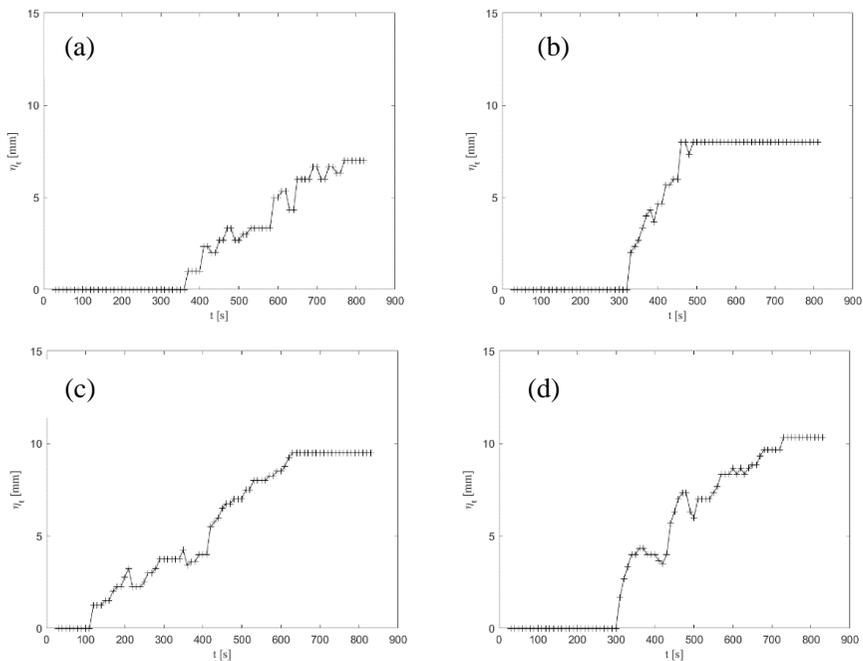


Figura 5.7 Andamento dell'altezza del ripple in funzione del tempo. a) Run_m 2, Prova WO f=0.2 Hz a= 0.75 V; b) Run_m 6, Prova WC f=0.2Hz a= 0.75V c=10 giri/s; c) Run_m 3, Prova WO f=0.3 Hz a= 0.5 V; d) Run_m 7, Prova WC f=0.3Hz a= 0.5V c=10 giri/s.

Tale risultato trova conferma nel lavoro sperimentale effettuato da Petrotta et al. (2018) i quali hanno condotto uno studio dell'evoluzione delle forme di fondo all'interno di una canaletta su un tratto orizzontale (*P1*) e su un tratto inclinato (*P2*).

La presenza di un tratto inclinato genera una corrente in direzione crossshore che quindi può essere assimilata al caso di onde e correnti collineari qui preso in considerazione; vicino al fondo, l'accelerazione in direzione on-shore è maggiore di quella in direzione offshore, dando luogo al fenomeno noto come acceleration skewness (Scandura et al., (2016)). Tale fenomeno influisce sull'idrodinamica, generando un'importante corrente di deriva, che a sua volta influenza il trasporto solido costiero (Hsu e Hanes (2004)). Anche nel lavoro sopra citato (Petrotta et al. 2018) la lunghezza dei ripples tende ad assumere valori più grandi nel tratto inclinato rispetto al tratto orizzontale coerentemente a quanto osservato nei test WC rispetto al caso di sola onda del presente lavoro.

L'altezza del ripple che, in una delle due prove del presente lavoro, presenta un leggero incremento in presenza di corrente, nello studio di Petrotta et al. (2018) tende ad assumere valori pressoché costanti in entrambi i tratti.

In Tabella 5.V vengono riportati i parametri dimensionali e adimensionali, determinati per le prove sopra citate, usualmente considerati per lo studio della dinamica dei ripples. In particolare, per ogni prova si riportano il tipo di forzanti utilizzate, la frequenza e l'ampiezza (f e a) del pistone, il n° dei giri della pompa c , l'ampiezza orbitale e la relativa velocità (A e u_0), le caratteristiche dei ripples (η e λ) e i parametri non dimensionali (Re_w , Re_d e ψ).

- $Re_w = \frac{u_0 A}{\nu}$: numero di Reynolds del flusso
 - $Re_d = \frac{u_0 d_{50}}{\nu}$: numero di Reynolds dei sedimenti
 - $\psi = \frac{u_0^2}{(s-1)gd_{50}}$: numero di mobilità
- con $s = \frac{\rho_s}{\rho} = 2.65$ la densità relativa dei sedimenti

Tabella 5.V Parametri dimensionali e adimensionali della campagna sperimentale su fondo mobile.

Run_m	Tipo	f [Hz]	a [V]	c [giri/s]	A [cm]	u_0 [cm·s ⁻¹]	η [cm]	λ [cm]	Re_w	Re_d	ψ
2	WO	0.2	0.75	-	15.36	19.30	0.7	6.35	29648	24	18.41
3	WO	0.3	0.5	-	10.24	19.30	0.95	6.05	19766	24	18.41
6	WC	0.2	0.75	10	15.36	19.30	0.8	6.56	29648	24	18.41
7	WC	0.3	0.5	10	10.24	19.30	1.1	6.11	19766	24	18.41

In Figura 5.8 vengono sovrapposti i risultati del presente studio, aventi $\psi < 20$, con le curve predittive di Nielsen (1981) e Grasmeyer et al. (2004) e i dati sperimentali ottenuti nei lavori di Faraci et al. (2002), Bosman et al. (1981) e Petrotta et al. (2018) in un grafico in scala logaritmica che descrive le grandezze geometriche dei ripples. In particolare nella Figura 5.8a e nella Figura 5.8b vengono riportati rispettivamente l'andamento del rapporto tra la lunghezza dei ripples e l'ampiezza orbitale dell'onda e il rapporto tra l'altezza dei ripples e l'ampiezza orbitale dell'onda in funzione entrambi del numero di mobilità. I dati del presente studio mostrano una dispersione simile agli altri set di dati, in particolar modo tendono ad assumere valori pressoché simili a quelli di Faraci et al. (2002) sia in termini di lunghezza che di altezza dei ripples.

Capitolo 5 - Campagna sperimentale e risultati ottenuti nel caso di onde e correnti collineari

Come mostrato in entrambe le rappresentazioni di Figura 5.8, la geometria dei ripples generati in presenza di sole onde (cerchio pieno) è risultata non differire significativamente da quella dei ripples generati in presenza di onde e correnti collineari (cerchio vuoto) con un leggero incremento di dimensioni dei ripples in presenza di corrente.

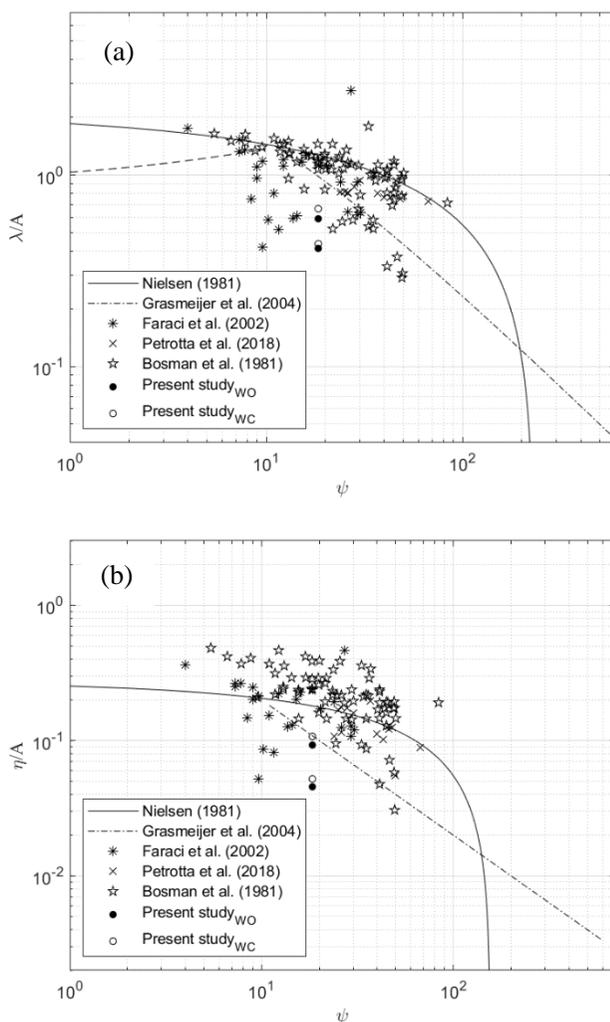


Figura 5.8 Confronto relativo alla geometria dei ripples in presenza di onde regolari tra il presente studio e studi precedenti (Nielsen (1981), Grasmeyer et al. (2004), Faraci et al. (2002), Petrotta et al. (2018) e Bosman et al. (1981)). a) andamento del rapporto tra la lunghezza dei ripples e l'ampiezza orbitale dell'onda rispetto al numero di mobilità; b) andamento del rapporto tra l'altezza dei ripples e l'ampiezza orbitale dell'onda rispetto al numero di mobilità.

Una volta formatesi e stabilizzatesi le forme di fondo, in sintesi appare interessante confrontare cosa accade al variare dei parametri idrodinamici e cosa succede quando la corrente si sovrappone al caso di sola onda (Figura 5.9). Più in particolare, si è notato che confrontando i profili di ripples che si sono generati nelle due condizioni idrodinamiche analizzate, $f=0.2\text{Hz}$ e $a=0.75\text{V}$ (Run_m 2 e Run_m 6, Figura 5.9a-b) e $f=0.3\text{Hz}$

e $a=0.5V$ (Run_m 3 e Run_m 7, Figura 5.9c-d) nella condizione a frequenza più alta, sia in presenza di sola onda che di onde e correnti, il profilo mostra una maggiore regolarità e simmetria tra i vari ripples per via delle più elevate velocità al fondo. Inoltre in entrambe le prove implementate, la presenza della corrente livella il profilo del ripple restituendo un profilo avente delle creste più tondeggianti rispetto a quelle appuntite mostrate per il caso di sola onda. Infine la corrente che si sovrappone all'onda genera una velocità di migrazione che tende ad inclinare leggermente il profilo dei ripples in direzione off-shore.

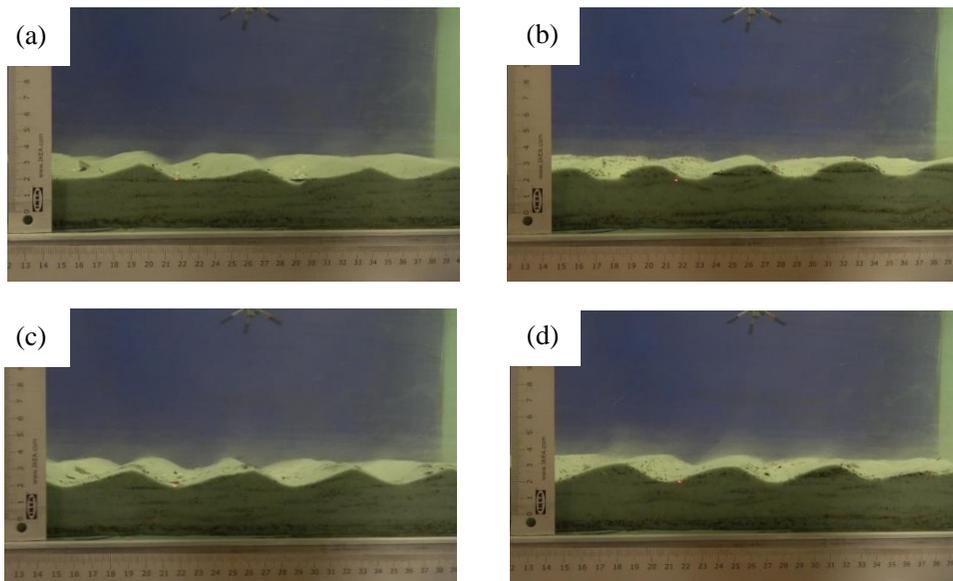


Figura 5.9 Profili ripples formatisi durante le prove. a) Run_m 2, Prova WO $f=0.2$ Hz $a=0.75$ V; b) Run_m 6, Prova WC $f=0.2$ Hz $a=0.75$ V $c=10$ giri/s; c) Run_m 3, Prova WO $f=0.3$ Hz $a=0.5$ V; d) Run_m 7, Prova WC $f=0.3$ Hz $a=0.5$ V $c=10$ giri/s.

5.3.1.2 Formazione di vortici su ripples

La conoscenza del moto dei vortici generati dal campo di moto può essere importante quando su un letto coperto da ripples si considera il trasporto di sedimenti, causa principale dell'erosione costiera. Partendo da questa considerazione e da una condizione già stabilizzata delle forme di fondo, in questo paragrafo vengono riportate delle sequenze fotografiche, per il caso di sola onda e per il caso di onde e correnti, che illustrano l'evoluzione temporale della formazione dei vortici lungo diverse fasi di un ciclo d'onda.

Tale rappresentazione prende spunto dalle analisi suggerite da Fredsøe et al. (1999) motivo per cui, al fine di individuare le eventuali similarità o differenze, di seguito vengono riportate le fasi più rappresentative per il presente studio. Dall'intero video relativo alle prove prese in esame (Run_m 3 e Run_m 7) è stato estrapolato un video relativo alla durata di un ciclo completo dell'onda e a sua volta suddiviso in frame, partendo da 5° fino a 360° del ciclo d'onda con uno step di 5° . In Figura 5.11 sono riportate 8 fasi differenti (0° , 60° , 90° , 120° , 150° , 190° , 220° e 280°) ed in particolare nella colonna di sinistra vi è l'evoluzione dei vortici relativa alla prova di sola onda, nella colonna di destra le fasi corrispondenti per la prova di interazione onda-corrente collineari.

Capitolo 5 - Campagna sperimentale e risultati ottenuti nel caso di onde e correnti collineari

Nessuna particolare movimentazione avviene fino alla fase 60° nel caso di sola onda (Figura 5.11c), dove si inizia ad innescare un moto turbolento che genera, successivamente alla fase 90° (Figura 5.11e), la formazione di un vortice di dimensioni $\tilde{d} = 1.5$ cm, avendo indicato con \tilde{d} il diametro del vortice misurato per mezzo delle aste graduate.

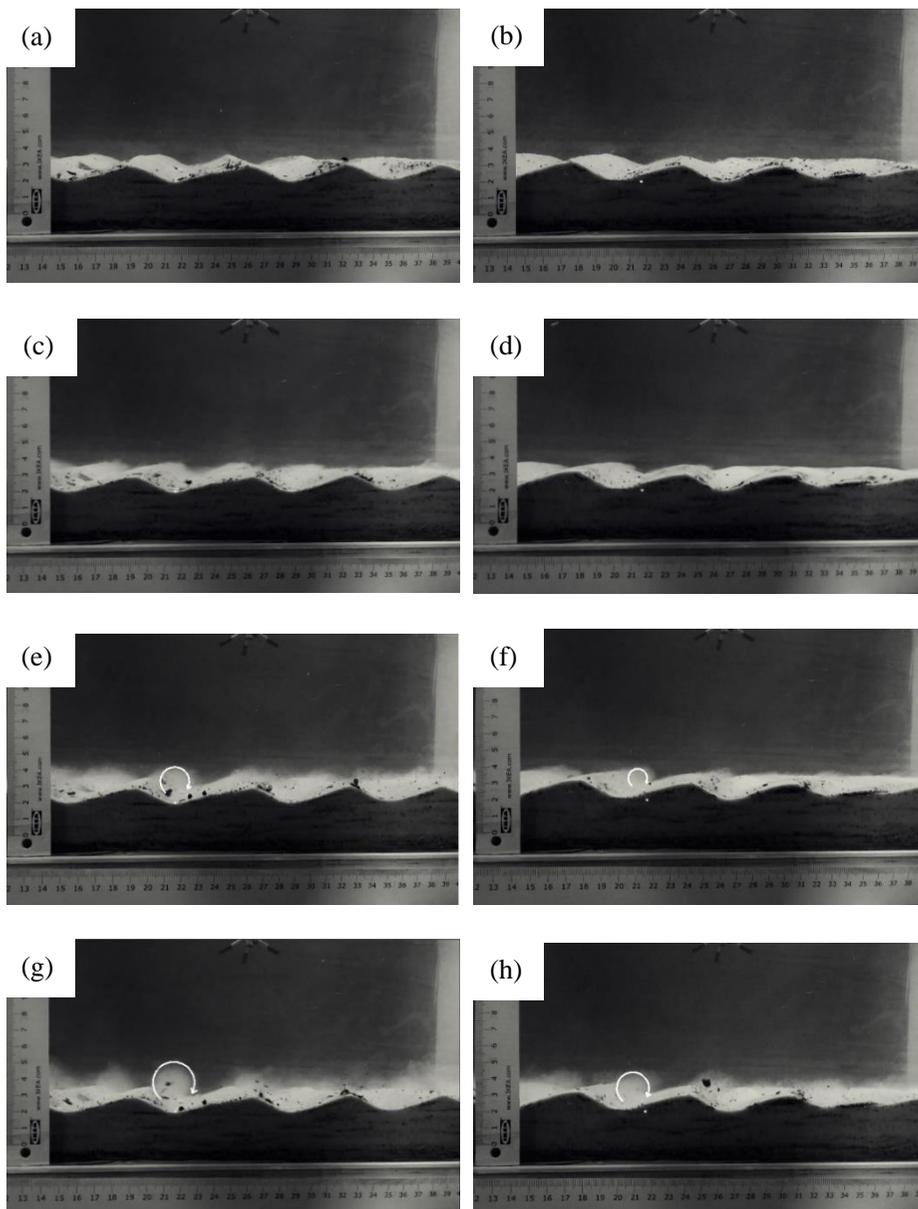


Figura 5.10 Continua.

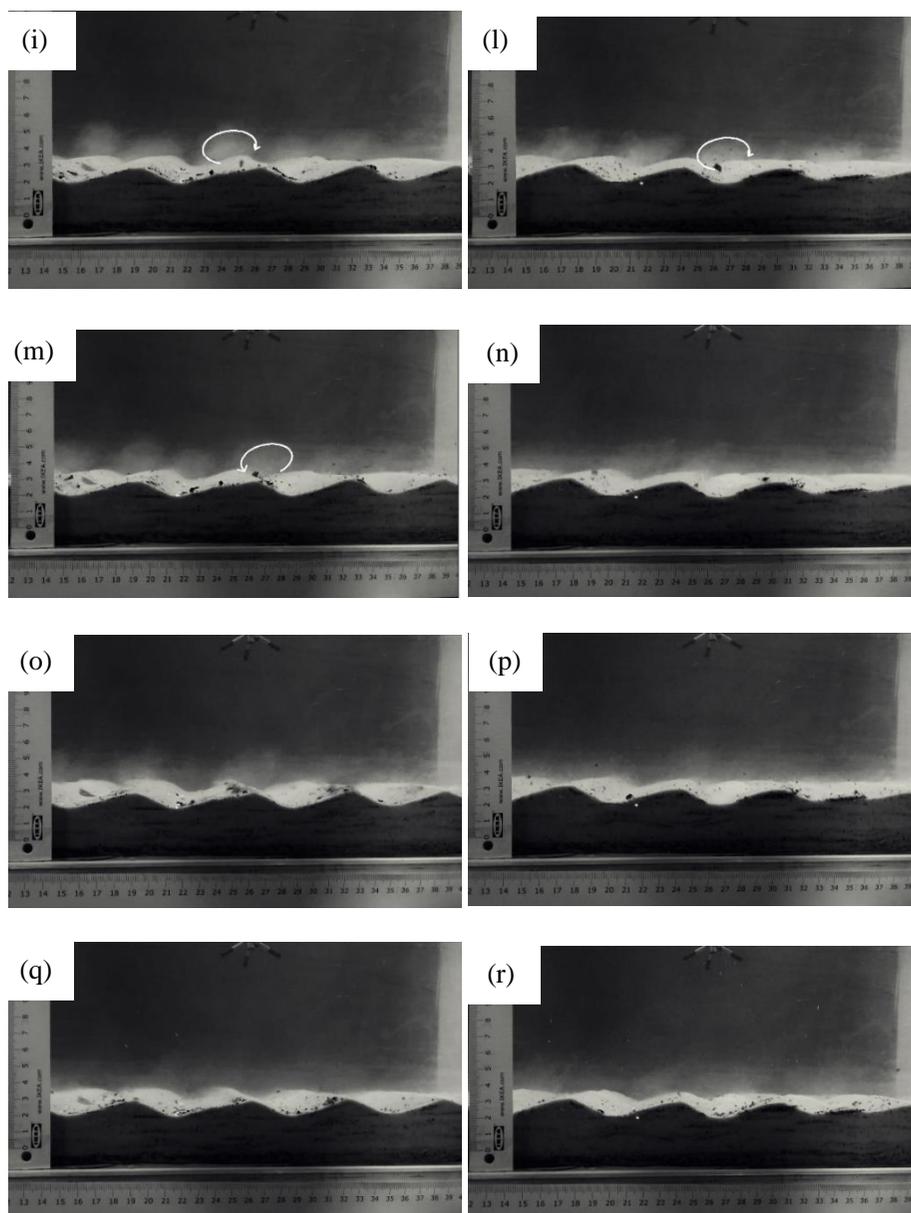


Figura 5.11 Evoluzione dei vortici in diverse fasi del periodo d'onda per il caso di sola onda e onde e correnti ($f=0.3\text{Hz}$ e $a=0.5V$ $c=10$). a) caso WO fase 0° ; b) caso WC fase 0° ; c) caso WO fase 60° ; d) caso WC fase 60° ; e) caso WO fase 90° ; f) caso WC fase 90° ; g) caso WO fase 120° ; h) caso WC fase 120° ; i) caso WO fase 150° ; l) caso WC fase 150° ; m) caso WO fase 190° ; n) caso WC fase 190° ; o) caso WO fase 220° ; p) caso WC fase 220° ; q) caso WO fase 280° ; r) caso WC fase 280° .

Tale vortice, che appare ben definito, cresce e si stacca nettamente in corrispondenza della cresta alla fase 120° (Figura 5.11g) arrivando ad una dimensione massima di $\tilde{d} = 2.5$ cm. Successivamente tale vortice tende a migrare fino a 150° (Figura 5.11i) dove, in corrispondenza dell'inversione del flusso (190° , Figura 5.11m), si

individua un vortice antiorario meno definito che lungo la restante fase del ciclo tende a dissolversi.

In co-presenza di onde e correnti collineari si individua alla fase 90° (Figura 5.11f) un vortice meno definito del caso WO e avente dimensione massima ($\tilde{d} = 1.8$ cm), raggiunta alla fase 120° (Figura 5.11h) inferiore rispetto al caso WO. Inoltre, tale vortice si muove in direzione off-shore più rapidamente rispetto al caso di sola onda (Figura 5.11i-l). Entrambi questi effetti, vortice meno definito e maggiore migrazione, sono probabilmente dovuti alla presenza della corrente la quale, quando si sovrappone al caso di sola onda, tende a livellare al fondo la vorticità come visto anche per il caso di onde e correnti ortogonali (paragrafo 4.3.5).

Confrontando i risultati ottenuti nel presente studio con quelli di Fredsøe et al. (1999) si nota come, sia nello studio citato sia nel presente lavoro, si individuano in modo più o meno definito i vortici lungo la fase dell'onda. La massima estensione dei vortici individuata nel presente lavoro avviene alla fase 120° mentre in Fredsøe et al. (1999) avviene invece alla fase 150° con individuazione di altri piccoli vortici in tutte le altre fasi. Tale differenza è probabilmente legata alla forma dei ripples difatti in presenza di onde e correnti, dove il ripple tende ad avere una cresta meno appuntita, i vortici individuati sono meno definiti proprio a causa della forma del ripple (Horikawa e Mizutani (1992)). Tale aspetto è coerente con le considerazioni fatte nel paragrafo precedente inerente alla vorticità in presenza di onde e correnti ortogonali della campagna WINGS.

Admiral et al. (2006), all'interno di un'apparecchiatura simile a quella usata nel presente lavoro ma in scala più piccola, sono riusciti a individuare i vortici lungo le fasi dell'onda in presenza di fondo mobile attraverso l'utilizzo della PIV (Particle Image Velocimeter) la quale restituisce risultati più definiti rispetto quelli ottenuti nel presente lavoro. Nello specifico, nella campagna di Admiral et al. (2006) sono state effettuate diverse prove tutte in presenza però di sola onda ed i risultati ottenuti sono in accordo con il presente studio in termini di segno dei vortici formati alle varie fasi dell'onda; non è possibile tuttavia effettuare confronti in termini di dimensioni essendo i parametri in gioco presenti nei due lavori in scale completamente diverse.

5.3.2 Fondo Fisso

In questo paragrafo vengono illustrate le analisi condotte con i dati acquisiti in presenza di fondo fisso al variare del campo di moto (stazionario, oscillante, combinato).

Come nel caso di onde e correnti ortogonali, sono state effettuate prove su fondo con sabbia, con ghiaia e in presenza di ripples. Le dimensioni dei ripples sono state scelte tenendo conto sia dei risultati ottenuti su fondo mobile, ma anche del fatto che, essendo necessario effettuare misure in diverse posizioni lungo il profilo del ripple, per ottenere risultati più affidabili, è necessario disporre di lunghezze d'onda sufficientemente grandi. Pertanto le grandezze caratteristiche adottate per la costruzione dei ripples fissi sono state scelte incrementando di poco più del 50% le grandezze medie ottenute in presenza di fondo mobile compatibilmente con le dimensioni previste da Nielsen (1981) (vedi Figura 5.8 e paragrafo 3.4.2). Così facendo è stato agevole effettuare le prove in 3 o 5 punti di misura lungo il ripple (una ogni 1.5cm circa).

5.3.2.1 Moto stazionario

In questo paragrafo vengono analizzate le variazioni che le diverse scabrezze causano in presenza di moto stazionario per ciò che concerne la valutazione degli sforzi tangenziali al fondo.

Per ciascuno dei tre fondi fissi di sabbia, ghiaia e ripples (vedi paragrafo 3.4.2) sono state generate quattro differenti condizioni di flusso ($Q_{max}=45\div 80$ l/s).

Come precedentemente accennato attraverso l'uso del Vectrino si è scelto di registrare più punti di quelli necessari all'elaborazione del profilo affinché i fenomeni di disturbo del segnale di registrazione, come ad esempio il Weak point discusso nel paragrafo 3.5.2, potessero essere tralasciati. Una volta estrapolato il profilo di velocità definitivo, come già mostrato nella campagna sperimentale relativa ad onde e correnti ortogonali, anche in questo caso, quest'ultimo è stato plottato in scala semilogaritmica al fine di individuare i parametri caratteristici per lo studio degli sforzi tangenziali al fondo. Nello specifico di seguito sono mostrate rispettivamente per i tre fondali le figure relative ai profili di velocità per i 4 campi di moto generati ($c=10\div 18$ giri/s)

Dal momento che l'adattamento dei dati è influenzato dallo spessore dello strato logaritmico, in corrispondenza di sabbia e ghiaia si è scelto come limite superiore, in conformità con le analisi presentate nel capitolo precedente, $0.17d$, con d la profondità d'acqua che in questo caso, avendo a che fare con un condotto chiuso coincide con l'altezza del condotto ($d=60$ cm). Il limite inferiore invece è stato posto pari a $2.5d_{50}$, con d_{50} il diametro caratteristico ovvero l'altezza del ripple ($d_{50SB}=1.4$ mm, $d_{50GB}=25$ mm, $d_{50RB}=18.5$ mm).

Nella Figura 5.12a relativa al fondo con sabbia sono riportati i 4 profili ottenuti per mezzo del Vectrino relativi alle 4 prove di sola corrente (Run_f 1, Run_f 2, Run_f 3 e Run_f 4). Per la rappresentazione in scala semi-logaritmica (Figura 5.12b) si sono determinate le velocità d'attrito e le scabrezze apparenti, rispettivamente come coefficiente angolare e trenta volte l'intercetta della retta interpolante i punti sperimentali; i valori ottenuti sono riportati in Tabella 5.VI.

Dai risultati ottenuti si riscontra un coefficiente di scabrezza e una velocità d'attrito che crescono all'aumentare della portata in condotta, fatta eccezione per il caso di corrente pari a 13 giri/s dove si riscontra un coefficiente di scabrezza relativo quasi nullo e una velocità di attrito che diminuisce senza seguire il trend di crescita; questo è

probabilmente legato a un limite fisico della pompa che in determinati range potrebbe non restituire nel tempo un regime stazionario all'interno del condotto.

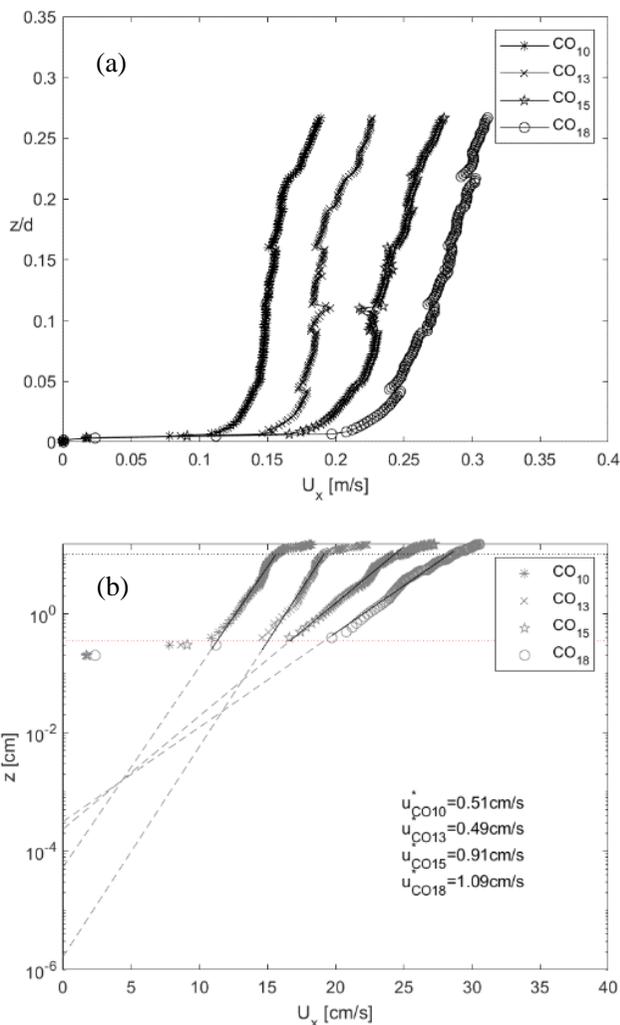


Figura 5.12 Moto stazionario in presenza di fondo con sabbia. a) Profilo di velocità media; b) profilo in scala semi-logaritmica.

Come ben noto, nel caso di superfici aventi scabrezza a distribuzione uniforme e non, è possibile, in relazione al numero di Reynolds d'attrito, individuare 3 regioni distinte:

- Idraulicamente liscia: $Re^* < 5$
- Transizione $5 < Re^* < 70$
- Completamente scabra: $Re^* > 70$

essendo

$$Re^* = \frac{u^* \cdot d_{50}}{\nu}$$

In presenza di moto stazionario, il caso di fondo con sabbia avente diametro caratteristico $d_{50SB}=1.4\text{mm}$ rientra nella regione di transizione essendo per tutti e 4 i casi di portata investigati il coefficiente di Reynolds d'attrito al massimo pari a 15 ($Re^* = 7 \div 15$). In termini di velocità d'attrito, i risultati ottenuti trovano riscontro nel lavoro sperimentale di Lim e Madsen (2016) i quali, in presenza di fondo con bassa scabrezza, per valori di velocità media simili ai casi qui riportati (Run_f1-2-3-4), hanno riscontrato un valore di velocità d'attrito in accordo con quelli ottenuti nel presente lavoro. In Tabella 5.VI oltre ai parametri precedentemente definiti vengono riportati anche la portata massima transitante in condotta (Q_{max}), i valori di la velocità massima ($U_{x(max)}$) e la velocità media ($U_{x(mean)}$) misurate lungo il profilo.

Tabella 5.VI Parametri determinati per le prove in presenza di sola corrente al variare della scabrezza al fondo.

<i>Run_f</i>	<i>Fondo</i>	<i>c</i> [giri/s]	$U_{x(max)}$ [cm·s ⁻¹]	$U_{x(mean)}$ [cm·s ⁻¹]	Q_{max} [l/s]	u^* [cm·s ⁻¹]	k_s	Re_c	Re^*
1	SB	10	18.90	15.76	45.35	0.51	0.0030	94538	7
2		13	22.71	19.47	54.51	0.49	0.0012	116799	7
3		15	27.96	24.27	67.10	0.91	0.0060	145625	13
4		18	31.15	27.96	74.77	1.09	0.0090	167748	15
7	GB	10	17.50	15.51	42.00	1.67	5.66	93082	418
8		13	23.73	20.49	56.95	1.28	0.32	122954	320
9		15	26.95	23.23	64.69	2.21	3.26	139386	553
10		18	32.08	27.86	76.98	2.41	2.28	167156	603
1 _M	RB _{medio}	10	18.81	15.74	45.13	2.63	5.07	94433	348
2 _M		13	24.17	20.38	58.01	2.36	4.46	122295	437
3 _M		15	27.67	23.49	66.40	2.81	4.90	140963	520
4 _M		18	32.90	27.95	78.97	3.18	4.21	167689	588

Anche in presenza di fondo con ghiaia, fatta sempre eccezione per la prova con corrente di 13 giri/s, l'andamento della velocità d'attrito e della scabrezza equivalente risulta direttamente proporzionale al crescere della velocità media all'interno del canale. La presenza di una scabrezza al fondo relativamente importante induce una velocità d'attrito più grande rispetto al caso di fondo con sabbia rientrando in una regione completamente scabra con valori di Re^* compresi tra 300 e 600. Come ci si aspetta, anche la scabrezza equivalente assume valori di gran lunga maggiori in presenza di fondo con ghiaia rispetto al fondo con sabbia. Difatti, la presenza di una scabrezza rilevante al fondo come la ghiaia comporta una maggiore resistenza al moto che si traduce proprio in una crescita di scabrezza equivalente (Mossa e Petrillo, (2013)). Anche per il caso di fondo con ghiaia i risultati in termini di scabrezza equivalente ben si adattano a quelli ottenuti da Lim e Madsen (2016) per il caso di fondo scabro. La velocità d'attrito ottenuta nel presente lavoro risulta invece essere circa il doppio rispetto a quella determinata nel lavoro di Lim e Madsen (2016); questo è probabilmente legato al diametro caratteristico che nel lavoro citato è esattamente la metà di quello usato in questa campagna sperimentale per il fondo con ghiaia.

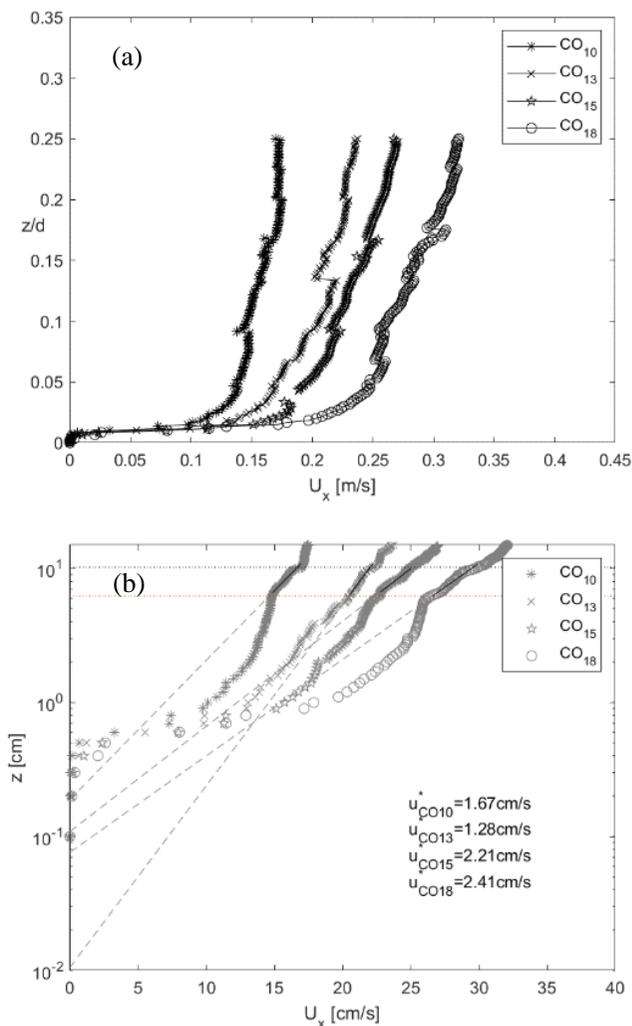


Figura 5.13 Moto stazionario in presenza di fondo con ghiaia. a) Profilo di velocità media; b) profilo in scala semi-logaritmica.

Sul fondo con ripples i dati sono stati acquisiti in corrispondenza di 5 punti caratteristici del ripple, le due creste, i due punti intermedi e il cavo; in Figura 5.14 vengono riportati i profili di velocità acquisiti nelle rispettive posizioni per tutti e quattro i valori di portata riprodotti nel canale. Delle lievi discrepanze si individuano solo nella zona prossima al fondo entro comunque il range z/d pari a 0.05, zona entro la quale dovrebbe sicuramente individuarsi lo strato limite che occupa circa il 10% della colonna d'acqua. Appare chiaro quindi che là dove la scabrezza al fondo è rilevante e disomogenea il punto di misura risulta essere determinante per il comportamento della velocità.

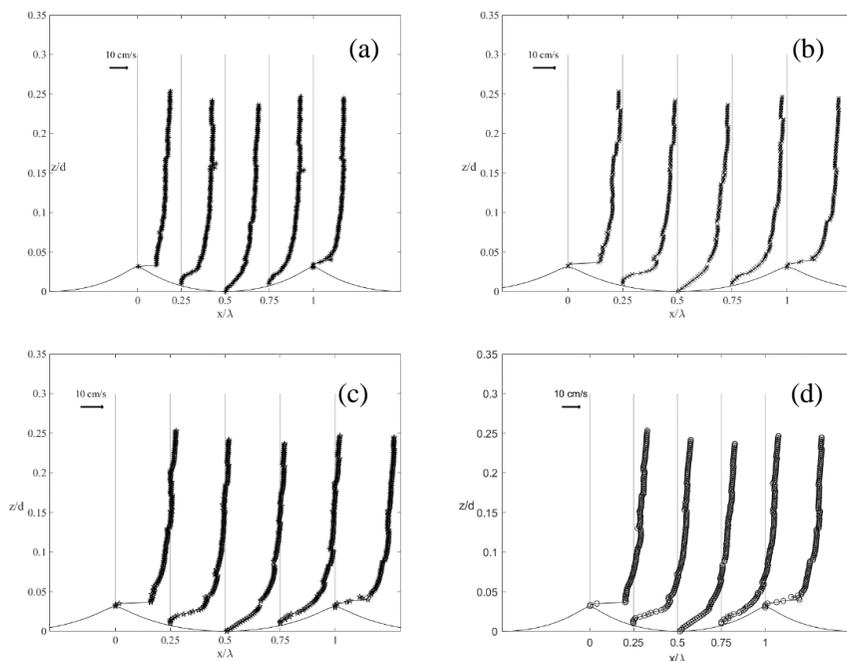


Figura 5.14 Profili di velocità lungo il ripple. a) $c=10$ giri/s; a) $c=13$ giri/s; a) $c=15$ giri/s; a) $c=18$ giri/s.

Come fatto per le altre due scabrezze, al fine di avere un unico profilo rappresentativo della velocità, in presenza di ripples è stato calcolato il profilo mediato spazialmente nei 5 punti di misura per le 4 distinte prove denominati d'ora in avanti Run_f 1_M-2_M-3_M-4_M (Tabella 5.VI). In Figura 5.15 sono riportati i 4 profili medi e la rispettiva rappresentazione in scala semi logaritmica. In questa seconda rappresentazione (Figura 5.15b) per il caso di fondo con ripple è stato possibile individuare un doppio strato logaritmico in quanto, probabilmente a causa della forma del fondo e della irregolarità della scabrezza, la zona interessata da tale strato è una zona di transizione ovvero dove le due componenti di tensione, viscosa e turbolenta, non possono essere trascurate in quanto presentano lo stesso ordine di grandezza (Mossa e Petrillo, (2013)). Questi due strati sono stati ottenuti imponendo oltre al limite inferiore e superiore imposto anche per le prove in presenza di sabbia e ghiaia un ulteriore limite nella zona sottostante. Più precisamente, come mostrato in Figura 5.15b il primo strato logaritmico è stato ottenuto imponendo solo il limite superiore pari a $2.5d_{50}$ e nessun limite inferiore ottenendo così la velocità d'attrito e la scabrezza equivalente per ogni prova, relative al primo strato logaritmico, indicate ad esempio per la prova con corrente di 10 giri/s $u_{CO1(10)}^*$ e $ks_{CO1(10)}$; il secondo strato è stato individuato imponendo gli stessi limiti superiore e inferiore imposti per le prove di sabbia e ghiaia ovvero limite inferiore $2.5d_{50}$ e superiore $0.17d$ individuando velocità d'attrito e scabrezza equivalente, riportati anche in Tabella 5.VI ($u_* = u_{CO2(10)}^*$ e $ks = ks_{CO2(10)}$).

Comune a tutte le prove al variare delle scabrezze si nota che anche al crescere della portata si individua un profilo che tende ad avere sempre una forma costante; a tal proposito per tutte e tre le scabrezze sono stati plottati nuovamente i profili medi adimensionalizzati rispetto le velocità massime misurate per ogni singola prova. Tale rappresentazione mostra come in presenza di macro scabrezza quindi ghiaia e ripples

(Figura 5.16b-c) i 4 profili al variare della portata hanno un andamento comune, tendendo a 1 in corrispondenza di $0.2 z/d$; in presenza di sabbia i profili si discostano maggiormente nel range compreso tra $0.075 \div 0.2 z/d$ tendendo a coincidere invece al fondo e alla massima elevazione misurata; ciò è probabilmente legato al fatto che la turbolenza è maggiormente sviluppata in presenza di macro-scabrezze e per tal motivo vi è un maggior appiattimento dei profili di velocità nella zona più distante dalla parete.

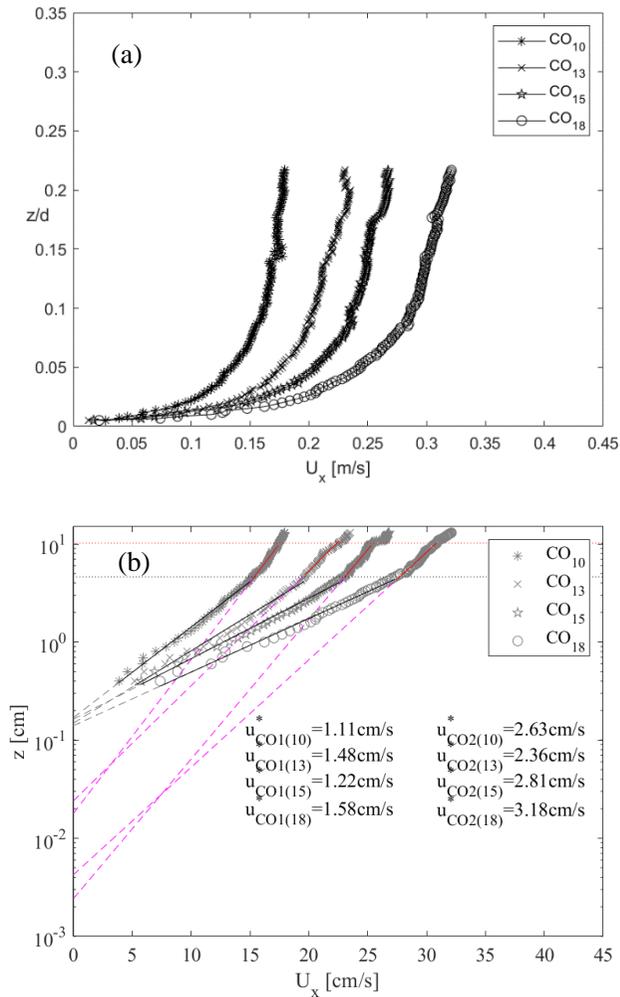


Figura 5.15 Moto stazionario in presenza di fondo con ripples. a) profilo medio di velocità; b) profilo medio in scala semi-logaritmica (doppio strato log).

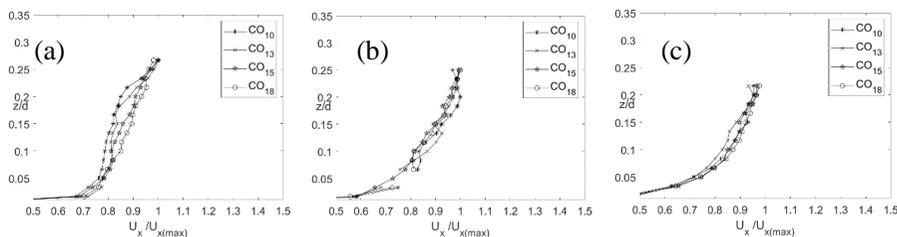


Figura 5.16 Profilo adimensionalizzato al variare della corrente. a) profili su sabbia; b) profili su ghiaia; c) profili su ripples.

5.3.2.2 Confronto tra i dati sperimentali ed il modello numerico di Scandura et al. (2016)

I limiti della strumentazione adottata (Vectrino Profiler) non consentono di indagare in modo approfondito il comportamento vicino al fondo a causa delle interferenze del segnale con la scabrezza del fondale ma tale metodo di misura, poco convenzionale ma comunque molto efficace, ha consentito di ottenere profili di velocità completi con costi notevolmente ridotti rispetto ai costi delle strumentazioni generalmente usate per misurare delle velocità all'interno di canali in pressione (PIV). Per tale motivo e per validare i risultati ottenuti per mezzo del Vectrino è stata riprodotta una prova di fondo con ripples in presenza di moto stazionario attraverso un modello numerico in grado di simulare il campo di moto su un fondo ondulato (Scandura et al., (2016)) che ci ha consentito sia di confrontare i risultati ottenuti sperimentalmente sia di osservare cosa avviene in prossimità del fondo. Tale modello è stato utilizzato per studiare un flusso oscillatorio indotto da onde a dente di sega in prossimità di un fondo modellato avente le stesse caratteristiche dei ripples usati nella presente campagna ($\lambda= 8.7$ cm e $\eta= 1.85$ cm). Nel modello, che si basa sulle equazioni di Navier-Stokes e le equazioni di continuità, si tiene conto del gradiente di pressione funzione principalmente di due parametri adimensionali che sono il numero di Reynolds e l'acceleration skewness. Il flusso considerato in questo modello è turbolento, quindi le equazioni di Navier-Stokes devono essere integrate numericamente. Per calcolare il campo di velocità i termini viscosi sono discretizzati per mezzo dello schema di Crank-Nicholson e i termini convettivi secondo lo schema di Runge-Kutta del terzo ordine. L'equazione di Poisson per la pressione, ottenuta imponendo il principio di conservazione della massa, si risolve applicando la trasformata di Fourier lungo le direzioni x e z . L'approccio numerico impiegato si basa su differenze finite del secondo ordine su una griglia sfalsata. Difatti, la maglia è uniforme lungo le direzioni x e z , mentre lungo la direzione y la griglia è più fitta vicino al fondo dove vi è modellata la scabrezza del fondale. Il flusso si assume omogeneo lungo le direzioni parallele alla parete, introducendo condizioni al contorno periodiche lungo gli assi x e z . Il time step utilizza il metodo del "fraction step" che è una variante di quello descritto da Kim & Moin (1985).

In Figura 5.17 vengono messi a confronto i due profili ottenuti sperimentalmente e numericamente. Osservando il comportamento al fondo, attraverso il modello numerico si individua un'inversione della velocità che mostra valori negativi raggiungendo un massimo di velocità negativa intorno a 1 cm/s. Il profilo di velocità ottenuto sperimentalmente anche se non riesce ad individuare una analoga inversione di velocità, nei primi millimetri vicino al fondo mostra un tratto con asintoto verticale che precede il

Capitolo 5 - Campagna sperimentale e risultati ottenuti nel caso di onde e correnti collineari

classico profilo parabolico che in presenza di fondo liscio partirebbe da zero; quindi il profilo di velocità in presenza di un fondo con ripples subisce uno shift verso l'alto che, avendo individuato anche numericamente delle velocità al fondo negative, sta ad indicare una eventuale separazione del moto che crea una corrente di ricircolazione.

Si può inoltre osservare che si ha un buon adattamento dei dati messi a confronto con un R^2 calcolato per z/d compreso tra 0 e $0.075z/d$ pari a 0.7. Oltre $0.075z/d$ i due profili tendono a divergere in quanto il modello numerico tende sempre a crescere al crescere di z/d non presentando l'asintoto verticale individuabile nel caso sperimentale. Ciò è probabilmente dovuto al fatto che il modello numerico implementato è modellato imponendo una condizione di "free slip" alla sommità del dominio, non risultando quindi influenzato come avviene nella realtà dalla presenza delle pareti laterali e superiori presenti invece nell'apparato sperimentale.

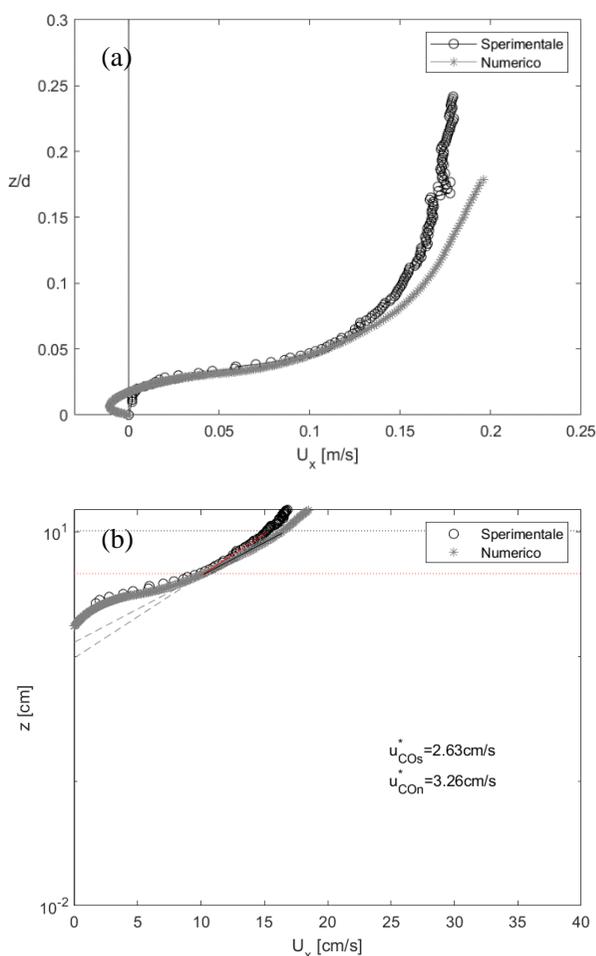


Figura 5.17 Confronto del profilo di velocità determinato col modello numerico (asterisco grigio) e sperimentalmente (cerchio nero) in presenza di ripples. a) profilo di velocità; b) profilo logaritmico.

Come ben noto in letteratura, un profilo di velocità di moto turbolento in condotta tende ad essere più schiacciato di quello parabolico nella parte centrale della condotta; in prossimità delle pareti invece tende ad annullarsi (caso di pareti lisce); per tal motivo al

di fuori della zona prossima al fondo il profilo determinato sperimentalmente risulta essere più realistico rispetto a quello numerico, a causa dei limiti del modello. Plottando in scala semi-logaritmica i due profili, numerico e sperimentale, si individua che il profilo ottenuto numericamente restituisce, per i valori di limiti inferiore e superiore imposti come nelle analisi fatte precedentemente, un valore di velocità d'attrito che risulta essere il 20% superiore di quello ottenuto sperimentalmente; tale differenza è verosimilmente legata al limite inferiore imposto, che probabilmente è idoneo per il caso sperimentale ma meno per il caso numerico nel quale lo strato logaritmico riesce ad essere riprodotto ben al di sotto dei limiti sperimentali in corrispondenza di valori di z più bassi. Difatti, se come fatto nell'individuazione del doppio strato logaritmico non si inserisse nessun limite inferiore (Faraci et al. 2008) i due valori di velocità d'attrito e quindi di scabrezza equivalente tenderebbero a coincidere con una variazione tra i due valori molto più bassa, rispettivamente intorno al 10% per la velocità d'attrito e all'1% per la scabrezza equivalente.

5.3.2.3 Interazione onde-correnti collineari

Nel presente paragrafo sono riportati i profili di velocità per le tre scabrezze investigate per la condizione di sola corrente (CO), sola onda (WO) e onda più corrente tra loro collineari (WC) al fine sia di individuare il ruolo della scabrezza al fondo sia di comprendere quali siano gli effetti di interazione tra due forzanti, onda e corrente, aventi la stessa direzione.

Dovendo scegliere, per motivi logistici e di tempo, una delle due prove implementate in presenza di fondo mobile con moto oscillante ($f=0.3\text{Hz}$ e $a=0.5\text{V}$ piuttosto che $f=0.2\text{Hz}$ e $a=0.75\text{V}$), poiché le minori variazioni delle grandezze caratteristiche del ripple a regime si sono ottenute per la prova con periodo e ampiezza d'oscillazione minore (vedi paragrafo 5.3.1.1) ed inoltre sempre in corrispondenza di questi parametri si sono individuate più evidenti formazioni di vortici con conseguenti variazioni di velocità (vedi paragrafo 5.3.1.2), è risultato più idoneo scegliere come caratteristiche del moto da riprodurre sul fondo fisso quelle aventi $f=0.3\text{Hz}$ e $a=0.5\text{V}$. Inoltre poiché in presenza di moto stazionario si è individuata una buona simmetria della velocità lungo il profilo del ripple, per le prove in presenza di onde e correnti ortogonali sono state effettuate solo 3 misurazioni lungo il ripple (partendo da sinistra: cresta, intermedio e cavo).

In Figura 5.18a-b-c sono riportati i profili di scabrezza nelle tre condizioni di moto rispettivamente per sabbia, ghiaia e ripple. Comune a tutte le scabrezze appare che, quando l'onda si sovrappone alla corrente, la velocità media per il caso WC tende ad essere inferiore rispetto alla velocità media ottenuta in corrispondenza della sola corrente. Probabilmente questo è legato al fatto che il segnale restituito per le prove di WC risulta essere un segnale sinusoidale modulato che si sviluppa non interamente nel quadrante positivo, motivo per cui la media totale restituisce un valore inferiore rispetto al caso di sola corrente, il cui segnale è invece pressoché costante e positivo (vedi Figura 5.19).

Inoltre, al crescere della scabrezza, i profili di sola corrente e di interazione onda-corrente collineari tendono a discostarsi maggiormente presentando un andamento parabolico con una concavità minore in co-presenza delle forzanti rispetto al caso di sola corrente al crescere della scabrezza. Nello specifico la concavità è minore in presenza di ripple in quanto questo tipo di fondale è rappresentativo di una scabrezza particolarmente rilevante (Run_f 6_M profilo medio spazialmente in presenza di onde e correnti).

Capitolo 5 - Campagna sperimentale e risultati ottenuti nel caso di onde e correnti collineari

Osservando i profili relativi al caso di sola onda (Run_r 5-11-5_M rispettivamente per sabbia, ghiaia e ripples), per tutte e tre le scabrezze i profili mostrano un'inversione di velocità al di sotto di $0.05 z/d$. Più nel dettaglio, tale inversione risulta essere verso valori negativi per sabbia e ripple, verso valori positivi per la ghiaia. Ciò è legato al punto di misura in quanto mentre nella sabbia la scabrezza è sufficientemente omogenea, il fondo con ghiaia presenta un profilo particolarmente disomogeneo e quindi il risultato che restituisce il Vectrino è probabilmente molto influenzato dall'esatto punto in cui è posizionato lo strumento rispetto al fondo (vedi Figura 5.3b, punto di misura in un tratto discendente della pietra).

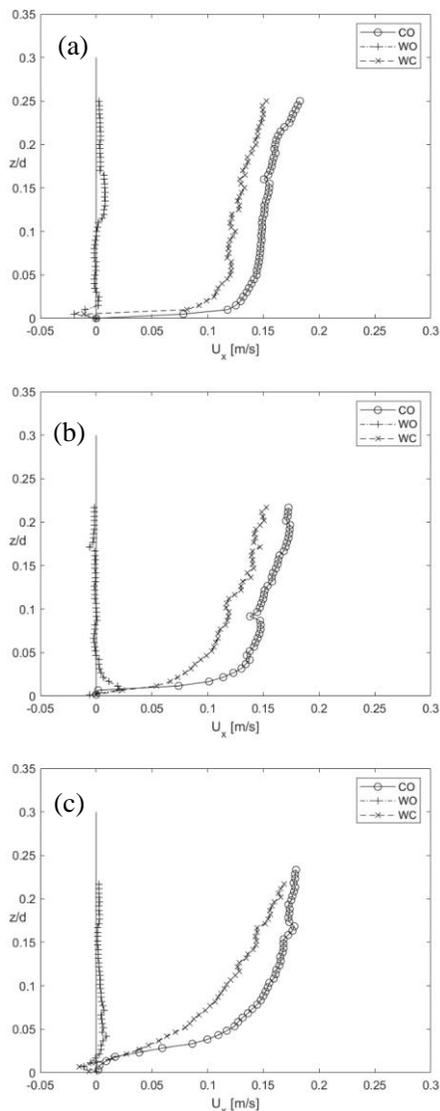


Figura 5.18 Profilo di velocità in condizioni CO, WO e WC ($f=0.03\text{Hz}$, $a=0.5V$ e $c=10$). a) caso SB (Run_r 1-5-6); b) caso GB (Run_r 7-11-12); c) caso RB (Run_r 1_M-5_M-6_M).

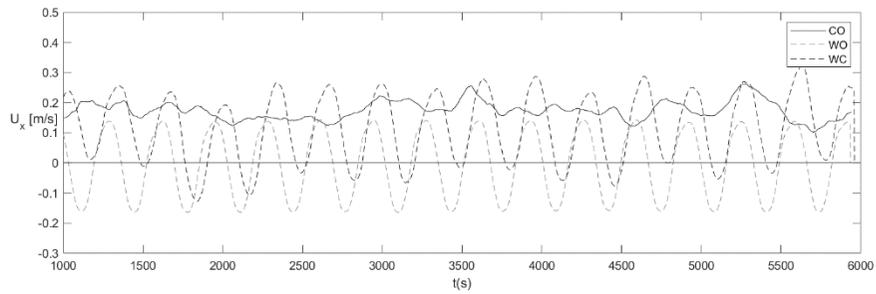


Figura 5.19 Confronto segnali per i tre differenti campi di moto

Il profilo relativo al caso di fondo con ripple, essendo quest'ultimo mediato spazialmente ($Run_f 5M$) restituisce valori negativi di velocità al fondo in quanto, nei tre distinti punti di misura (vedi Figura 5.20) presenta una velocità, al di sotto di $0.075 z/d$, negativa per il caso di cresta e cavo positiva nel punto intermedio tra i due, restituendo in ultimo nel profilo mediato una velocità negativa.

Tale inversione induce a pensare, come osservato per il fondo mobile e già analizzato nel caso di interazione onde e correnti ortogonali, alla formazione di celle di ricircolo; tale aspetto non è tuttavia indagabile momentaneamente in questo elaborato in quanto i punti di acquisizione lungo il ripple non sono sufficienti ad effettuare con accuratezza tali analisi.

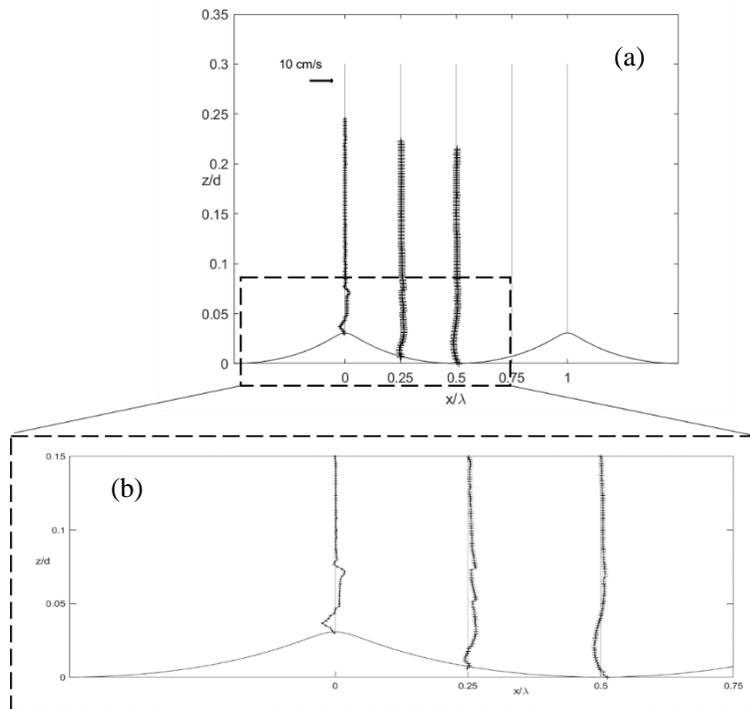


Figura 5.20 a) Profilo medio della componente di velocità U_x in presenza di solo onde nei tre punti di misura lungo il ripple; b) Zoom al fondo.

Capitolo 5 - Campagna sperimentale e risultati ottenuti nel caso di onde e correnti collineari

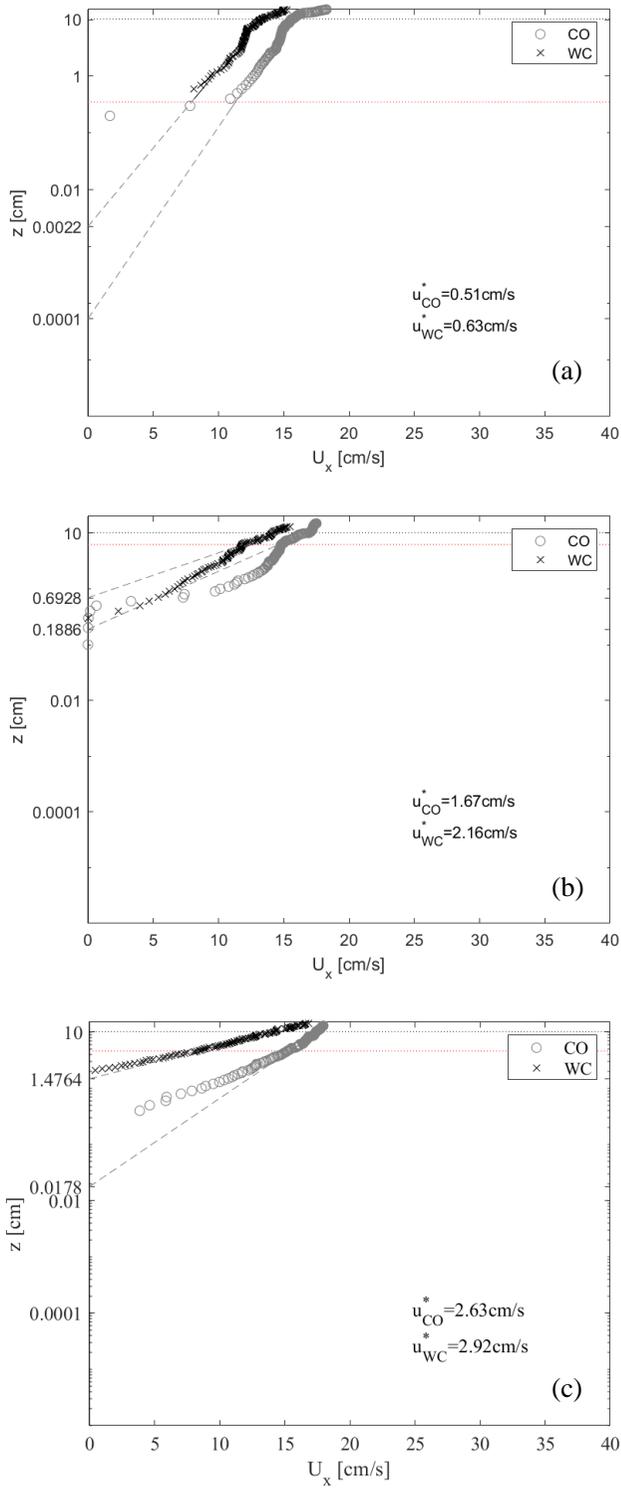


Figura 5.21 Profilo logaritmico prova di sola corrente e prova di onda più corrente per le tre scabrezze. ($f=0.03\text{Hz}$, $a=0.5V$ e $c=10$). a) caso SB (Run_f 1-6); b) caso GB (Run_f 7-12); c) caso RB (Run_f 1_M-6_M)

Come precedentemente illustrato per il caso di onde e correnti ortogonali (paragrafo 4.3.3) al fine di studiare gli sforzi tangenziali al variare della scabrezza, sono stati rappresentati (Figura 5.21a-b-c) rispettivamente per il caso di fondo con sabbia, ghiaia e ripples, i profili di velocità in presenza di sola corrente e in presenza di onde e correnti collineari in scala semilogaritmica. Con la stessa procedura adottata per angolo d'attacco tra le forzanti di 90°, anche con i dati della presente campagna sono stati individuati la velocità d'attrito e la scabrezza equivalente rispettivamente come il coefficiente angolare della retta e 30 volte l'intercetta della retta interpolante i punti; anche per questo caso si sono mantenuti invariati i limiti inferiori e superiori già precedentemente definiti (paragrafo 5.3.2.1). Dalle presenti analisi si individua un coefficiente di scabrezza equivalente, k_s , e una velocità d'attrito, u^* , che crescono al crescere della scabrezza. Inoltre un incremento di tali parametri si ha anche in presenza di onde e correnti collineari rispetto al caso di sola corrente.

In Tabella 5.VII vengono riportati i parametri dimensionali e adimensionali calcolati come precedentemente illustrato (vedi paragrafo 4.3.2, 5.3.2.1) per le prove della campagna di onde e correnti collineari al fine di caratterizzare, anche per questi dati, il campo di moto.

Tabella 5.VII Parametri dimensionali e adimensionali per le prove su fondo fisso per le prove del "tubo a U".

<i>Run_f</i>	<i>Fondo</i>	<i>Tipo</i>	\hat{U}_c [m·s ⁻¹]	\hat{U}_0 [m·s ⁻¹]	u^* [cm·s ⁻¹]	k_s [cm]	Re_w	Re_c	Re^*
1		CO	0.151	-	0.51	0.003	-	90600	7
5	SB	WO	-	0.302	-	-	24149	-	-
6		WC	0.092	0.258	0.63	0.66	17666	54987	9
7		CO	0.154	-	1.67	5.66	-	92400	418
11	GB	WO	-	0.300	-	-	11948	-	-
12		WC	0.13	0.2452	2.16	20.78	7966	78000	540
1M		CO	0.161	-	2.63	5.34	-	96600	394
5M	RB	WO	-	0.308	-	-	25181	-	-
6M		WC	0.141	0.22	2.92	44.29	6413	84600	540

I risultati ottenuti in termini di velocità d'attrito relativi alle tre scabrezze nel caso di flusso combinato sono confrontabili con i valori di velocità d'attrito teorici ottenuti secondo la formulazione proposta da Visser (1987). I valori calcolati per mezzo di tale formulazione rispetto ai dati ottenuti sperimentalmente mostrano un maggiore riscontro in presenza di macro scabrezza (ghiaia e ripple); meno si adattano al caso di fondo con sabbia. Questo risulta comunque un risultato interessante dovendo tenere conto sia dei limiti inerenti alla strumentazione adottata sia la determinazione per via indiretta degli sforzi tangenziali che tende ad essere particolarmente influenzata dai limiti adottati durante le analisi come il limite superiore e inferiore imposto per la determinazione degli sforzi tangenziali.

Capitolo 6

Conclusioni

Il presente elaborato di tesi ha riguardato l'esecuzione di due campagne sperimentali volte allo studio dell'interazione di onde e correnti su fondali aventi differenti scabrezze e la successiva elaborazione dei dati acquisiti: la prima, inerente allo studio di onde e correnti ortogonali, è stata effettuata presso il DHI (Hørsholm, Danimarca) la seconda, relativa ad onde e correnti collineari, è stata condotta presso il Laboratorio di Idraulica e Costruzioni Idrauliche dell'Università di Messina.

A seguire vengono riassunte le analisi e i risultati ottenuti per mezzo dei dati estrapolati nelle succitate campagne sperimentali al fine di individuare le affinità e differenze che si sono riscontrate nei due casi limite d'angolo d'attacco tra le forzanti.

Onde e correnti ortogonali

L'analisi dei dati di laboratorio ottenuti durante la campagna WINGS condotta presso la Shallow Water Tank del Danish Hydraulic Institute, adatta per lo studio degli effetti combinati dovuti ad onde e correnti ortogonali in differenti regimi al variare della scabrezza al fondo, ha rivelato quanto segue:

- A seguito di test preliminari è stata individuata sia la posizione ottimale del punto di misura per le indagini ($x=18.5m$ e $y=16m$) sia i corretti tempi di acquisizione (7 minuti per prove con $T=2s$ e 4 minuti per prove con $T=1s$).
- Dai dati estrapolati dalle 24 sonde resistive relativi all'elevazione della superficie libera si è riscontrato che:
 - l'altezza d'onda è particolarmente influenzata dall'estensione del battitore. Difatti essa mostra, rispetto all'altezza target imposta al battitore, una riduzione del 50% in corrispondenza della sonda disposta al limite del generatore, un'amplificazione del 30% per le sonde poste al centro della vasca, mentre non subisce variazioni in corrispondenza della

- sonda più lontana dall'inlet della corrente e maggiormente centrata rispetto al battitore.
- indipendentemente dalla scabrezza al fondo si è riscontrato che la sovrapposizione della corrente sulla sola onda induce un maggior disturbo al moto ondoso.
 - Lo studio della variabilità dell'altezza d'onda nelle prove registrate durante l'acquisizione delle 16 Run lungo la verticale ha mostrato che le sonde aventi $y=4$ m e x compreso tra 18m e 21.5m, più centrate e vicine rispetto al battitore, restituiscono altezze d'onda in linea con il valore target fissato. Ciò accade in quanto esse non sono particolarmente influenzate dal fenomeno della riflessione né risentono di un eventuale effetto Venturi legato alla posizione delle sonde come avviene invece per quelle poste nella parte del battitore più distante dall'inlet (Figura 4.7).
 - Delle 24 sonde resistive, 5 sono state disposte appositamente per poter applicare il metodo di Faraci et al. (2015) e calcolare per tutte e tre le tipologie di fondale il coefficiente di riflessione K_{r4} che è risultato generalmente compreso tra 0.06 e 0.33 (Tabella 4.VIII).
- Le misure di velocità sono state ricavate per mezzo di 5 Vectrino Single Point. È risultato evidente che più grande è la scabrezza al fondo, maggiore è la dispersione tra ogni segnale del Vectrino in prossimità della parete, per tale motivo in presenza di ripples, dove il punto di misura gioca un ruolo chiave nelle modiche del campo di velocità, i profili di velocità di tutte le prove effettuate, in direzione dell'onda e della corrente, sono stati rappresentati in corrispondenza del proprio punto di acquisizione. Confrontando due set di prove (CO, WO, WC) (Figura 4.10 e Figura 4.11) in regime dominato dalla corrente (CD) e in regime dominato dall'onda (WD) si è ottenuto che:
 - per il regime CD il profilo di velocità mediato nel tempo in direzione della corrente per il caso WO assume valori pressoché nulli o devia leggermente verso valori negativi, mentre osservando i casi CO e WC i due casi si discostano lontano dal fondo con un incremento di velocità in co-presenza di forzanti. In direzione dell'onda in tutte e 3 le condizioni di moto, vicino al fondo si individua un'inversione di velocità in quasi tutte le posizioni del ripple. Per il caso WO si riscontra una più accentuata inversione di velocità con un punto di flesso in corrispondenza di $z/d=0.1$ con l'individuazione di una corrente di ritorno, via via che ci si allontana dal fondo;
 - per il regime WD in direzione della corrente, in prossimità del fondo il comportamento resta pressoché invariato rispetto al caso CD in tutte e tre le condizioni di moto, mentre lontano dal fondo, a differenza del regime CD, quando l'onda si sovrappone alla corrente, il profilo assume un comportamento pressoché coincidente con il caso di sola corrente presentando in alcuni casi un leggero decremento di velocità. Anche per il regime WD in direzione dell'onda si riscontra un'inversione di velocità al fondo meno marcata rispetto al caso CD. Per evidenziare le variazioni legate alla scabrezza al fondo per le tre tipologie di fondale (sabbia, ghiaia e ripples) sono stati sovrapposti i tre set di profili mediati

spazialmente nelle tre condizioni di moto (CO, WO, WC) nei due regimi CD e WD (Figura 6.1a-b) a parità di condizioni idrodinamiche da cui risulta che:

- il profilo di solo onde in regime CD assume valori molto piccoli invertendosi più volte in segno in presenza di fondo con sabbia assumendo invece valori pressoché pari a 0 in presenza di macro scabrezza; in regime WD nel caso SB la velocità assume valori di entità apprezzabile sempre negativi mentre si inverte ripetutamente in segno fino ad assumere valori negativi lontano dal fondo nel caso GB e RB;

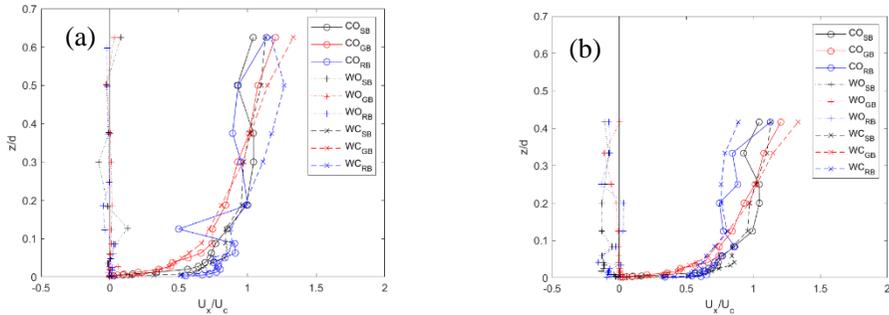


Figura 6.1 Profili di velocità in condizione di CO, WO e WC per sabbia (nero), ghiaia (rosso) e ripples (blu). a) regime CD; b) regime WD.

- in condizioni di CO e WC per tutte e tre le scabrezze la co-presenza di forzanti genera due comportamenti distinti in funzione del regime dominante: la velocità è maggiore nel caso WC rispetto al caso CO in regime CD mentre mostra piccole variazioni tra le due condizioni di moto in regime WD.
- In accordo con gli studi di Lim e Madsen (2016) è stata studiata la dipendenza dell'angolo di deviazione della velocità dalle condizioni idrodinamiche determinando, per ogni set di dati relativi alle tre scabrezze, una curva di tipo polinomiale funzione del rapporto tra la velocità della corrente e dell'onda e del diametro caratteristico dei sedimenti (d_{50}).
- Seguendo la procedura suggerita da Fredsøe et al. (1999), sono stati tracciati i profili in scala semi-logaritmica individuando per ogni coppia di prove (CO e WC) la velocità d'attrito e la scabrezza apparente rispettivamente pari a 30 volte l'intercetta dell'interpolazione del profilo logaritmico e al coefficiente angolare, mettendo in luce che:
 - Nel confronto tra regime WD e il regime CD si individua che in entrambi i casi, passando da fondo con ghiaia a fondo con ripples, sia la velocità d'attrito sia la scabrezza apparente si riducono, rispettivamente, del 50% la prima e di due ordini di grandezza la seconda, per entrambe le condizioni di moto (CO e WC); la velocità di attrito in tutte e tre le diverse tipologie di fondale in presenza di sola corrente e in presenza di onde e correnti risulta essere maggiore in regime dominato dalla corrente rispetto a quella individuata in regime dominato dalle onde;

- estendendo tali analisi all'intero campo di prove si è individuato un valore di numero di Reynolds della corrente che funge da spartiacque tra due comportamenti, in particolare:

$$\text{per } Re_c > 80000 \quad \frac{k_{s,wc}}{k_{s,co}} > 1 \quad \text{e} \quad \frac{u_{wc}^*}{u_{co}^*} > 1$$

$$\text{per } Re_c < 80000 \quad \frac{k_{s,wc}}{k_{s,co}} < 1 \quad \text{e} \quad \frac{u_{wc}^*}{u_{co}^*} < 1$$

avendo indicato con $\frac{k_{s,wc}}{k_{s,co}}$ e $\frac{u_{wc}^*}{u_{co}^*}$ i rapporti tra scabrezze apparenti e le velocità d'attrito ottenute nel caso di onde e correnti (WC) e sola corrente (CO).

- Dal confronto dei dati relativi alla presente campagna con studi precedenti di letteratura si è riscontrato che:
 - la campagna sperimentale relativa a onde e correnti ortogonali effettuate nel corso del presente lavoro ha consentito di ampliare il range di valori investigati da studi di letteratura precedenti indagando anche l'area caratterizzata da $k_{s,wc}/k_{s,co} < 1$.
 - indipendentemente dalla scabrezza al fondo, quando la velocità d'attrito dell'onda e corrente è maggiore di quella della sola corrente e quindi per valori di $Re_c > 80000$, si ha un brusco incremento della scabrezza apparente adimensionale proprio quando la velocità d'attrito misurata nell'interazione onda-corrente coincide con il caso di sola corrente. Per tal motivo è stato proposto un modello empirico che descrive il comportamento di tali parametri nelle due regioni.
- In presenza di fondo con ripples, ulteriori analisi del campo di moto medio hanno consentito l'individuazione della formazione di celle di ricircolo confrontando, a parità di condizioni idrodinamiche, il caso di sola onda con il caso di onde e correnti. Effettuando la composizione vettoriale della velocità lungo la direzione y e z per l'intero campo di prove è risultato evidente che:
 - sia in presenza di sola onda che in presenza di onde e correnti in funzione dei parametri idrodinamici, si individuano in modo più o meno evidente delle celle di forma ellittica le cui dimensioni sono state stimate sulla base dei transetti di misura verticali disponibili;
 - a parità di condizioni idrodinamiche quando la corrente si sovrappone all'onda l'entità delle celle si riduce in un'ellisse più schiacciata verso il fondo.
 - l'andamento del rapporto tra i due assi dell'ellissi che circonda la cella rispetto al parametro kd^3/LH ha consentito di individuare una legge interpolante di tipo esponenziale che distingue due curve funzione di un parametro legato alla velocità della corrente;
 - in presenza di sola onda, è stato possibile individuare una corrente di ritorno o undertow calcolata come la velocità media in corrispondenza dell'ultima elevazione dei punti di misura lungo il ripple; tale valore è risultato essere circa il 30 % inferiore rispetto al valore teorico calcolabile secondo la formulazione proposta da Dean e Dalrymple (1991) su fondo liscio, differenza quest'ultima verosimilmente imputabile alla differente scabrezza al fondo; plottando i valori di

undertow ottenuti per tutti i set di dati in funzione del rapporto H/d è stato possibile individuare una legge di potenza che legasse tale corrente di ritorno ai due parametri idrodinamici suddetti (H e d).

- Per comprendere meglio la dinamica del trasporto dei sedimenti su un fondo con ripples è stato studiato il comportamento delle strutture vorticosi in diverse fasi di un ciclo d'onda mettendo sempre a confronto il caso WO e il caso WC al fine di individuare le variazioni che nascono in co-presenza di forzanti. Plottando la vorticità adimensionalizzata rispetto al periodo T per 8 fasi di un ciclo d'onda è stato possibile affermare che:
 - in entrambe le condizioni di moto (WO e WC) è possibile individuare vortici antiorari che si staccano in corrispondenza della cresta già alla fase $\pi/4$ ed aumentano in intensità fino ad estendersi al massimo fino a $0.2 z/d$; lungo la fase decrescente dell'onda tali vortici si riducono fino a che si riformano vortici orari di pari entità ma con segno negativo;
 - in quasi tutte le fasi dell'onda la presenza di corrente sulla sola onda induce un decremento di vorticità al fondo e un incremento via via che si allontana da esso e tra fasi opposte del ciclo è individuabile una buona simmetria della vorticità.
 - i risultati ottenuti confrontati con studi precedenti come Faraci et al. (2008) e con Fredsøe et al. (1999), hanno mostrato che all'interno dello strato limite i risultati della vorticità inerenti al presente lavoro trovano maggiore riscontro con quelli di Faraci et al. (2008) rispetto a Fredsøe et al. (1999) in quanto nel secondo studio il distacco dei vortici è individuato per quasi tutte le fasi in modo più netto rispetto agli altri due studi; ciò è probabilmente legato alla forma del profilo dei ripples che in Fredsøe et al. (1999) risulta più appuntito facilitando la separazione del flusso con la generazione di una vorticità avente entità maggiore.

Onde e correnti collineari

Le analisi dei dati estrapolati durante la campagna sperimentale svolta all'interno del tubo a U, hanno consentito di ottenere i seguenti risultati:

- sono stati effettuati test al variare di ampiezza (a) e frequenza (f) del pistone per comprendere quali sono i parametri da imporre al sistema per ottenere le migliori prestazioni da parte dell'apparecchiatura. Si è riscontrato che:
 - il range di funzionamento ottimale dell'apparecchiatura si ha per frequenze comprese tra 0.1 e 0.4 Hz e per ampiezze maggiori o uguali a 0.5V;
 - il minimo errore percentuale tra segnale di input e output del pistone si ottiene in corrispondenza di due coppie di parametri imposti, $f=0.2\text{Hz}$ - $a=0.75\text{V}$ e $f=0.3\text{Hz}$ - $a=0.5\text{V}$;
- Attraverso l'analisi dell'evoluzione temporale di un fondo piano costituito da sabbia, sottoposto ad un campo di moto caratterizzato sia dalla presenza di sola onda sia dalla contemporanea presenza di onde e correnti collineari è stato possibile studiare l'evoluzione delle due grandezze caratteristiche del ripple ($\lambda_t(t)$ e $\eta_t(t)$); tale analisi ha mostrato che:

- in presenza di onde e correnti sono necessari tempi più lunghi affinché le forme di fondo si stabilizzino rispetto al caso di sole onde;
 - confrontando le prove WO e WC si nota un incremento della lunghezza del ripple nel caso WC rispetto al caso WO nella prova con ampiezza $a=0.75V$ che non si verifica nell'altra condizione idrodinamica studiata ($f=0.3Hz$ - $a=0.5V$) dove a regime la lunghezza del ripple rimane pressoché invariata.
 - in entrambe le condizioni idrodinamiche l'altezza del ripple al variare del tempo tende a crescere fino a stabilizzarsi raggiungendo valori leggermente più grandi in presenza di onde e correnti rispetto al caso di sole onde.
 - i risultati del presente studio sono stati messi a confronto con curve predittive e dati sperimentali in un grafico in scala logaritmica che descrive le grandezze geometriche dei ripples. I dati del presente studio mostrano una dispersione simile agli altri set di dati, tendendo ad assumere valori pressoché simili a quelli di Faraci et al. (2002) sia in termini di lunghezza che di altezza del ripples. La geometria dei ripples generati in presenza di sole onde è risultata non differire significativamente da quella dei ripples generati in presenza di onde e correnti collineari con un leggero incremento di dimensioni del ripples in presenza di corrente.
- Seguendo le analisi suggerite da Fredsøe et al. (1999) e partendo da una condizione già stabilizzata delle forme di fondo, è stata studiata, per mezzo di sequenze fotografiche, l'evoluzione temporale della formazione dei vortici lungo diverse fasi di un ciclo d'onda. Da tale studio è risultato evidente che:
 - alla fase 90° appare un vortice ben definito che cresce e si stacca nettamente in corrispondenza della cresta alla fase 120° arrivando ad una dimensione massima di 2.5 cm. Successivamente tale vortice tende a migrare fino a 150° dove, in corrispondenza dell'inversione del flusso (190°) si individua un vortice antiorario meno definito che lungo la restante fase del ciclo tende a dissolversi;
 - in co-presenza di onde e correnti collineari si individua alla fase 90° un vortice più piccolo e meno definito del caso WO che si muove in direzione off-shore più rapidamente rispetto al caso di sola onda. Entrambi questi effetti, vortice meno definito e maggiore migrazione, sono probabilmente dovuti alla presenza della corrente la quale, quando si sovrappone al caso di sola onda, tende a livellare la vorticità al fondo;
 - i risultati ottenuti nel presente studio sono stati messi a confronto con i dati di Fredsøe et al. (1999). Nel presente lavoro si riscontra che la massima estensione dei vortici avviene alla fase 120° mentre in Fredsøe et al. (1999) avviene invece alla fase 150° con individuazione di altri piccoli vortici in tutte le altre fasi. Tale differenza è probabilmente legata alla forma del ripples: difatti in presenza di onde e correnti, dove il ripples tende ad avere una cresta meno appuntita, i vortici individuati sono meno definiti (Horikawa e Mizutani (1992)); i risultati ottenuti in termini di segno della vorticità alle varie fasi dell'onda nel presente

studio sono anche in accordo con quelli ottenuti da Admiral et al. (2006); non è stato possibile tuttavia confrontare le dimensioni essendo i parametri in gioco presenti nei due lavori in scale completamente diverse.

- In presenza di fondo fisso (sabbia, ghiaia e ripples) sono stati estrapolati profili di velocità lineari e in scala logaritmica in tre differenti condizioni di moto (stazionario, oscillante e combinato). Dai risultati ottenuti si è riscontrato che:
 - il segnale restituito per le prove di WC si sviluppa non interamente nel quadrante positivo, pertanto la media totale restituisce un valore inferiore rispetto al caso di sola corrente quindi la sovrapposizione dell'onda sul caso di sola corrente, restituisce un profilo di velocità media inferiore rispetto al caso di sola corrente;
 - in presenza sia di moto stazionario che combinato il coefficiente di scabrezza e la velocità d'attrito crescono all'aumentare della portata in condotta e all'aumentare della scabrezza al fondo;
 - la velocità d'attrito e la scabrezza equivalente risultano essere, per tutte e tre le scabrezze, maggiori nel caso di interazione di onde e correnti collineari rispetto al caso di sola corrente;
 - in presenza di moto stazionario i dati sperimentali sono stati messi a confronto con il modello numerico di Scandura et al. (2016) al fine di indagare in modo più dettagliato il comportamento della velocità al fondo colmando i limiti legati alla strumentazione adottata; difatti all'interno del primo centimetro partendo dal fondo il modello numerico mostra un'inversione di velocità verso valori negativi non apprezzabile sperimentalmente; i dati sperimentali e numerici mostrano un buon adattamento fino a $0.1 z/d$ dove poi i due profili tendono a divergere a causa della condizione di "free slip" imposta nel modello numerico.

Campagne a confronto e Sviluppi futuri

Si ritiene che il presente lavoro abbia contribuito ad ampliare significativamente i dati di letteratura inerenti all'interazione di onde e correnti per diverse tipologie di scabrezza al fondo analizzando i due casi limite in relazione all'angolo d'attacco tra le forzanti.

Dai risultati ottenuti nelle due campagne appare chiaro che tale angolo risulta essere un parametro che non può essere trascurato per l'evoluzione del campo di moto e per lo studio degli sforzi tangenziali. Essendo le due campagne effettuate su apparecchiature differenti e avendo optato per scelte sperimentali diverse per ognuna di esse, nella Tabella 6.I viene riportato uno schema che esplicita le differenze progettuali scelte nelle due differenti campagne.

Tabella 6.I Differenze tra le due campagne sperimentali investigate.

Onde e Correnti Ortogonali	Onde e Correnti Collineari
solo fondo fisso	fondo mobile e fondo fisso
regime CD e regime WD	solo regime WD
5 o 9 punti di misura lungo il ripple	3 o 5 punti di misura lungo il ripple
un solo regime di moto stazionario	4 regimi di moto stazionario
profili di velocità in due distinte direzioni	profili di velocità in un'unica direzione

Dai risultati ottenuti da entrambe le campagne sperimentali è risultato evidente che mentre in presenza di onde e correnti collineari è stato possibile ottenere solo un regime WD (Figura 6.2b) e la velocità in co-presenza di forzanti si riduce rispetto al caso di sola corrente, in presenza di onde e correnti ortogonali (Figura 6.2a) i profili di velocità nel caso di sola corrente si intersecano con quelli relativi al caso WC. In regime CD velocità è maggiore quando l'onda si sovrappone alla sola corrente.

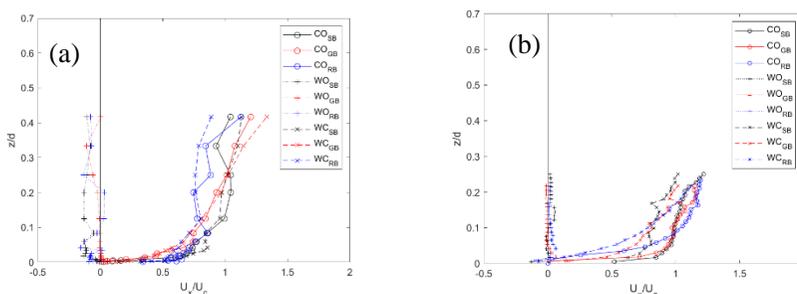


Figura 6.2 Profili di velocità in condizione di CO, WO e WC per sabbia (nero), ghiaia (rosso) e ripples (blu) in regime WD. a) onde e correnti ortogonali; b) onde e correnti collineari.

Nella campagna di onde e correnti collineari, la presenza di un Vectrino Profiler ha consentito di ottenere informazioni più dettagliate del campo di moto in prossimità del fondo rispetto alla campagna sperimentale di onde e correnti ortogonali per i quali si sono utilizzati Vectrino Single Point, per cui i profili di sola corrente non restituiscono informazioni particolarmente dettagliate al fondo; tale risultato è stato confermato e maggiormente investigato dal confronto tra i dati sperimentali del tubo a U e quelli numerici del modello numerico di Scandura et al. (2016) in condizioni di moto stazionario.

Inoltre in presenza di onde e correnti collineari la scabrezza apparente e la velocità d'attrito crescono proporzionalmente con la scabrezza del fondo e il rapporto tra il caso WC e il caso CO risulta sempre maggiore di 1; tale comportamento invece non è riscontrabile in presenza di onde e correnti ortogonali dove invece si individua un parametro di scissione, che è risultato essere il numero di Reynolds della corrente. In particolare si è visto che per valori di Re_c maggiori di 80000 in presenza di onde e correnti la scabrezza e la velocità di attrito risultano essere maggiori rispetto al caso di sola corrente; al di sotto di $Re_c=80000$ avviene l'esatto contrario confermando dunque la rilevanza del rapporto U_c/U_0 quale parametro chiave nell'interazione onde- correnti ortogonali.

Aspetto comune in entrambe le campagne è la formazione dei vortici in corrispondenza alle creste dei ripples che, anche se in un caso su fondo fisso e nell'altro su fondo mobile (Figura 6.3), possono comunque essere messi a confronto dal momento che l'analisi su fondo mobile è stata effettuata una volta che le forme di fondo si sono stabilizzate e quindi le variazioni che subiscono sono di entità trascurabile. Nello specifico, in entrambi i casi nelle fasi crescenti dell'onda è stato possibile individuare un vortice in senso orario che si stacca nettamente in corrispondenza della cresta di destra; inoltre sia in presenza di sola onda sia nei casi di onde e correnti ortogonali e collineari, la presenza della corrente sul caso di sola onda riduce l'entità del vortice vicino al fondo. Non è possibile confrontare l'andamento della vorticità fuori dallo strato limite in quanto in presenza di onde e correnti collineari le sole riprese della videocamera non mostrano il doppio vortice che teoricamente si dovrebbe formare lungo la colonna d'acqua (Sleath

(1976)). In Figura 6.3 vengono messi a confronto i vortici che si instaurano in presenza di sole onde in presenza di fondo fisso (WINGS) e fondo mobile (Tubo a U); in entrambi i casi si individua un vortice orario che si stacca in corrispondenza della cresta di sinistra.

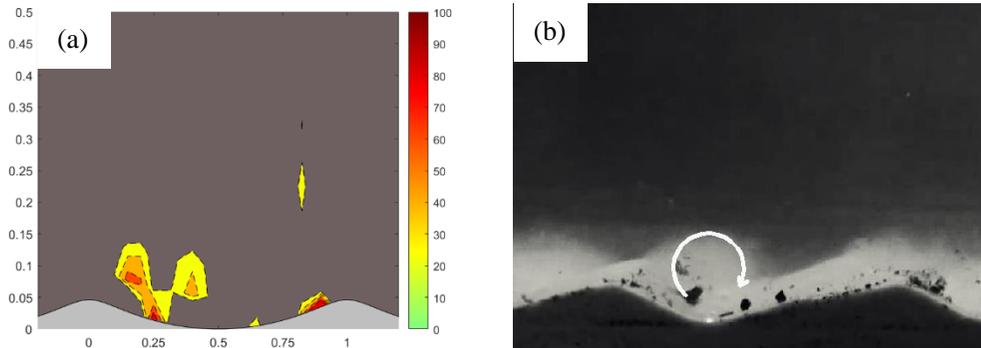


Figura 6.3 Confronto vorticità in presenza di sole onde alla fase $\pi/2$. a) vortice orario fondo fisso; b) vortice orario fondo mobile.

Gli imprevisti temporali non preventivabili legati alla pandemia mondiale, non hanno permesso di investigare ulteriormente alcuni aspetti che appaiono di particolare interesse per sviluppi futuri. Difatti, viste le limitazioni nell'accesso ai laboratori, la scarsa reperibilità dei materiali, la complessa messa appunto dell'apparecchiatura, le limitazioni in termini di sollecitazioni dell'apparecchiatura, le tempistiche pratiche nel montaggio dei diversi fondali etc., il tempo necessario per svolgere un ciclo completo di prove (CO, WO, e WC) su tre fondali all'interno del tubo a U ha consentito di investigare un solo set di parametri idrodinamici. Sarebbe tuttavia interessante individuare i parametri f e a al fine di riuscire ad ottenere anche per onde e correnti collineari una prova in regime CD, per poter analizzare eventuali differenze e similitudini con il caso WD.

Un altro aspetto interessante sarebbe quello di confrontare i dati ottenuti per il caso WO e il caso WC per la campagna del tubo a U con il modello di Scandura et al. (2016) esteso ai moti oscillanti e combinati. Una volta validato questo modello per mezzo dei dati sperimentali in nostro possesso, sarebbe interessante infittire le informazioni sperimentali ottenute nei punti di misura acquisiti lungo il ripple, estrapolando le informazioni su altri punti lungo il profilo longitudinale al fine di studiare dettagliatamente le formazioni delle celle e la vorticità anche per onde e correnti collineari.

Partendo dal lavoro fin qui svolto, un ulteriore aspetto di particolare interesse innovativo è quello statistico. Facendo seguito alle considerazioni di Faraci et al. (2018) i quali hanno analizzato gli effetti che le onde hanno sulle statistiche della velocità nella direzione della corrente, i dati ottenuti in questa campagna potrebbero certamente essere usati come input per lo studio di questi aspetti che risultano, a conoscenza di chi scrive, ancora poco analizzati.

Lista Tabelle

Tabella 3.I Classificazione dei modelli per il trasporto di fondo (Kamphuis, 1975)	45
Tabella 3.II Weak Spots Vectrino	58
Tabella 3.III Disposizione delle sonde di livello	60
Tabella 3.IV Posizione Vectrini per fondo con sabbia, ghiaia e ripples	62
Tabella 4.I Coordinate e Velocità misurate per esperimenti preliminari di sola corrente	67
Tabella 4.II Coordinate e Velocità misurate per esperimenti preliminari in condizione di onde e correnti	67
Tabella 4.III Parametri idrodinamici adottati durante la campagna per le prove su fondo con sabbia	69
Tabella 4.IV Parametri idrodinamici adottati durante la campagna per le prove su fondo con ripples (Run_a e Run_b relativi alle due configurazioni del supporto)	70
Tabella 4.V Esempio dei parametri di settaggio per esperimenti condotti su una generica Run (Run 60)	71
Tabella 4.VI Altezza media misurata nelle 3 sonde per la prova di sola onda e per la prova di onde e correnti con l'errore percentuale rispetto al valore di altezza target imposto al battitore	73
Tabella 4.VII Valutazione della riflessione nel caso di fondo con ripples	76
Tabella 4.VIII Coefficiente di riflessione K_{r4} e H_m per tutte le prove della campagna WINGS	77
Tabella 4.IX Parametri dimensionali e adimensionali per le prove su fondo con sabbia: U_c velocità target della corrente, U_o velocità target dell'onda, \hat{U}_c velocità misurata della corrente, \hat{U}_o velocità misurata dell'onda, \hat{U}_c/\hat{U}_o parametro di velocità indice del regime dominante onda-corrente, Re_w numero di Reynolds dell'onda e Re_c numero di Reynolds della corrente	78
Tabella 4.X Parametri dimensionali e adimensionali per le prove su fondo con ghiaia	78
Tabella 4.XI Parametri dimensionali e adimensionali per le prove su fondo con ripples	79
Tabella 4.XII Velocità d'attrito, scabrezza apparente e Re^* per la campagna WINGS	97
Tabella 5.I Esperimenti preliminari: parametri di input (a e f) e calcolati (h^* , V , A , u_o , Re , ε_r)	117
Tabella 5.II Parametri adottati durante la campagna per le prove su fondo mobile	118
Tabella 5.III Parametri adottati durante la campagna per le prove su fondo fisso (sabbia, SB; ghiaia, GB; ripples, RB)	118
Tabella 5.IV Esempio dei parametri di settaggio per esperimenti condotti su una generica Run _f (Run13)	119
Tabella 5.V Parametri dimensionali e adimensionali della campagna sperimentale su fondo mobile	123

Tabella 5.VI Parametri determinati per le prove in presenza di sola corrente al variare della scabrezza al fondo.....	131
Tabella 5.VII Parametri dimensionali e adimensionali per le prove su fondo fisso per le prove del “tubo a U”.....	141
Tabella 6.I Differenze tra le due campagne sperimentali investigate.	149

Lista Figure

Figura 2.1 Rappresentazione 3d di un tratto di costa con individuazione delle forzanti studiate nel presente lavoro, onde [1] e correnti [2], e della formazione di forme di fondo [3].	10
Figura 2.2 Schematizzazione delle correnti generate dalle onde (Komar, 1974).	11
Figura 2.3 Rappresentazione del radiation stress dovuto alla presenza di onde.	12
Figura 2.4 Schematizzazione delle direzioni principali dei tensori di radiazione S_{XX} e S_{YY} (Foti, 2002).	14
Figura 2.5 Componenti del radiation stress dovute ad un attacco obliquo del moto ondosso (Foti, 2002).	14
Figura 2.6 Trasporto di massa al di fuori della zona di breaking in un'onda progressiva irrotazionale ($kd=1$).	17
Figura 2.7 Profili di velocità all'interno dello strato limite.	18
Figura 2.8 Schemi di distribuzioni di viscosità turbolenta media (Foti (2002)).	20
Figura 2.9 Andamento del coefficiente d'attrito nel caso di moto oscillante su fondo piano con sedimenti fissi (Kamphuis, 1975).	21
Figura 2.10 Grafico di Shields (modificato) per la determinazione delle condizioni di incipiente mobilità dei sedimenti (Foti, 2002).	23
Figura 2.11 a) variazione all'interno dello strato limite; b) Intensità della turbolenza al variare dell'altezza d'onda (da Kemp and Simons (1982)).	25
Figura 2.12 a) andamento del rapporto tra lo sforzo tangenziale del caso di onda più corrente sul caso di sola corrente al variare di Re_w per fissato Re_c ; b) Schema della variazione dello sforzo tangenziale adimensionalizzato al variare di Re_w fissato Re_c (da Lodahl et al. (1998)).	26
Figura 2.13 Velocità media, u_R e angolo del flusso medio, θ_R , per il caso di sola corrente (pallini pieni) e il caso di onde-correnti a 90° (quadrati vuoti) (Lim e Madsen 2016). a) fondo liscio; b) fondo scabro ($d_{50} = 12.5$ mm).	27
Figura 2.14 Profilo longitudinale dei ripples.	28
Figura 2.15 Grafico individuazione fasi di mobilitazione dei sedimenti (Van Rijn 1990).	29
Figura 2.16 Schema di come i ripples possono presentarsi nella zona costiera.	30
Figura 2.17 Transizione da rolling grain ripples a vortex ripples.	31
Figura 2.18 Celle di ricircolo generate in presenza di moto ondosso su letto con ripples (Sleath 1976).	32
Figura 2.19 Vorticità su letto con ripples. a) schema doppia struttura delle celle di ricircolo b) sequenza schematica di vorticità lungo un ripple.	33
Figura 2.20 Analisi di vortici su letto con ripples. a) caso di sole onde; b) caso di onde e correnti collineari (Fredsoe et al. (1999)).	35
Figura 2.21 Andamento del coefficiente d'attrito per i vari angoli d'attacco indagati tra le due forzanti (Andersen e Faraci 2003).	36
Figura 2.22 Celle di Ricircolo (Faraci et al., 2008). a) caso di solo onde; b) caso di onde più corrente.	37
Figura 3.1 Tipologie di wavemaker: a) flap wavemaker; b) piston wavemaker	42
Figura 3.7 Danish Hydraulic Institute (Hørsholm, Danimarca). a) Street view da Google Maps; b) Rendering.	47
Figura 3.8 Planimetria vasca di sperimentazione.	48

Figura 3.9 Vasca di Sperimentazione. a) foto laboratorio; b) rendering laboratorio ...	49
Figura 3.10 Generatori di forzanti. a) serie di battitori; b) regolatori di flusso.....	50
Figura 3.11 a) Realizzazione pannello di Ripples; b) rendering del pannello.	50
Figura 3.12 a) b) c) Esempio dei tre diversi pannelli utilizzati per il fondo. d)	
Disposizione delle pietre all'esterno dell'area del pannello.....	51
Figura 3.2 Apparato sperimentale "Tubo a U".	52
Figura 3.3 Impianto "tubo a U". a) pianta; b) sezione.	53
Figura 3.4 Generazione del moto oscillatorio. a) pistone; b) valvola proporzionale; c)	
segnale input e output del pistone ($a=0.5$ $f=0.3$).....	54
Figura 3.5 generazione moto permanente. a) pompa; b) pannello di controllo; c) curve	
caratteristiche fornite dal costruttore.	54
Figura 3.6 Fondi realizzati. a) sabbia; b) ghiaia; c) ripples.	55
Figura 3.13 a) schema del Vectrino b) down looking; c) side looking; d) profiler (da:	
http://www.nortek-es.com/lib/data-sheets/datasheet-vectrino-lab).....	57
Figura 3.14 Telecamera 4k. https://www.sony.it/electronics/videocamere-handycam/fdr-ax53	58
Figura 3.16 Disposizione planimetrica della strumentazione di misura all'interno della	
vasca.	59
Figura 3.17 Distanze relative tra i sensori atti allo studio della riflessione secondo Faraci	
et al. (2015).....	60
Figura 3.18 Sonde di Livello. a) calibrazione sonda; b) rendering sonda.....	60
Figura 3.19 Disposizione dei Vectrino per sabbia e ghiaia. a) sezione; b) pianta.	61
Figura 3.20 Disposizione dei Vectrino per fondo con ripples. a) sezione del trolley con	
Vectrini; b) Posizione dei Vectrini lungo il profilo del ripple per entrambe le configurazioni	
del supporto.	61
Figura 3.21 a) Struttura portante per disposizione Vectrino; b) disposizione Vectrini su	
sabbia; c) disposizione Vectrini su ghiaia.	62
Figura 3.22 Disposizione in linea dei Vectrini su fondo con ripples. a) foto; b) render	
3d.	62
Figura 3.15 Strumentazione adottata nel "tubo a U". a) posizionamento dello strumento;	
b) particolare dello strumento tarato per le varie elevazioni di misura.	63
Figura 4.1 Prova con tracciante	66
Figura 4.2 Misure preliminari di Velocità per il caso di sola corrente $U_c=0.21$ $m\cdot s^{-1}$. a)	
direzione x ($y=6m$); b) direzione y ($x=20m$)	68
Figura 4.3 Risultati prova di lunga durata. a) media d'insieme dell'onda di superficie;	
b) media mobile e andamento della velocità lungo la direzione dell'onda.	68
Figura 4.4 Analisi dell'altezza d'onda per la prova di sola onda (Run 44, WO, $d=0.4$ m,	
$T=2$ s, $H=0.08$ m). a) Sonda WG2; b) Sonda WG11; c) Sonda WG23.....	72
Figura 4.5 Analisi dell'altezza d'onda per la prova di onde e correnti (Run 39, WC,	
$d=0.4$ m, $T=2$ s, $H=0.08$ m $U_c=0.21$ $m\cdot s^{-1}$). a) Sonda WG2; b) Sonda WG11; c) Sonda WG23.	
.....	72
Figura 4.6 Analisi dell'altezza d'onda per la prova su fondo con sabbia (Sonda WG11,	
$d=0.4$ m, $T=2$ s, $H=0.08$ m $U_c=0.21$ $m\cdot s^{-1}$). a) Run 4, caso solo onda WO; b) Run 8, caso onda	
e corrente WC.	73
Figura 4.7 Rapporto tra altezza d'onda misurata e altezza target al variare di z/d per la	
Run 39 (WC, $d=0.4m$, $H=0.08m$ $T=2s$). a) WG1-2-3 $x=13.5m$; b)WG4-5-6-7-8 $x=16m$; c)	
WG9-10-11-12-13-14-15 $x=18m$; d) WG17-18-19-20-21 $x=19.5m$; e) WG22-23-24 $x=21.5m$.	
.....	74

Figura 4.8 Segnale delle 5 sonde resistive (WG11-WG15) per lo studio della riflessione. a) WO; b) WC.	75
Figura 4.9 Profili di velocità media acquisiti dai Vectrino nel caso di sola corrente (CO, $d=0.4m$). a) Run 1 (SB, U_x); b) Run 1 (SB, U_y); c) Run 32 (GB, U_x); d) Run 32 (GB, U_y); e) Run 40 (RB, U_x); f) Run 40 (RB, U_y).	80
Figura 4.10 Confronto profili di velocità lungo il ripple per Run 40 (CO), Run 45 (WO) e Run 41 (WC) ($d=0.4m$ $H=0.12m$ e $T=2s$, $\hat{U}_c/\hat{U}_0=1.15$). a) direzione della corrente U_x ; b) direzione dell'onda U_y . CD.....	81
Figura 4.11 Confronto tra i profili di velocità lungo il ripple per Run 51 (CO), Run 47 (WO) e Run 52 (WC) ($d=0.6m$, $H=0.12m$ e $T=2s$, $\hat{U}_c/\hat{U}_0=0.51$, WD). a) direzione della corrente U_x ; b) direzione dell'onda U_y	82
Figura 4.12 Confronto tra i profili di velocità lungo il ripple per Run 40 (CO), Run 37 (WO) e Run 38(WC) ($d=0.4m$, $H=0.05m$ e $T=1s$, $\hat{U}_c/\hat{U}_0=4.72$, CD). a) direzione della corrente U_x ; b) direzione dell'onda U_y	83
Figura 4.13 Confronto tra i profili di velocità lungo il ripple per Run 40 (CO), Run 43 (WO) e Run 42 (WC) ($d=0.4m$ $H=0.08m$ e $T=1s$, $\hat{U}_c/\hat{U}_0=2.87$, CD). a) direzione della corrente U_x ; b) direzione dell'onda U_y	84
Figura 4.14 Confronto tra i profili di velocità lungo il ripple per Run 40 (CO), Run 44 (WO) e Run 39 (WC) ($d=0.4m$ $H=0.08m$ e $T=2s$, $\hat{U}_c/\hat{U}_0=1.59$, CD). a) direzione della corrente U_x ; b) direzione dell'onda U_y	84
Figura 4.15 Confronto tra i profili di velocità lungo il ripple per Run 51 (CO), Run 49 (WO) e Run 54 (WC) ($d=0.6m$, $H=0.05m$ e $T=1s$, $\hat{U}_c/\hat{U}_0=4.55$, CD). a) direzione della corrente U_x ; b) direzione dell'onda U_y	85
Figura 4.16 Confronto tra i profili di velocità lungo il ripple per Run 51 (CO), Run 48 (WO) e Run 53 (WC) ($d=0.6m$ $H=0.08m$ e $T=1s$, $\hat{U}_c/\hat{U}_0=3.46$, CD). a) direzione della corrente U_x ; b) direzione dell'onda U_y	85
Figura 4.17 Confronto tra i profili di velocità lungo il ripple per Run 51 (CO), Run 46 (WO) e Run 50 (WC) ($d=0.6m$, $H=0.08m$ e $T=2s$, $\hat{U}_c/\hat{U}_0=0.95$, WD). a) direzione della corrente U_x ; b) direzione dell'onda U_y	86
Figura 4.18 Profilo di velocità in condizioni CO, WO e WC in direzione della corrente U_x in regime dominato dall'onda ($d=0.6m$, $H=0.12m$, $T=2s$ e $U_c=0.14m\cdot s^{-1}$, WD). a) caso SB (Run10-17-12); b) caso GB (Run19-27-23); c) caso RB (Run 51-47-52), i pedici a e b per il caso CO e WC, si riferiscono rispettivamente alla prima e alla seconda configurazione del carrello.....	87
Figura 4.19 Profilo di velocità in condizioni CO, WO e WC in direzione dell'onda U_y in regime dominato dall'onda ($d=0.6m$, $H=0.12m$, $T=2s$ e $U_c=0.14m\cdot s^{-1}$, WD). a) caso SB (Run10-17-12); b) caso GB (Run19-27-23); c) caso RB (Run 51-47-52), i pedici a e b per il caso CO e WC, si riferiscono rispettivamente alla prima e alla seconda configurazione del carrello.....	88
Figura 4.20 Profilo di velocità in condizioni CO, WO e WC in direzione della corrente U_x in regime dominato dalla corrente ($d=0.4m$, $H=0.08m$, $T=2s$ e $U_c=0.21m\cdot s^{-1}$, CD). a) caso SB (Run1-4-8); b) caso GB (Run32-29-33); c) caso RB (Run 40-44-39).	90
Figura 4.21 Profilo di velocità in condizioni CO, WO e WC in direzione dell'onda U_y in regime dominato dalla corrente ($d=0.4m$, $H=0.08m$, $T=2s$ e $U_c=0.21m\cdot s^{-1}$, CD). a) caso SB (Run1-4-8); b) caso GB (Run32-29-33); c) caso RB (Run 40-44-39).....	91
Figura 4.22 Direzione del flusso per il caso di onde e correnti ($d=0.4m$ $H=0.12m$ e $T=2s$, $U_c=0.21 m\cdot s^{-1}$). a) fondo con sabbia (Run7); b) fondo con ghiaia (Run34); c) fondo con ripples (Run39).....	92

Figura 4.23 Direzione media del flusso rispetto al rapporto tra la velocità target della corrente e la velocità dell'onda.	93
Figura 4.24 Profilo logaritmico al variare del limite superiore (CO e WC, $d=0.6m$, $H=0.12m$, $T=2s$ e $U_c=0.14m\cdot s^{-1}$). a) $0.12 d$; b) $0.20 d$; c) $0.17 d$	94
Figura 4.25 Profilo logaritmico prova di sola corrente e prova di onda più corrente in regime dominato dalla corrente (CD) per le tre scabrezze (CO e WC, $d=0.4m$, $H=0.08m$, $T=2s$ e $U_c=0.21m\cdot s^{-1}$). a) fondo con sabbia (SB, Run 1-8, $\hat{U}_c/\hat{U}_0=1.13$, $Re_c=83037$); b) fondo con ghiaia (GB, Run 32-33, $\hat{U}_c/\hat{U}_0=1.33$, $Re_c=87194$); c) fondo con ripples (RB, Run 40-39, $\hat{U}_c/\hat{U}_0=1.59$, $Re_c=94972$).....	95
Figura 4.26 Profilo logaritmico prova di sola corrente e prova di onda più corrente in regime dominato dall'onda (WD) per le tre scabrezze (CO e WC, $d=0.6m$, $H=0.12m$, $T=2s$ e $U_c=0.14m\cdot s^{-1}$). a) fondo con sabbia (SB, Run 10_12, $\hat{U}_c/\hat{U}_0=0.64$, $Re_c=74459$); b) fondo con ghiaia (GB, Run 19_23, $\hat{U}_c/\hat{U}_0=0.65$, $Re_c=75476$); c) fondo con ripples (RB, Run 51_52, $\hat{U}_c/\hat{U}_0=0.51$, $Re_c=61428$).....	96
Figura 4.27 Confronto tra scabrezza apparente ks , $WCks$, CO in funzione del rapporto $U0uWC$ * dei dati della campagna WINGS con dati di letteratura in presenza di onde e correnti su fondo con sabbia o ghiaia.	98
Figura 4.28 Confronto tra scabrezza apparente ks , $WCks$, CO in funzione del rapporto $U0uWC$ * dei dati della campagna WINGS con dati di letteratura in presenza di onde e correnti su fondo con ripples.	98
Figura 4.29 Rapporto tra scabrezza apparente ks , $WCks$, CO in funzione del rapporto della velocità d'attrito uWC * uCO *.....	99
Figura 4.30 Formazione celle di ricircolo ($d=0.4m$, $H=0.08m$, $T=2s$ e $U_c=0.21m\cdot s^{-1}$). a) Run 44, WO; b) Run 39 WC (CD).	101
Figura 4.31 Formazione celle di ricircolo ($d=0.4m$, $H=0.12m$, $T=2s$ e $U_c=0.21m\cdot s^{-1}$). a) Run 45-66, WO; b) Run 41-61 WC (CD).....	102
Figura 4.32 Formazione celle di ricircolo ($d=0.6m$, $H=0.12m$, $T=2s$ e $U_c=0.14m\cdot s^{-1}$). a) Run 47, WO; b) Run 52-58 WC (WD).	103
Figura 4.33 Formazione celle di ricircolo ($d=0.6m$, $H=0.08m$, $T=1s$ e $U_c=0.14m\cdot s^{-1}$). a) Run 48, WO; b) Run 53 WC (CD).	104
Figura 4.34 Rapporto tra le diagonali dell'ellissi della cella $\xi\zeta$ al variare del parametro adimensionale $kd3LH$	105
Figura 4.35 Corrente di ritorno (undertow) U_u al variare del rapporto H/d	106
Figura 4.36 (continua)	108
Figura 4.37 (continua)	111
Figura 5.1 Segnali input (linea nera) e output (linea rossa) per i tre range individuati (rosso, giallo e verde vedi Figura 5.2). a) zona rossa $f=0.2$ $a=0.2$; a) zona rossa $f=0.5$ $a=0.25$; c) zona gialla $f=0.1$ $a=0.5$; d) zona gialla $f=0.2$ $a=0.5$; e) zona verde $f=0.3$ $a=0.5$; f) zona verde $f=0.2$ $a=0.75$	116
Figura 5.2 Range funzionamento "tubo a U".	117
Figura 5.3 Posizione Vectrino in corrispondenza del fondo all'interno della vasca. a) cavo del ripple; b) fondo con ghiaia.	119
Figura 5.4 Evoluzione temporale del fondo con formazione dei ripples Run_m 7. a) fase iniziale t_0 ; b) fase intermedia t_{320s} ; c) fase finale t_{600s}	120
Figura 5.5 Costruzione della griglia per la misurazione delle grandezze caratteristiche del ripple (λ_r e η_r)	121
Figura 5.6 Andamento della lunghezza del ripple in funzione del tempo. a) Run_m 2, Prova WO $f=0.2$ Hz $a=0.75$ V; b) Run_m 6, Prova WC $f=0.2$ Hz $a=0.75$ V $c=10$ giri/s; c) Run_m 3, Prova WO $f=0.3$ Hz $a=0.5$ V; d) Run_m 7, Prova WC $f=0.3$ Hz $a=0.5$ V $c=10$ giri/s.....	122

Figura 5.7 Andamento dell'altezza del ripple in funzione del tempo. a) Run _m 2, Prova WO $f=0.2$ Hz $a= 0.75$ V; b) Run _m 6, Prova WC $f=0.2$ Hz $a= 0.75$ V $c=10$ giri/s; c) Run _m 3, Prova WO $f=0.3$ Hz $a= 0.5$ V; d) Run _m 7, Prova WC $f=0.3$ Hz $a= 0.5$ V $c=10$ giri/s.	122
Figura 5.8 Confronto relativo alla geometria dei ripples in presenza di onde regolari tra il presente studio e studi precedenti (Nielsen (1981), Grasmeyer et al. (2004), Faraci et al. (2002), Petrotta et al. (2018) e Bosman et al. (1981)). a) andamento del rapporto tra la lunghezza dei ripples e l'ampiezza orbitale dell'onda rispetto al numero di mobilità; b) andamento del rapporto tra l'altezza dei ripples e l'ampiezza orbitale dell'onda rispetto al numero di mobilità.	124
Figura 5.9 Profili ripples formati durante le prove. a) Run _m 2, Prova WO $f=0.2$ Hz $a= 0.75$ V; b) Run _m 6, Prova WC $f=0.2$ Hz $a= 0.75$ V $c=10$ giri/s; c) Run _m 3, Prova WO $f=0.3$ Hz $a= 0.5$ V; d) Run _m 7, Prova WC $f=0.3$ Hz $a= 0.5$ V $c=10$ giri/s.	125
Figura 5.10 Continua.....	126
Figura 5.11 Evoluzione dei vortici in diverse fasi del periodo d'onda per il caso di sola onda e onde e correnti ($f=0.3$ Hz e $a=0.5$ V $c=10$). a) caso WO fase 0°; b) caso WC fase 0°; c) caso WO fase 60°; d) caso WC fase 60°; e) caso WO fase 90°; f) caso WC fase 90°; g) caso WO fase 120°; h) caso WC fase 120°; i) caso WO fase 150°; l) caso WC fase 150°; m) caso WO fase 190°; n) caso WC fase 190°; o) caso WO fase 220°; p) caso WC fase 220°; q) caso WO fase 280°; r) caso WC fase 280°.....	127
Figura 5.12 Moto stazionario in presenza di fondo con sabbia. a) Profilo di velocità media; b) profilo in scala semi-logaritmica.....	130
Figura 5.13 Moto stazionario in presenza di fondo con ghiaia. a) Profilo di velocità media; b) profilo in scala semi-logaritmica.....	132
Figura 5.14 Profili di velocità lungo il ripple. a) $c=10$ giri/s; a) $c=13$ giri/s; a) $c=15$ giri/s; a) $c=18$ giri/s.....	133
Figura 5.15 Moto stazionario in presenza di fondo con ripples. a) profilo medio di velocità; b) profilo medio in scala semi-logaritmica (doppio strato log).....	134
Figura 5.16 Profilo adimensionalizzato al variare della corrente. a) profili su sabbia; b) profili su ghiaia; c) profili su ripples.....	135
Figura 5.17 Confronto del profilo di velocità determinato col modello numerico (asterisco grigio) e sperimentalmente (cerchio nero) in presenza di ripples. a) profilo di velocità; b) profilo logaritmico.....	136
Figura 5.18 Profilo di velocità in condizioni CO, WO e WC ($f=0.03$ Hz, $a=0.5$ V e $c=10$). a) caso SB (Run _f 1-5-6); b) caso GB (Run _f 7-11-12); c) caso RB (Run _f 1 _M -5 _M -6 _M).....	138
Figura 5.19 Confronto segnali per i tre differenti campi di moto.....	139
Figura 5.20 a) Profilo medio della componente di velocità U_x in presenza di sole onde nei tre punti di misura lungo il ripple; b) Zoom al fondo.....	139
Figura 5.21 Profilo logaritmico prova di sola corrente e prova di onda più corrente per le tre scabrezze. ($f=0.03$ Hz, $a=0.5$ V e $c=10$). a) caso SB (Run _f 1-6); b) caso GB (Run _f 7-12); c) caso RB (Run _f 1 _M -6 _M).....	140
Figura 6.1 Profili di velocità in condizione di CO, WO e WC per sabbia (nero), ghiaia (rosso) e ripples (blu). a) regime CD; b) regime WD.....	145
Figura 6.2 Profili di velocità in condizione di CO, WO e WC per sabbia (nero), ghiaia (rosso) e ripples (blu) in regime WD. a) onde e correnti ortogonali; b) onde e correnti collineari.....	150
Figura 6.3 Confronto vorticità in presenza di sole onde alla fase $\pi/2$. a) vortice orario fondo fisso; b) vortice orario fondo mobile.....	151

Lista dei Simboli

A	ampiezza orbitale dell'onda
a	ampiezza del pistone
a_δ	ampiezza orbitale dell'onda alla sommità dello strato limite
C	celerità dell'onda
C_o	celerità dell'onda su profondità infinita
c	velocità della corrente imposta al pistone
D	diametro ghiaia
d	profondità d'acqua
d_m	diametro medio dei sedimenti
d_{50}	diametro medio caratteristico
\tilde{d}	diametro del vortice misurato
E	energia dell'onda
Eu	Numero di Eulero
F	forza
Fr	Numero di Froude
F_d	Numero di Froude dei sedimenti
f	frequenza del pistone
g	accelerazione di gravità
H	altezza d'onda target
H_m	altezza d'onda media misurata
H_i	altezza d'onda incidente
H_r	altezza d'onda riflessa
K_r	coefficiente di riflessione
k_s	scabrezza apparente
k	numero d'onda
L	lunghezza d'onda
l_s	lunghezza relativa
M	velocità di trasporto di massa
Ma	numero di Mach
N_n	rapporto di scala tra prototipo e modello
p	pressione
Q	portata
Q_{max}	portata massima in condotta
Re	numero di Reynolds
Re_d	numero di Reynolds dei sedimenti
Re_c	numero di Reynolds della corrente

Re_w	numero di Reynolds dell'onda
Re^*	numero di Reynolds degli sforzi di taglio
Re_δ	numero di Reynolds dello strato limite al fondo
R^2	coefficiente di determinazione
St	numero di Strouhal
std	deviazione standard
s	densità relativa dei sedimenti
T	periodo dell'onda
t	tempo di acquisizione
U_δ	velocità orbitale dell'onda alla sommità dello strato limite
U_c	velocità target della corrente
U_0	velocità orbitale target dell'onda
\hat{U}_c	velocità della corrente misurata
\hat{U}_0	velocità dell'onda misurata
U_t	undertow teorico
U_u	undertow misurato
$u_{x(max)}$	velocità massima moto stazionario (tubo a U)
$u_{x(mean)}$	velocità media moto stazionario (tubo a U)
u^*_v	velocità d'attrito secondo Visser
u^*	velocità d'attrito
V	velocità
VS	Vectrino Single Point
VP	Vectrino Profiler
V_s	velocità relativa di sedimentazione
V_x	velocità media misurata in direzione x prove preliminari
V_y	velocità media misurata in direzione y prove preliminari
We	numero di Weber
WG	sonde di livello
x	coordinata direzione corrente (WINGS)
y	coordinata direzione onda (WINGS)
z	coordinata direzione verticale verso l'alto
Δl	distanza relativa tra le sonde
ε	modulo di elasticità a compressione cubica
ε_r	errore percentuale
η	altezza del ripple
η_t	altezza del ripple in funzione del tempo
λ	lunghezza del ripple
λ_t	lunghezza del ripple in funzione del tempo
μ	viscosità dinamica

ν	viscosità cinematica
ξ	asse minore cella ricircolo
ζ	asse maggiore cella ricircolo
ρ	densità
ρ_s	densità dei sedimenti
σ	tensione superficiale
τ_0	tensione tangenziale al fondo
ω_s	velocità di sedimentazione
ψ	numero di mobilità

Bibliografia

Andersen K. H. The dynamics of ripples beneath surface waves and topics in shell models of turbulence. *Københavns universitet, Det Naturvidenskabelige fakultet*, **1999**.

Andersen K. H. and Faraci C. The wave plus current flow over vortex ripples at an arbitrary angle. *Coastal engineering*, 47(4):431–441, **2003**.

Arnskov M.M., Fredsøe J. and Sumer B.M. Bed shear stress over a smooth bed in three-dimensional wave-current flow. *Coastal Engineering*. 20, 277-316, **1993**.

Asano T., Nakagawa M., and Iwagak Y. Changes in current properties due to wave superimposing. *Proc. 20th Int. Conf. on Coastal Engineering.*, Chap. 70. Taipei, Taiwan, pp. 925–939, **1986**.

Aydin I. Computation and analysis of unsteady turbulent flow on flat bottom and over rigid ripples. *PhD thesis*, Tohoku University, **1987**.

Bagnold R.A. Motion of waves in shallow water. interaction between waves and sand bottoms. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 187(1008):1–18, **1946**.

Basco D.R. and Reid R.O. Numerical convolution for solution of wave propagation problems: filter scheme methods *Journal of Hydraulic Research* Volume 20, **1982**.

Basili M., Colonna N., Del Ciello R., Grauso S., Napoleoni S., and Zarlenga F. Sustainable development applied to the Italian territorial planning, sustainable management of the renewable and un renewable resources; Problematiche territoriali relative al suolo, al sottosuolo, alle acque e contributo allo sviluppo sostenibile nazionale. Italy: N. p., **1998**.

Battjes J.A. Energy dissipation in breaking solitary and periodic waves. *Communications on hydraulic and geotechnical engineering*, **1986**.

Bijker E.W. Some considerations about scales for coastal models with movable bed. Publication. *Delft Hydraulics Laboratory*. **1967**.

Bijker E. W., E. van Hijum, and P. Vellinga. Sand transport by waves, *15th International Conference on Coastal Engineering*, Honolulu, Hawaii, **1976**.

Blondeaux P. and Vittori, G. Sand ripples under sea waves. part I: ripple formation. *Journal of Fluid Mechanics*, 218(1):1–17, **2000**.

Blondeaux P. and Vittori, G. Vorticity dynamics in an oscillatory flow over a rippled bed. *Journal of Fluid Mechanics*, 226:257–289, **1991**.

Blondeaux P., Foti E., and Vittori G. A theoretical model of asymmetric wave ripples. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 373(2033):20140112, **2015**.

Bosman J.J. Bed behavior and sand concentration under oscillatory water motion. *Delft Hydraul. Lab. MI695-1*, **1981**.

Bowen A. J. Rip currents:1. Theoretical investigations. *Journal of Geophysical Research* Volume 74, Issue 23 p. 5467-5478, **1969**.

Brevik I. and Bjørn, A. Flume experiment on waves and currents. i. rippled bed. *Coastal Engineering*, 3:149–177, **1979**.

Christoffersen J. B. and Jonsson I. G. Bed friction and dissipation in a combined current and wave motion. *Ocean Engineering*, 12(5):387–423, **1985**.

David Admiraal, Rodrigo Musalem-Jara, Marcelo García and Yarko Niño: Vortex trajectory hysteresis above self-formed vortex ripples, *Journal of Hydraulic Research*, 44:4, 437-450, **2006**.

Deigaard R., Jakobsen, J. B., and Fredsøe, J. Net sediment transport under wave groups and bound long waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C6):13559–13575, **1999**.

Dean R.G. and Dalrymple, R.A. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*; *World Scientific Publishing Company: Singapore*, **1991**.

Earnshaw H.C. and Greated, C.A. Dynamics of Ripple Bed Vortices. *Experiments in Fluids* 25(3), 265–275, **1998**.

Faraci C., and Foti E., Geometry, migration and evolution of small scale bedforms generated by regular and irregular waves, *Coastal engineering.*, 47, 35– 52 **2002**.

Faraci C., Foti E., and Musumeci RE. Waves plus currents at a right angle: The rippled bed case. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C7), **2008**.

Faraci C., Foti, E., and Scandura, P. Reflection of sea waves by combined caissons. *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.*, 141, 04014036, **2015**.

Faraci C., Scandura, P., Musumeci, R., and Foti, E. Waves plus currents crossing at a right angle: near-bed velocity statistics. *Journal of Hydraulic Research*. 56 (4), 464–481, **2018**.

Faraci C., Musumeci R.E., Marino M., Ruggeri A., Carlo L., Jensen B., Foti E., Barbaro G. and Elsaßer B. Wave- and current-dominated combined orthogonal flows over fixed rough beds. *Continental Shelf Research* Volume 220, **2021**.

Fredsøe J., Andersen K.H. and Sumer B.M. Wave plus current over a ripple-covered bed. *Coastal Engineering*. 38, 177–221, **1999**.

Goda Y. Random Seas and Design of Maritime Structures. *World Scientific*, Singapore, **2000**.

Goring D.G. and Nikora V.I. Despiking acoustic Doppler velocimeter data. *Journal of Hydraul. Engineering*, 128 (1), 117–126, **2002**.

Grant W. D., and Madsen, O. S. Combined wave and current interaction with a rough bottom. *Journal of Geophysical Research*, 84(C4), 1797-1808, **1979**.

Grant W. and Madsen O.S., The continental-shelf bottom boundary layer. *Annu. Rev. of Fluid Mechanics*, 18, 265-305, **1986**.

Grasmeijer B and Kleinhans M. Observed and predicted bed forms and their effect on suspended sand concentrations. *Coastal Engineering* 51(5):351–371, **2004**.

Guizien K., Dohmen-Janssen M., and Vittori G. 1DV bottom boundary layer modeling under combined wave and current: Turbulent separation and phase lag effects, *Journal of geophysical research*, VOL. 108, NO. C1, 3016. **2003**.

Horikawa K. and Mizutani S. Oscillatory Flow Behavior in the Vicinity of Ripple Models. *23rd International Conference on Coastal Engineering* **1992**.

Hsu T. and Hanes D. Effects of wave shape on sheet flow sediment transport. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109 (C05025), 15, **2004**.

Huang Z., and Mei C. C. Effects of surface waves on a turbulent current over a smooth or rough seabed. *Journal of Fluid Mechanics*, 497, 253-287, **2003**.

Inman D. L., and Bowen A. J. Flume experiments on sand transport by waves and currents. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(8),11. **1962**.

Jamieson W. W. and Mansard E. P. D. Two novel free surface measurement techniques developed at DTMB. *Proceedings of the Twenty-Third American Towing Tank Conference*. New Orleans, Louisiana, pp. 263–277, **1993**.

Jonsson I. G. Wave boundary layers and friction factors. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(10), 9 **1966**.

Justesen P. Turbulent wave boundary layers. Denmark: N. p., **1988**. Web.

Kajiura K. A model of the bottom boundary layer in water waves, *Bulletin of the Earthquake Research Institute* Vol. 46, pp. 75-123. **1968**.

Kamphuis J. W. Determination of sand roughness for fixed beds. *Journal of Hydraulic Research*, 12(2):193–203, **1974**.

Kamphuis J. W. Friction factor under oscillatory waves. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, 101(2):135–144, **1975**.

Kemp PH and Simons RR. The interaction between waves and a turbulent current: waves propagating with the current. *Journal of Fluid Mechanics*, 116: 227–250, **1982**.

Kemp PH and Simons RR. The interaction of waves and a turbulent current-waves propagating against the current. *Journal of Fluid Mechanics*, 130: 73–89, **1983**.

Khelifa A. and Ouellet Y. Prediction of sand ripple geometry under waves and currents. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 126(1):14–22, **2000**.

Kim J. and Moin P. Application of a fractional-step method to incompressible Navier–Stokes equations. *Journal of Computational Physics*. 59, 308–323, **1985**.

Komar P.D. and Shih S.M., Differential bedload transport rates in a gravel-bed stream: A grain-size distribution approach. *Earth Surface Processes and Landforms* Volume 15, Issue 6 p. 539-552, **1990**.

Lim K. Y., Madsen O. S. and Cheong H. Current characteristics in the presence of near-orthogonal waves, *Proceedings of the Coastal Engineering Conference, ICCE 2012*.

Lim K. Y. and Madsen O. S. An experimental study on near-orthogonal wave–current interaction over smooth and uniform fixed roughness beds. *Coastal Engineering*, 116:258–274, **2016**.

Lodahl C.R., Sumer M. and Fredsøe J. Turbulent combined oscillatory flow and current in a pipe. *Journal of Fluid Mechanics*, 373: 313–348, **1998**.

Longuet-Higgins MS, Stewart RW. Changes in the form of short gravity waves on long waves and tidal currents *Journal of Fluid Mechanics*, **1960**.

Lundgren H. Turbulent currents in the presence of waves. *Coastal Engineering*, pages 623–634. **1973**.

Malarkey J. and Davies A. Free-stream velocity descriptions under waves with skewness and asymmetry. *Coastal Engineering*, 68:78–95, **2012**.

Mansard E. P. D. and Funke E. R. The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. *Proc., 17th Int. Coastal Engineering Conf.*, ASCE, New York, 154–172, **1980**.

Mathisen P. P. and Madsen O. S. Waves and currents over a fixed rippled bed: 1. bottom roughness experienced by waves in the presence and absence of currents. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C7):16533–16542, **1996**.

Mathisen P. and Madsen O. Waves and currents over a fixed rippled bed bottom and apparent roughness experienced by currents in the presence of waves. *Oceanographic Literature Review*, 5(44):430, **1997**.

Mogridge G. R. and Kamphuis J.W. Experiments on bed form generation by wave action. *Proceedings of 13rd Coastal Engineering*, **1972**.

Monin A.S., Yaglom A.M. Statistical Fluid Mechanics: Mechanics of Turbulence. *MIT Press*, Cambridge, MA, 769 pp, **1973**.

Mossa M. & Petrillo A. F., *Idraulica*, CEA, **2013**.

Musumeci RE., Cavallaro L., Foti E., Scandura P., and Blondeaux P. Waves plus currents crossing at a right angle: Experimental investigation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C7), **2006**.

Myrhaug D. and Slaattelid O. H. A rational approach to wave-current friction coefficients for rough, smooth and transitional turbulent flow. *Coastal Engineering*, 14(3):265–293, **1990**.

Myrhaug D., Holmedal L. E., Simons R. R., and MacIver R.D. Bottom friction in random waves plus current flow. *Coastal Engineering*., 43(2):75–92, **2001**.

Nicholls R. J. and Cazenave A. Sea-level rise and its impact on coastal zones science, 328: 1517–1520, **2010**.

Nielsen P. Dynamics and geometry of wave-generated ripples. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 86(C7):6467–6472, **1981**.

Nielsen P. Coastal bottom boundary layers and sediment transport, volume 4. *World scientific*, **1992**.

Ourmieres Y. and Chaplin J. Visualizations of the disturbed-laminar wave-induced flow above a rippled bed. *Experiments in Fluids*, 36(6):908–918, **2004**.

Petrotta C., Faraci C., Scandura P. and Foti E. Experimental investigation on sea ripple evolution over sloping beaches, *Ocean Dynamics*, **2018**.

Ranasoma K. M. and Sleath J. F. Combined oscillatory and steady flow over ripples. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 120(4):331–346, **1994**.

Scandura P., Vittori G. and Blondeaux P. Three-dimensional oscillatory flow over steep ripples. *Journal of Fluid Mechanics*, 412:355–378, **2000**.

Scandura P., Faraci C., & Foti E. A numerical investigation of acceleration-skewed oscillatory flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 808, 576–613, **2016**.

Simons R.R., Grass T.J., and Mansour-Tehrani M. Bottom shear stresses in the boundary layers under waves and currents crossing at right angles. *Coastal Engineering* pages 604–617. 1993, **1992**.

Simons R.R., Grass T.J., Saleh W.M., Tehrani M.M. 1995 Bottom shear stresses under waves with a current superimposed. *Proc. 24th Intl Conf. on Coastal Engineering*, Oct., Kobe, Japan, vol. I, ch. 42, pp. 565-578, **1995**.

Simons R.R., MacIver R.D., Saleh W.M. Kinematics and bottom shear stresses from combined waves and longshore currents in the UK coastal research facility. *25th Int. Conf. on Coastal Engineering*. ASCE, 3581–3494, **1997**.

Sleath J. F. A., On rolling grain ripples. *Journal of Hydraulic Research*, 14: 69-81, **1976**.

Sleath JFA. Turbulent oscillatory flow over rough beds. *Journal of Fluid Mechanics*, 182:369–409, **1987**.

Sleath JFA. Velocities and shear-stresses in wave current flows. *Journal of Geophysical Research*. 96, 15237-15244, **1991**.

Soulsby R.L., Hamm L., Klopman G., Myrhaug D., Simons R.R., Thomas G.P. Wave-current interaction in the vertical. *Coastal Engineering*. 21, 41-69, **1993**.

Swart D.H. Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles, Lab. Publ. 131, *Delft Hydraul* **1974**.

Tardu S. F. e Binder G., Wall shear stress modulation in unsteady turbulent channel flow with high imposed frequencies. *Physical Fluids* **1993**.

Tardu S. F., Binder G. and BLACKWELDER R. F. Turbulent channel flow with large-amplitude velocity oscillations. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 267, pp. 109-151 **1994**.

Tardu S. F., Binder G. and VEZIN, P. Cyclic modulation of Reynolds stresses and length scales in pulsed turbulent channel flow. *Proc. R. Soc. London Ser.* **1995**.

Tunstall E. B. and Inman D. L. Vortex generation by oscillatory flow over rippled surfaces. *Journal of Geophysical Research*, 80(24):3475–3484, **1975**.

van der Zanden, J., O'Donoghue T., Hurther D., C'aceres I., McLelland S.J., Ribberink J.S., et al. Large-scale laboratory study of breaking wave hydrodynamics over a fixed bar. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122 (4), 3287–3310, **2017**.

Van derWerf J., Doucette J., O'Donoghue T., and Ribberink J. Detailed measurements of velocities and suspended sand concentrations over full-scale ripples in regular oscillatory flow. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112(F2), **2007**.

van Doorn T. Experimental Investigation of Near-Bottom Velocities in Water Waves without and with a Current. TOW Report M 1423, part 1. *Delft Hydraulics Laboratories*, **1981**.

van Doorn T. Experimenteel onderzoek naar het snelheidsveld in de turbulente bodemgrenslaag in een oscillerende stroming in een golftunnel. TOW Report M 1562-1a. *Delft Hydraulics Laboratories*, **1982**.

Visser P. J. Wave basin experiments on bottom friction due to current and waves. *Coastal Engineering*, 807–821. **1987**.

Wiberg, P.L. and Harris C.K., Ripple geometry in wave dominated environments. *Journal of Geophysical Research*, 99(C1):775-789, **1994**.

Yoon H.-D. and Cox D. T. Large-scale laboratory observations of wave breaking turbulence over an evolving beach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C10), **2010**.

Ringraziamenti

Il dottorato è stata un'esperienza inaspettata, che non avevo mai preso in considerazione durante il corso dei miei studi. È stata certamente un'esperienza formativa, che mi ha permesso di mettermi in gioco e di viverla a pieno nonostante tutti gli ostacoli nati nel corso di questi tre anni; di questo devo ringraziare la mia Tutor *Prof.ssa Carla Faraci* per avermi sempre stimolato e avermi fatto sentire una collaboratrice più che una sua dottoranda e di questo le sarò sempre grata. Ringrazio inoltre tutti i professori del settimo piano per avermi fatto sentire a casa, parte di una famiglia e a mio agio nel corso di questi tre anni.

Nella mia vita sono stata fortunata ad avere accanto persone che hanno creduto in me e continuano a supportarmi e sopportarmi anche dopo la “terza laurea” e per questo devo ringraziare tutta *la mia famiglia, mio fratello, mio primo sostenitore, Cristina, Valentina, Giovanna, Roberta, Claudia e Peppe*. Ci sono poi tre piccole stelline che fanno parte della mia vita nate in questi tre anni, che mi hanno rubato il cuore e piacevolmente accompagnato durante il dottorato: *Vittoria, Costanza e Leonardo*.

Al mio fidanzato che dopo una decade, in questi tre anni è diventato il mio splendido *Marito*, grazie per ogni singolo giorno; a *Sasha* amore fedele sempre al mio fianco.

In ultimo, questo dottorato non sarebbe stato lo stesso se non avessi avuto *Lilia*, collega e amica, la mia partner.

Grazie di tutto, per il conforto e lo sconforto che ci ha rese così unite e indissolubili da vestirci casualmente uguali il 50% delle volte. Grazie per le risate, le lacrime e le fatiche che ci fanno compagnia ormai da 11 anni. Se ad un certo punto le nostre strade si divideranno avrò un enorme nostalgia nel non avere più la mattina qualcuno con cui chiacchierare e che capisce a pieno lo strano mondo di euforia e crisi che ormai accompagna le nostre vite ma che ci ha sempre dato la grinta di affrontare al meglio qualsiasi giornata.