

RIASSUNTO

La presenza di vegetazione sul suolo delle barene della Laguna di Venezia svolge un importante effetto dissipativo sul moto ondoso che si propaga all'interno della laguna e può essere considerato un fattore naturale di protezione dai fenomeni di erosione. In questa tesi è stato effettuato uno studio sui meccanismi di dissipazione dell'energia del moto ondoso in presenza di una superficie vegetata, e sulla modellazione matematica degli effetti della vegetazione sul moto ondoso, attraverso un'indagine sperimentale condotta in laboratorio, con un tipo di vegetazione artificiale (*Spartina maritima*) e in condizioni idrodinamiche simili a quelle presenti in una zona di barena. I risultati sperimentali ottenuti sono stati analizzati assumendo valida la teoria lineare dell'onda, e confrontati con le soluzioni teoriche proposte da Mendez e Losada, allo scopo di quantificare il coefficiente di resistenza della vegetazione artificiale e determinare delle relazioni fra la dissipazione di energia del moto ondoso e le caratteristiche della vegetazione.

Generalmente, nelle formulazioni dei coefficienti di resistenza C_D presenti in letteratura, la resistenza prodotta dall'attrito del fondo viene considerata trascurabile rispetto a quella prodotta dalla vegetazione: vengono considerati dei C_D globali, che inglobano al loro interno tutti gli effetti (vegetazione più attrito), senza alcuna distinzione fra di essi. In questo lavoro, invece, si è cercato di considerare separatamente i due effetti, allo scopo di determinare un coefficiente K_v responsabile dell'effetto della sola vegetazione, e un coefficiente K_f responsabile dell'effetto del solo attrito di fondo, in presenza di vegetazione. Per affrontare il problema viene presentato un approccio teorico, che è validato dai dati sperimentali.

Questo lavoro può trovare delle possibili applicazioni nella descrizione della propagazione del moto ondoso all'interno di bacini caratterizzati da bassi fondali e presenza di vegetazione, come è il caso della Laguna di Venezia.

ABSTRACT

Salt marsh vegetation of the Lagoon of Venice has an important role on the energy wave dissipation and it can be considered a natural factor to protect internal areas from erosion. In this research a study of the mechanisms of wave damping by vegetation and modeling wave attenuation by vegetation was carried out. Laboratory experiments were conducted to measure wave attenuation resulting from synthetic vegetation (*Spartina maritima*), under a range of wave conditions and plant stem densities typical of salt marsh. The laboratory data were analyzed using linear wave theory and compared to the model of Mendez and Losada (2004), to quantify vegetation drag coefficient and to find relations between wave damping and vegetation characteristics.

Generally, in the formulation of the drag coefficient C_D , bottom friction is neglected and only the resistance of vegetation is taken into account: it is a “bulk” drag coefficient, which does not distinguish between the vegetation effect and the effect of bottom friction. In the present work bottom friction is, instead, explicitly considered in order to quantify the drag coefficient due only to the resistance induced by vegetation, and to quantify a specific bottom friction coefficient due to the presence of vegetation. Here a theoretical approach is presented and validated by experimental data.

This work can find a possible application when describing wave propagation within shallow basins characterized by the presence of vegetation, such as the Lagoon of Venice.

INDICE

<u>RIASSUNTO.....</u>	<u>1</u>
<u>ABSTRACT.....</u>	<u>2</u>
<u>Introduzione.....</u>	<u>5</u>
0.1 Introduzione al problema.....	5
0.2 La laguna di Venezia: cenni storici e situazione attuale.....	7
0.3 Obiettivi della ricerca.....	10
<u>1 Modellazione idraulica degli effetti prodotti dalla vegetazione.....</u>	<u>11</u>
1.1 Effetti della vegetazione sul moto ondoso.....	11
1.1.1 Indagini sperimentali.....	11
1.1.2 Modelli teorici.....	12
<u>2 Descrizione del modello teorico utilizzato.....</u>	<u>15</u>
2.1 Dissipazione per attrito con il fondo.....	17
2.2 Dissipazione prodotta dalla vegetazione.....	18
2.3 Modello teorico complessivo.....	22
2.4 Valutazione del coefficiente di resistenza CD in un campo vegetato.....	26
<u>3 Indagini sperimentali sugli effetti dissipativi del moto ondoso.....</u>	<u>35</u>
3.1 Vegetazione utilizzata.....	35
3.2 Apparato sperimentale.....	36
3.3 Descrizione delle prove effettuate.....	38
3.4 Output strumentazione di misura.....	45
<u>4 Risultati.....</u>	<u>46</u>
4.1 Analisi di sensibilità dei parametri.....	46
4.1.1 Influenza del tirante.....	47
4.1.2 Influenza delle caratteristiche dell'onda.....	49
4.1.3 Influenza delle caratteristiche della vegetazione.....	54
4.1.4 Conclusioni sull'attenuazione del moto ondoso.....	57
4.2 Calibratura del coefficiente di resistenza CD.....	60
4.3 Calibratura del coefficiente di attrito del fondo f.....	70
<u>5 Conclusioni.....</u>	<u>87</u>
<u>BIBLIOGRAFIA.....</u>	<u>89</u>
<u>Elenco dei simboli usati.....</u>	<u>94</u>

ABSTRACT

-

Introduzione

0.1 Introduzione al problema

I fenomeni erosivi che si sono sviluppati all'interno della laguna di Venezia nel corso degli ultimi decenni sono responsabili di tendenze evolutive, che hanno profondamente modificato alcuni dei caratteri morfologici che erano tipici del bacino lagunare.

Se negli ultimi tempi l'attenzione alla laguna di Venezia si è concentrata soprattutto sul problema della difesa dalle "acque alte", non meno urgenti sono da considerare i provvedimenti destinati a contenere i sempre più intensi processi erosivi in atto all'interno della laguna stessa, dei quali una delle cause principali è la perdita sistematica di sedimenti fini che si riscontra negli scambi tra la laguna e il mare, dovuta alle asimmetrie di comportamento idrodinamico delle bocche in fase di flusso e di riflusso, ma che trova la sua causa prima nei fenomeni di risospensione del materiale dai fondali ad opera soprattutto del moto ondoso. Se, infatti, dovessero perdurare i fenomeni di perdita netta di sedimenti che si innescano, il destino della laguna sarebbe inevitabilmente quello di perdere i suoi caratteri storici, che da sempre l'hanno contraddistinta, e di trasformarsi in un vero e proprio braccio di mare.

Con riferimento al fenomeno di perdita di sedimenti, è stato ampiamente dimostrato (D'Alpaos, 2009) che gli elementi più fini vengono messi in sospensione e convogliati dalla corrente una volta estromessi dalla laguna durante la fase di riflusso della marea, quando il flusso in uscita per la presenza dei moli alle bocche forma un vero e proprio getto che penetra in profondità nel mare antistante, disperdendovi il materiale trasportato, che solo in minima parte è reintrodotta nella successiva fase di flusso.

L'erosione dovuta al moto ondoso dipende dall'energia trasferita alle onde e dalle cause che le generano, e si manifesta sia a carico dei bassifondi, sia a danno delle strutture morfologiche lagunari, tipicamente le barene. Prova ne sia la drastica riduzione nel tempo della superficie che si è osservata per queste strutture morfologiche, che nei primi anni dell'800 occupavano fino a circa 150 km², e sono ridotte ora a poco più di

una trentina di km². Nei riguardi dell'erosione, complementare rispetto all'azione del moto ondoso può essere considerato il ruolo delle correnti di marea, che si esplica nei canali ma che si limita ai maggiori tra questi ed è di un qualche rilievo per i tratti più prossimi alle bocche.

Il moto ondoso agisce con meccanismi diversi sulle diverse strutture lagunari: se nei bassifondi prevale lo sforzo tangenziale al fondo indotto dal moto ondoso, che è ampiamente in grado di risospingere i sedimenti più fini presenti sui fondali, nelle barene, la cui superficie è ricoperta di vegetazione, questa azione risulta poco efficace, e prevale un'erosione di tipo spondale, per crollo vero e proprio delle rive delle barene e rilascio verso i bassifondi adiacenti del materiale coinvolto.

Un importante fattore in grado di contrastare l'erosione è la presenza di vegetazione sulla superficie dei bassifondi e delle barene.

La vegetazione tipica dei bassifondi è completamente sommersa, come le fanerogame marine (*Zostera Marina* e *Cymodocea*), che sono in grado di stabilizzare i sedimenti dei fondali grazie alle loro radici strettamente intrecciate, impedendo l'erosione al fondo degli apparati intertidali. Un gruppo di queste fanerogame produce una barriera flessibile alla corrente delle acque, tanto che è in grado di deviarla, favorendo la sedimentazione superficiale e la protezione delle radici delle piante alofile (Fonseca et al., 1982).

La vegetazione delle barene, invece, è tipicamente alofila (*Spartina maritima*, *Salicornia veneta*, *Puccinellia palustris*, *Limonium serotinum* e *bellidifolium*, *Juncus maritimus*, *Arthrocnemum fruticosum*), parzialmente emersa o completamente sommersa a seconda dei cicli di marea, e la sua azione principale è quella di dissipare l'energia del moto ondoso che la investe e quindi di ridurre in maniera sensibile la capacità erosiva, agendo da barriera protettiva anche nei confronti dei bassifondi che si trovano nelle zone interbarenali e che vengono investiti dal moto ondoso, una volta superati i cordoni barenicoli perimetrali.

Nella tesi l'interesse è stato focalizzato sul secondo tipo di vegetazione, ovvero su di un tipo di vegetazione alofila di barena, per studiare i meccanismi di dissipazione dell'energia del moto ondoso in presenza di una superficie vegetata, e modellare matematicamente gli effetti della vegetazione sul moto ondoso.

0.2 La laguna di Venezia: cenni storici e situazione attuale

Prima di entrare nel merito delle questioni specifiche riguardanti il ruolo che la vegetazione può assumere come fattore di contenimento del moto ondoso e dei suoi effetti, si ritiene opportuno descrivere, sia pure sinteticamente, alcuni caratteri salienti della Laguna di Venezia, alla soluzione dei cui problemi nei riguardi del moto ondoso questo studio è rivolto per i possibili aspetti applicativi.

La laguna di Venezia, può essere considerata la più estesa laguna in Italia e una delle più estese nel bacino del Mediterraneo. E' situata nella costa settentrionale del mare Adriatico: la larghezza media è di 10 km, mentre la sua lunghezza è di 50 km, per una superficie ricompresa entro la con terminazione (definita tra il 1610 e il 1972) di circa 550 km² (Figura 1). Attualmente è collegata con il mare Adriatico da tre bocche di porto: Lido, Malamocco e Chioggia, attraverso le quali avviene la propagazione della marea. La profondità dei suoi fondali è fortemente variabile: nei canali di porto raggiunge anche i 15-20 metri, negli specchi d'acqua della sua parte centrale 1-3 metri, mentre nelle zone di barena essa varia entro poche decine di centimetri d'acqua, presentando zone completamente emerse rispetto al livello medio del mare, coperte da tipica vegetazione.

La marea che penetra nella laguna superando le tre bocche di porto, segue principalmente nella sua propagazione la complessa rete di canali che da esse si dipartono, attraversando specchi d'acqua e zone di barena. Essa è fortemente influenzata, nella sua propagazione interna, dalla configurazione dei canali, dalla profondità dei fondali e dalla presenza, appunto, delle barene, che, come è il caso della laguna nord-orientale dove queste forme occupano ancora superfici consistenti, ne riducono la velocità di propagazione e le ampiezze, introducendo ritardi di fase per i colmi e per i cavi, che sono anche dell' ordine di circa 3 ore ai limiti delle valli da pesca.

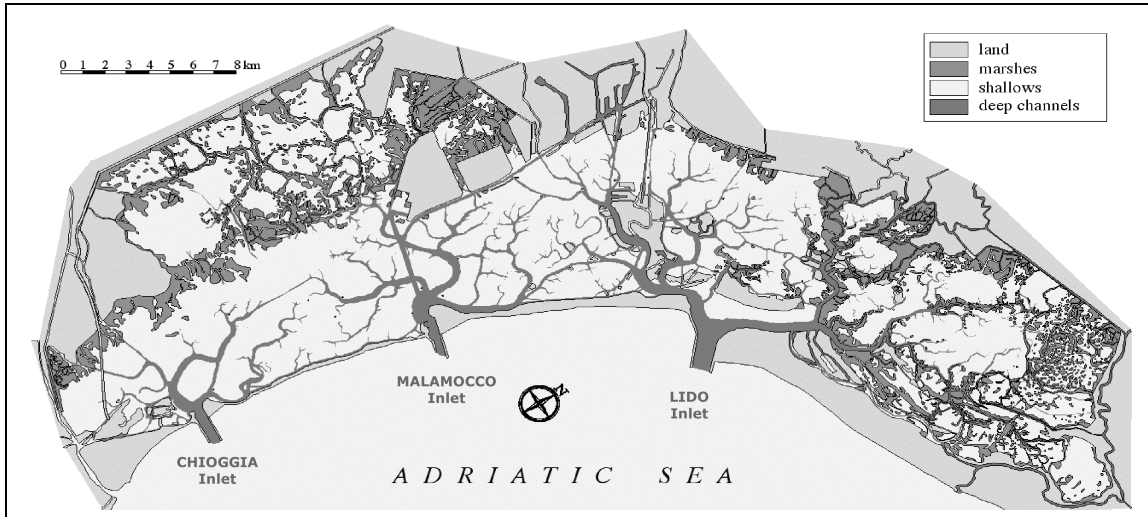


Figura 1 - La Laguna di Venezia

La laguna nella sua odierna configurazione è il risultato dell'interferenza tra un complesso insieme di forze naturali, che ne hanno determinato la formazione e l'evoluzione fin oltre al 1400, ed un successivo succedersi di importanti interventi antropici, che ne hanno pesantemente condizionato le successive trasformazioni.

Il primo intervento antropico di rilievo sulla laguna è costituito dalla diversione dei fiumi che in essa sfociavano (il Brenta, il Sile e il Piave), avvenuta tra il XVI e il XVII secolo, determinando di fatto una drastica riduzione dall'esterno degli apporti di sedimenti e il predominio dell'acqua marina sull'acqua dolce. Si attenuò conseguentemente l'azione di interrimento che minacciava seriamente la stessa Venezia, e quasi scomparvero le sue caratteristiche di bacino d'acque salmastre. A seguito di questo provvedimento prevalse nei secoli successivi l'attività erosiva e l'azione salina del mare si manifestò con effetti disgregatori di fondali e di barene.

Al giorno d'oggi, solo pochi piccoli fiumi sfociano in laguna, per una portata totale di circa $30 \text{ m}^3/\text{s}$ (Bendoricchio et al., 1993).

Successivamente a questo, altri grandi interventi furono eseguiti nella laguna, interventi non meno "pesanti" che si sono praticamente protratti fino ai giorni nostri.

Il primo di questi provvedimenti meritevole di essere ricordato è relativo alla progressiva riduzione della superficie lagunare utile alla espansione della marea. Dei 58.600 ettari, corrispondenti alla conterminazione del 1792, circa il 30% è stato sottratto

INTRODUZIONE

alla marea per realizzare valli da pesca arginate, casse di colmata per zone industriali ed altri usi.

Il secondo non meno importante provvedimento attuato è stata la costruzione dei moli alle bocche di porto. Iniziati nel 1872 con il completamento delle dighe forenee alla bocca di Malamocco, questi interventi sono proseguiti negli anni successivi con l'adozione della stessa soluzione alla bocca di Lido (1892), riunendo in essa gli antichi tre porti di S. Nicolò, s. Erasmo e Treporti, e si sono conclusi nel 1935 con la realizzazione dei moli foranei della bocca di Chioggia.

Il terzo grande intervento antropico riguarda lo scavo dei grandi canali di navigazione Vittorio Emanuele e Malamocco-Marghera, per collegare al mare le aree della zona industriale di Marghera.

Gli interventi citati e la diversione dei fiumi della Laguna, hanno la caratteristica comune di favorire l'ingresso marina in laguna e hanno nel loro insieme determinato una netta trasformazione delle sue caratteristiche idrodinamiche.

A seguito di tali interventi, in particolare, l'ampiezza delle onde di marea del bacino centrale compreso tra le bocche di Lido e di Malamocco non sono più fortemente attenuate rispetto al mare, anzi in alcune zone, come il centro storico di Venezia e Marghera, le ampiezze della marea superano, specie in fase di sigizia, quelle che si registrano in mare aperto. Si potrebbe quasi dire che il bacino centrale abbia praticamente perso le sue originali caratteristiche idrodinamiche, tipiche dei bacini lagunari, assumendo quelle tipiche dei bacini marini. Il bacino centrale della laguna è ora sede di intensi processi erosivi dei fondali, di disgregazione delle barene residue che ne perimetrano i bordi e di grave dissesto delle stesse isole lagunari.

Gli interventi citati hanno dunque innescato un processo degenerativo del sistema lagunare che tende progressivamente a trasformarsi in un vero e proprio braccio di mare dai fondali quasi uniformi, togliendo progressiva importanza al ruolo dei canali che lo incidono. La velocità di questo processo evolutivo ha subito un incremento con la realizzazione degli interventi più recenti, quali la costruzione dei moli alle bocche di porto, e lo scavo del canale navigabile Malamocco-Marghera.

Elementi più evidenti di questa degenerazione sono la variata distribuzione delle correnti di marea, l'intensificarsi dell'azione del moto ondoso, sia esso generato dal

vento o dai battelli in navigazione , e le frequenti crisi anossiche con morie di pesci e proliferazione della vegetazione algale.

A questo quadro di rilevante evidenza per le aree centrali della laguna, deve essere aggiunta la situazione delle aree più marginali e periferiche, anch'esse sofferenti, sia pure per aspetti diversi. In queste zone occupate ancora per la maggior parte da barene, da specchi acquei a bassa profondità e da valli da pesca completamente arginate, permangono nonostante tutto aspetti morfologici meritevoli di essere tutelati. Si tratta di zone dove minore sembra essere l'impatto dell'ingressione marina e più contenuto l'effetto disgregatore delle correnti, con livelli di marea attenuati per la grande distanza dalle bocche di porto e per i consistenti fenomeni di resistenza che le maree incontrano nella loro propagazione.

Ed è alla difesa di queste forme residue dell'antica laguna, che possono essere soprattutto aggredite dall'azione del moto ondoso, che si rivolge lo studio, esaminando gli effetti di questa causa dominante della loro demolizione ed in particolare il ruolo che la vegetazione barenicola può assumere nell'abbattere l'altezza e l'energia delle onde.

0.3 Obiettivi della ricerca

Scopo della tesi è analizzare il fenomeno dell'attenuazione del moto ondoso in presenza di vegetazione, attraverso un'indagine sperimentale condotta in laboratorio per una particolare tipologia di vegetazione artificiale, che riproduce sostanzialmente un tipo di vegetazione di barena molto diffusa nella laguna di Venezia (*Spartina maritima*). Sono state fissate condizioni idrodinamiche tipiche di una zona di barena: bassi fondali, livello medio del mare variabile, periodo d'onda dell'ordine dei 2 s.

I risultati sperimentali ottenuti, che sono di un qualche interesse se non altro per la difficoltà di reperire contributi analoghi nella letteratura, sono stati confrontati con le soluzioni teoriche proposte da Mendez e Losada, e si è parametrizzato il fenomeno studiato sperimentalmente mediante l'utilizzo di parametri adimensionali che inglobino le variabili che influenzano il fenomeno stesso.

1 Modellazione idraulica degli effetti prodotti dalla vegetazione

1.1 Effetti della vegetazione sul moto ondoso

L'interazione del moto di un fluido in presenza di vegetazione acquatica è un processo dinamico, dal momento che la struttura delle piante e l'ambiente stesso dove si trovano le piante cambiano nel tempo e le piante sono soggette a diverse azioni dinamiche che variano a seconda delle caratteristiche del moto ondoso, della morfologia della zona costiera e della vegetazione.

La vegetazione assume un ruolo molto importante nell'ambito dell'idrodinamica costiera per molti aspetti. Gli studi sperimentali (in laboratorio e in campo) svolti fino a oggi hanno avuto diverse finalità. Alcune indagini sono state spinte dall'importanza della flora marina da un punto di vista biologico e ambientale in alcuni articolari siti, altre dall'interesse economico di certe tipologie di piante marine, altre ancora dall'importanza della vegetazione di fondo come mezzo di protezione delle coste dai fenomeni erosivi.

1.1.1 Indagini sperimentali

Esistono numerosi esempi in letteratura che mostrano l'importanza dell'effetto della vegetazione acquatica esposta alle onde in acque basse da un punto di vista sia economico che biologico: per esempio la raccolta della *L. hyperborea* nelle coste della Norvegia (Dubi and Torum, 1995; Mork 1996), gli effetti della *Macrocystis pyrifera* lungo la costa californiana (Elwany et al., 1995), la protezione della costa da parte dei prati di *Posidonia oceanica* lungo le coste del Mediterraneo (Gacia e Duarte, 2001), la dissipazione dell'energia del moto ondoso delle distese di *Spartina alterniflora* nelle barene inglesi (Moller et al., 1996, 1999) o l'elevata attività biologica della *Zostera marina* (Fonseca e Cahalan, 1992; Ifuku e Hayashi, 1998).

L'attenuazione del moto ondoso dipende sia dalle caratteristiche delle piante (geometria, densità, rigidità, gradi di libertà e configurazione spaziale), che da quelle del moto (soprattutto altezza d'onda, periodo e direzione), oltre che dal tirante d'acqua.

La variabilità del fenomeno dell'attenuazione del moto ondoso è molto ampia, e cercare di stabilire legami tra la dissipazione dovuta alla piante e le caratteristiche della vegetazione, la geometria e la topografia dei luoghi e l'intensità del moto ondoso è un compito certamente molto arduo. Ad esempio, dati sperimentali sulla *L. hyperborea* nelle coste della Norvegia mostrano un'attenuazione dell'altezza d'onda maggiore del 60% (Mork, 1996) o una riduzione di quasi il 40% dell'altezza d'onda è stata misurata nelle piante emerse del lago Ontario, Canada (Tschirky et al., 2001). D'altra parte misure di campo estese effettuate sui fondali ricoperti dall'alga laminaria *M. pyrifera* lungo la costa californiana ha dimostrato che l'energia d'onda resta praticamente inalterata dalla presenza di questa piante (Elwany et al., 1995). Knutson (1982) ha quantificato la riduzione dell'energia d'onda nelle barene pari al 26% per metro di vegetazione di *Spartina alterniflora*.

E' quindi necessario cercare di analizzare i dati sperimentali facendo riferimento ad un inquadramento teorico che aiuti a capire le correlazioni tra le svariate grandezze in gioco.

1.1.2 Modelli teorici

Gli esempi riportati in letteratura sono in molti casi supportati da un confronto tra i dati misurati e i valori calcolati utilizzando modelli teorici analitici e numerici, sviluppati anche da autori diversi da quelli che hanno realizzato gli esperimenti. Lo scopo è generalmente quello di valutare un coefficiente di resistenza globale per la particolare tipologia di vegetazione, e condizioni idrodinamiche studiate, soprattutto, in presenza di correnti. Nel caso di moto ondoso si è cercato spesso di individuare un coefficiente di smorzamento dell'onda (coefficiente moltiplicativo della variabile spaziale nella legge esponenziale che descrive lo smorzamento dell'onda) o di verificare la validità dei modelli in casi specifici.

Risulta evidente l'impossibilità di utilizzare modelli generali, data la grande quantità di variabili in gioco, come arduo è il confronto fra valori dei coefficienti di

resistenza delle diverse situazioni viste in letteratura, a causa della grande diversità tra le specie di vegetazione acquatica e marina indagate; si richiede piuttosto la taratura dei modelli stessi per ogni caso specifico.

In generale l'attenuazione dell'altezza d'onda è causata dalla perdita di energia dovuta all'azione esercitata dalla pianta (Mork, 1996) e i modelli teorici cercano di calcolare le forze prodotte dalle onde sulle piante. La validità di ogni modello dipende dalle caratteristiche geometriche e biomeccaniche delle piante. Da una parte se le piante sono completamente sommerse, di bassa lunghezza, o la loro rigidità è grande nella parte inferiore (come ad esempio nel caso dei fondali ricoperti dalla *L. hyperborea*, i prati di *P. oceanica*, le barene ricoperte da *Spartina*), possono essere schematizzate come elementi verticali cilindrici e si può considerare valido il modello della forza di resistenza. D'altra parte, se le piante hanno un alto numero di gradi di libertà, la rigidità è ridotta e alto il galleggiamento (come per il caso dell'alga laminaria *M. pyrifera*); questo approccio non è più corretto ed è necessaria una modellazione delle forze più complessa.

Il primo modello idrodinamico sviluppato da Pryce et al. (1968) simulava gli effetti delle alghe sommerse considerate come uno strato d'attrito equivalente. Mork (1996) ha esteso l'idea dell'alto strato viscoso e ha sviluppato una teoria per la *Laminaria hyperborea* che prende in considerazione non solo la forza viscosa, ma una forza di resistenza sia per lo strato sopra la vegetazione che per lo strato occupato dalla vegetazione. La vegetazione è stata modellata come un'area ad alto attrito da Camfield (1983), che ha studiato lo sviluppo delle onde indotte dal vento in acque basse.

I primi modelli sulle onde trascuravano il moto delle piante ed erano espressi in termini del coefficiente d'attrito per lo sforzo tangenziale dell'onda (Teeter et al, 2001) oppure il moto della vegetazione era incluso nella forza di resistenza agente sulla vegetazione (Dalrymple et al, 1984; Kobayashi et al, 1993; Asano et al, 1993), accoppiando il campo di moto e il moto di galleggiamento delle piante e confrontando la soluzione con i dati sperimentali ottenuti dalle alghe artificiali in laboratorio. Dubi (1995) ha effettuato ulteriori esperimenti in laboratorio, analizzando la dipendenza del tasso di attenuazione da diversi parametri. Mendez et al. (1999a) ha esteso la teoria dell'attenuazione dell'onda sviluppata da Kobayashi et al. (1993) e da Dubi e Torum

(1995) per includere onde casuali e ha analizzato le conseguenze della trasformazione d'onda.

Numerosi modelli predicono l'attenuazione delle onde utilizzando la conservazione dell'energia d'onda e considerando gli effetti della vegetazione in un termine di dissipazione dell'energia (Dalrymple et al., 1984; Mendez and Losada, 2004), mentre altri utilizzano l'approccio di conservazione della quantità di moto (Kobayashi et al., 1993; Lima et al., 2006). Entrambi gli approcci rappresentano l'azione della vegetazione come una forza di resistenza e tutti questi modelli alla fine trovano una soluzione per l'abbattimento dell'energia d'onda attraverso un campo vegetato in funzione dell'altezza d'onda H .

Tutti questi modelli, basati sulla linearizzazione della forza di resistenza che agisce sulle piante, sono stati sviluppati nel caso di un fondo orizzontale e non includono il frangimento d'onda, che sono invece un aspetto importante nel caso di campi di vegetazione reali. Più di recente Lovas (2000) ha sviluppato un modello di trasformazione del moto ondoso nella zona di frangimento dell'onda, basato sul modello di Larson (1995), che prende in considerazione insieme agli effetti di shoaling e di riflessione anche l'influenza della vegetazione di fondo. Il modello di Lovas include profondità variabili e frangimento d'onda; in ogni caso la forza è ancora linearizzata e l'approccio utilizzato limita le applicazioni potenziali del modello.

Si potrebbero citare anche altri contributi di autori che hanno studiato l'influenza della vegetazione sul campo idrodinamico non solo da un punto di vista di resistenza al moto, ma anche da un punto di vista dell'alterazione della struttura del campo di moto turbolento, e conseguentemente della dinamica di produzione-trasporto-dissipazione dell'energia cinetica turbolenta (Nepf e Vivoni, 2002; Nikora N. e V., 2008; Stephan, 2000). Tuttavia tutti questi studi sono riferiti al caso di correnti in moto uniforme, e non al moto ondoso. Si ricorda a questo proposito, infatti, che i contributi attualmente esistenti sono ancora pochi, data la difficoltà di modellare un moto ondoso, che, per quanto si cerchi di assumere regolare, resta comunque un moto non stazionario.

2 Descrizione del modello teorico utilizzato

Nelle indagini sperimentali condotte si è applicato il modello teorico proposto da Mendez e Losada, per quanto concerne la parte del modello che considera la presenza di vegetazione di fondo senza contemplare effetti di shoaling e frangimento. Lo scopo degli esperimenti è stato quello di quantificare il coefficiente di resistenza della vegetazione artificiale e di determinare delle relazioni che leghino la dissipazione di energia del moto ondoso alle caratteristiche della vegetazione.

Lo studio sperimentale è stato focalizzato sugli effetti della vegetazione sommersa e parzialmente emersa in condizioni di moto ondoso regolare. E' ragionevole, perciò, assumere la validità della teoria lineare dell'onda.

La teoria lineare descrive, com'è noto, il moto di un'onda sinusoidale, in condizioni di fluido incomprimibile, moto irrazionale, ampiezza d'onda piccola rispetto alla sua lunghezza ($a/L \rightarrow 0$), fondo piano impermeabile, assenza di correnti sovrapposte al moto ondoso. In Figura 2 è illustrato uno schema dell'onda sinusoidale:

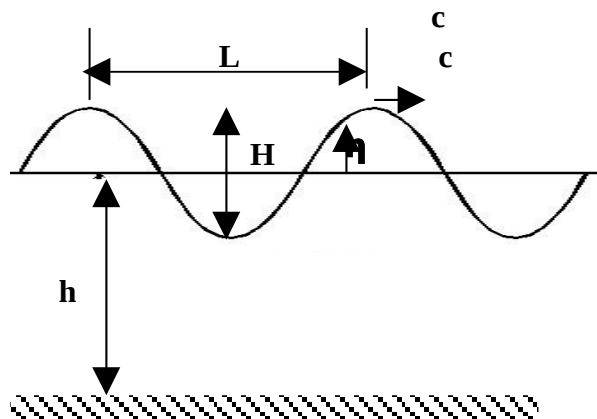


Figura 2 - Schema di un'onda sinusoidale

dove η è la sopraelevazione di superficie, L la lunghezza d'onda, c la celerità di propagazione dell'onda, H l'altezza d'onda, h la profondità del fondale.

In particolare si è cercato di inquadrare modellisticamente il problema facendo riferimento all'equazione che esprime la conservazione della cosiddetta "azione d'onda"

(wave action) A , definita come il rapporto tra la densità di energia dell'onda E e la pulsazione σ che, in forma generale si scrive:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} c_{gx} A + \frac{\partial}{\partial y} c_{gy} A + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_{\sigma} A + \frac{\partial}{\partial \theta} c_{\theta} A = \frac{S}{\sigma} \quad (0)$$

Il primo termine della (0) descrive la variazione locale dell'azione d'onda nel tempo, il secondo e il terzo termine rappresentano la propagazione dell'azione d'onda nello spazio (c_{gx} e c_{gy} sono le componenti lungo x e lungo y della celerità di gruppo, ossia della velocità con cui si propaga l'energia nello spazio), il quarto termine è relativo alla variazione di A nel dominio delle frequenze σ , il quinto è relativo al fenomeno della rifrazione indotta dal fondo e dalle correnti, essendo θ la direzione d'onda. Il termine sorgente S a destra del segno di uguaglianza include la crescita dell'onda per effetto del vento, e l'attenuazione dell'onda per attrito di fondo, white capping e frangimento per raggiunta profondità limite, e per l'effetto dissipativo prodotto dalla presenza di vegetazione.

L'attenzione è focalizzata sull'individuazione di una formulazione soddisfacente del contributo al termine sorgente per descrivere sia l'incremento di dissipazione di energia prodotto dalla presenza di vegetazione, sia la riduzione di dissipazione legata all'attrito sul fondo determinata, anch'essa, dalla presenza di vegetazione.

Anche con riferimento alle condizioni sperimentali indagate, è possibile introdurre alcune semplificazioni nell'equazione (0). In particolare, assumendo una condizione di moto stazionario e un'onda monocromatica che si propaga nella sola direzione x, si può scrivere:

$$\frac{\partial E c_g}{\partial x} = -\varepsilon_v - \varepsilon_f \quad (0)$$

dove $E = (1/8)\rho g H^2$ è la densità d'energia, H l'altezza d'onda, g l'accelerazione di gravità, ρ la densità dell'acqua, $k = 2\pi/L$, il numero d'onda, ε_v la dissipazione d'energia per unità di superficie e per unità di tempo indotta dalla vegetazione, ε_f la dissipazione d'energia per unità di superficie e per unità di tempo prodotta dall'attrito del fondo, c_g la celerità di gruppo dell'onda, c la celerità dell'onda, che hanno rispettivamente le seguenti espressioni:

$$c_g = \frac{1}{2} c \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \quad (0)$$

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)} \quad (0)$$

Nel modello si trascurano quindi altri effetti dissipativi quali il frangimento e il white capping e l'eventuale incremento di energia prodotto dall'azione del vento.

Per precisare i parametri ε_v e ε_f che compaiono nella (0), si considerano dapprima separatamente gli effetti dell'attrito sul fondo e della vegetazione.

2.1 Dissipazione per attrito con il fondo

Per l'inquadramento e l'analisi dei risultati ottenuti si è ricorsi all'utilizzo di un modello matematico che descrive la trasformazione dell'onda in condizioni di fondo sgombro da vegetazione, per caratterizzare l'attenuazione subita dall'onda anche in questa condizione.

In questo caso l'equazione dell'energia da risolvere è:

$$\frac{\partial E \cdot c_g}{\partial x} = -\varepsilon_f \quad (0)$$

Poiché c_g è costante nello spazio, essa può essere portata all'esterno della derivata. Ricordando inoltre l'espressione per l'energia E , l'equazione (0) si può quindi esprimere come:

$$\frac{\partial H^2}{\partial x} = -K_f H^2 \quad (0)$$

con $K_f = \varepsilon_f / (E c_g)$ coefficiente di dissipazione dovuto all'attrito di fondo. Per la stima del parametro K_f si è fatto riferimento alla formulazione di Collins (1972), da cui risulta:

$$K_f = f \frac{4k^2 H}{\sinh(kh)(\sinh(2kh) + 2kh)} \quad (0)$$

dove f è un coefficiente d'attrito, k il numero d'onda, h il livello della superficie di riposo, H l'altezza d'onda.

Il sistema composto dalle equazioni (0) e (0) può essere agevolmente risolto per via analitica, ma in vista dell'impiego di queste relazioni in un modello bidimensionale non stazionario, si è preferito linearizzare il problema introducendo nella (0) in luogo dell'altezza d'onda H , locale ed istantanea, un'altezza d'onda caratteristica \bar{H} . La scelta di tale altezza caratteristica va messa in relazione al problema che si sta affrontando. Ad esempio in un modello non stazionario si può assumere che \bar{H} corrisponda al valore dell'altezza d'onda calcolata al passo temporale precedente.

Con riferimento agli esperimenti condotti si è deciso di assumere per \bar{H} il valore medio dell'altezza d'onda nel tratto interessato dalla vegetazione.

In queste ipotesi K_f risulta costante nello spazio e la soluzione del sistema composto dalle equazioni (0) e (0) risulta:

$$H^2 = H_0^2 \cdot e^{-K_f x} \quad (0)$$

dove H_0 è l'altezza iniziale dell'onda, H l'altezza dell'onda alla generica coordinata spaziale x .

Nel caso in esame è stata considerata come energia iniziale quella calcolata partendo dalle misurazioni in corrispondenza della sonda posta nella posizione $x=0$, ossia all'inizio del campo ricoperto dalle piante, nelle prove con vegetazione.

Anche in questo modello è possibile risalire all'energia dell'onda, e quindi all'altezza d'onda, inserendo nel modello le caratteristiche del moto ondoso. Il parametro che descrive l'effetto del fondale è il coefficiente d'attrito f , da determinarsi.

2.2 Dissipazione prodotta dalla vegetazione

Nel caso di un campo vegetato, si può dividere il campo di moto in due strati, uno strato più basso dove è presente la vegetazione, responsabile della dissipazione di energia ed uno strato più superficiale, sopra il campo vegetato, dove il moto risulta pressoché indisturbato. In Figura 3 è illustrato il profilo di velocità all'interno di un campo vegetato nel caso di una corrente.

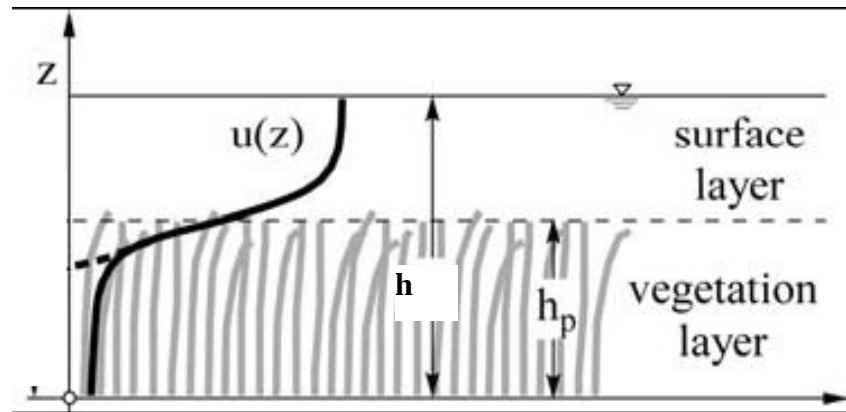


Figura 3 - Profilo di velocità in un campo vegetato all'interno e sopra la vegetazione

Nel caso del profilo della distribuzione in direzione verticale della velocità orbitale all'interno di un campo vegetato, esistono pochi dati, sebbene siano state realizzate alcune ricerche sull'interazione fra il moto e la vegetazione (Mazda e Wolanski, 1995, Nepf, 1999).

Nel caso di moto ondoso, alcuni modelli (e.g., Meijer, 2004) assumono che il profilo di velocità all'interno di un campo vegetato sia sostanzialmente uniforme. Nel modello teorico considerato in questo lavoro (Kobayashi e Asano, 1993; Mendez e Losada, 2004) viene assunto che la teoria lineare dell'onda per onde che si propagano sopra un fondo impermeabile sia valida per calcolare la velocità non solo nello strato superiore nel quale la vegetazione è assente, ma anche nello strato occupato dalla vegetazione. In particolare vengono calcolate separatamente le distribuzioni di velocità nello strato occupato dalla vegetazione e in quello sovrastante imponendo una condizione di congruenza in corrispondenza dell'interfaccia tra i due strati, consistente nell'uguagliare la sola componente verticale di velocità. Per la componente orizzontale, infatti, si ammette che vi sia una discontinuità nel passare dallo strato vegetato a quello superiore libero da vegetazione.

Il termine che esprime la potenza dissipata, integrato sullo strato dal fondo all'altezza della vegetazione e mediato nel tempo, è dato da:

$$\varepsilon_v = \int_0^{h_p} F u dz \quad (0)$$

dove h_p è l'altezza della vegetazione, $F=(F_x,0,F_y)$, la forza agente sulla vegetazione per unità di volume, $u=(u,0,w)$, la velocità nel caso bidimensionale.

Esplicitando le espressioni di F ed u la (0) diventa:

$$\varepsilon_v = \overline{\int_0^{h_p} (F_x u + F_z w) dz} \quad (0)$$

Si assume che il termine $F_z w$ sia trascurabile rispetto a $F_x u$ in un mezzo dissipativo anisotropo quale un fondo vegetato (Kobayashi et al., 1993; Dubi and Torum, 1997; Mendez et al., 1999a). La (0) diventa quindi:

$$\varepsilon_v = \overline{\int_0^{h_p} F_x u dz} \quad (0)$$

Per la determinazione dell'azione idrodinamica F_x si dovrebbe tener conto del moto relativo tra fluido e vegetazione, introducendo quindi un numero elevato di parametri e riconducendosi a formulazioni sensibilmente complesse del problema. Nel presente modello sono trascurati gli effetti dovuti al moto della vegetazione. Si applica perciò un modello nel quale l'effetto derivante dall'eventuale movimento delle piante artificiali flessibili viene inserito nel coefficiente di resistenza C_D che quantifica la resistenza globale al moto. In queste ipotesi l'azione idrodinamica orizzontale per unità di volume può essere, perciò, scritta nel seguente modo:

$$F_x = \frac{1}{2} \rho C_D b N u |u| \quad (0)$$

dove u è la velocità orizzontale nella regione vegetata dovuta al moto ondoso, b l'area di ogni singola pianta per unità di altezza investita dal moto ondoso, N il numero di elementi di vegetazione per unità di area orizzontale, C_D il coefficiente di resistenza.

Si sottolinea che la velocità corretta da utilizzare nel calcolo dell'azione idrodinamica F_x è la velocità relativa tra pianta e fluido, anziché la velocità assoluta. D'altra parte, proprio l'utilizzo di una velocità assoluta u rende valida l'espressione (0) anche nel caso di vegetazione flessibile, oltre che in quella rigida: il non aver considerato gli effetti dovuti alla flessibilità delle piante è superato nel considerare diversi valori del coefficiente C_D

Si è assunto (Dalrymple, 1984) che sia valida la teoria lineare nel calcolo della u sia per lo strato che comprende l'area vegetata che per lo strato superiore alla vegetazione. In queste ipotesi, l'espressione della dissipazione di energia per unità di area orizzontale, ricavata da Dalrymple è:

$$\varepsilon_v = \frac{2}{3\pi} \rho C_D b N \left[\frac{kg}{2\sigma} \right]^3 \frac{\sinh^3(kh_p) + 3\sinh(kh_p)}{3\cosh^3(kh)} H^3 \quad (0)$$

dove k è il numero d'onda, h il livello della superficie di riposo, H l'altezza d'onda, T il periodo d'onda, h_p l'altezza della vegetazione, g l'accelerazione gravitazionale, ρ la densità dell'acqua, b l'area per unità di altezza di ogni singola pianta investita dal moto ondoso, N il numero di elementi di vegetazione per unità di area orizzontale, C_D il coefficiente di resistenza, $\sigma = 2\pi/T$ la pulsazione dell'onda, ε_v la dissipazione d'energia per unità di area e per unità di tempo indotta dalla vegetazione.

L'espressione della dissipazione di energia utilizzata non considera l'effetto indotto sul moto ondoso dalla riflessione della vegetazione. Tuttavia si precisa che una riflessione del 20%, ad esempio, si traduce in una riflessione di energia del 4%, poichè l'energia è proporzionale ad H^2 . Perciò questo aspetto si può considerare trascurabile in termini di energia dell'onda.

Inserendo l'espressione della dissipazione d'energia ricavata da Dalrymple nella (0) nel caso di fondo orizzontale, ipotizzando di trascurare il termine relativo alle dissipazioni per attrito (ε_f) e ponendo l'approssimazione

$$H^3 = \bar{H}H^2 \quad (0)$$

si ottiene:

$$\frac{\partial H^2}{\partial x} = -K_v H^2 \quad (0)$$

con K_v coefficiente di dissipazione dovuto alla sola vegetazione pari a:

$$K_v = \frac{8}{9\pi} C_D b N k \frac{\sinh^3(kh_p) + 3\sinh(kh_p)}{\sinh(kh)(\sinh(2kh) + 2kh)} \bar{H} \quad (0)$$

Assumendo la condizione al contorno $H(x=0)=H_0$, dove $x=0$ è la coordinata orizzontale iniziale della vegetazione in direzione dello strato vegetato, la soluzione dell'equazione differenziale (0) porta ad ottenere:

$$H^2 = H_0^2 \cdot e^{-K_v x} \quad (0)$$

Il modello descritto permette di stimare il fenomeno di attenuazione inserendo nella relazione i parametri delle onde e della vegetazione. Rimane da risolvere il problema legato ai valori da attribuire al coefficiente di resistenza, che dovrà necessariamente essere determinato sulla base dei dati sperimentali.

2.3 Modello teorico complessivo

Finora si sono considerati separatamente gli effetti della dissipazione dovuti al solo attrito di fondo (paragrafo 3.1) e alla sola presenza di vegetazione (paragrafo 3.2). Tuttavia nelle situazioni reali, con densità di vegetazione variabile fra valori molto alti e valori più bassi, la dissipazione dell'altezza d'onda è dovuta ad entrambe le componenti che agiscono contemporaneamente sul moto ondoso. Il problema è quantificare per ogni densità di vegetazione i due contributi. Il problema è complesso, data la grande variabilità di parametri in gioco, che dipendono sia dalle caratteristiche del moto, sia dal tipo di vegetazione.

Generalmente in letteratura si trovano valori del coefficiente di resistenza inteso come coefficiente globale, che comprende tutti gli effetti dissipativi, non solo quelli dovuti alla sola vegetazione, ma anche quelli dovuti all'attrito di fondo. Questo coefficiente normalmente indicato come C_D qui, per distinguerlo da quello relativo alla sola vegetazione, è indicato con C_{drag} .

Analogamente, nei valori da attribuire al coefficiente di attrito del fondo, f , si deve tener conto che esso è una funzione oltre che del tirante d'acqua e di altri parametri del moto, anche della densità della vegetazione:

$$f = f(N) \quad (0)$$

In questo lavoro di ricerca si è cercato di trovare delle relazioni empiriche per determinare il coefficiente di attrito del fondo in presenza di vegetazione. Si è tentato di affrontare il problema secondo un approccio teorico, validato dai dati sperimentali.

E' stata assunta valida l'ipotesi di linearità degli effetti della dissipazione dovuta alla vegetazione ε_v , e all'attrito di fondo ε_f . Questa è un'ipotesi forte, adottata per superare la difficoltà di identificare il contributo di ogni singolo termine quando un'onda viene dissipata lungo un fondo vegetato. Tuttavia, come verrà in seguito dimostrato nella validazione del modello coi dati sperimentali, questa approssimazione è abbastanza buona per descrivere la trasformazione dell'energia d'onda, quando il coefficiente di resistenza C_D , sia stato previamente calcolato.

Nell'ipotesi di linearità l'equazione di conservazione dell'energia di un'onda in presenza di fondo ricoperto da è pertanto l'equazione (0).

In termini di coefficienti di dissipazione, K_v , K_f , la (0) si può scrivere come:

$$\frac{\partial H^2}{\partial x} = -K_v H^2 - K_f H^2 \quad (0)$$

che ammette come soluzione:

$$H^2 = H_0^2 e^{-(K_v + K_f)x} \quad (0)$$

dove il coefficiente di dissipazione totale è dato da:

$$K_{tot} = K_v + K_f \quad (0)$$

In tutti i casi di densità di vegetazione, volendo considerare entrambi gli effetti, si può pensare di calcolare separatamente i due effetti dissipativi e di sommarli, nel modo che segue.

Prendiamo in esame il caso di densità di vegetazione molto densa, in cui si può considerare trascurabile la dissipazione dell'altezza d'onda dovuta all'attrito di fondo, e assumiamo che tutta la dissipazione sia dovuta alla sola presenza di vegetazione. In tali condizioni la (0) si riduce a:

$$H^2 \cong H_v^2 = H_0^2 \cdot e^{-K_v x} \quad (0)$$

In quest'ipotesi, utilizzando i dati sperimentali relativi a condizioni di elevata densità di vegetazione, è possibile determinare dalla (0) un valore del coefficiente di resistenza C_D , responsabile dell'effetto della sola vegetazione essendo $C_D \approx C_{Ddrag}$ e quindi una relazione teorica, valida per qualsiasi densità di vegetazione, che legghi il coefficiente di resistenza C_D a un qualche parametro del moto ondoso. La relazione teorica così trovata permette quindi di determinare il valore del coefficiente di resistenza C_D , responsabile dell'effetto della sola vegetazione, anche per densità di vegetazione più rada, in cui oltre alla vegetazione diventa non trascurabile l'effetto dell'attrito del fondo. Viene ipotizzato che il C_D non sia influenzato dalla densità di vegetazione (almeno finché tale densità non raggiunga valori troppo elevati). Inserendo il valore del coefficiente di resistenza teorico C_D , così determinato, nella relazione (0) è possibile ricavare il termine di dissipazione dovuto alla sola vegetazione K_v , isolandolo quindi dall'effetto dell'attrito del fondo.

Poiché nell'espressione (0) del coefficiente di dissipazione K_v , il parametro altezza d'onda media \bar{H} , è incognito, si deve risolvere con procedimento iterativo il sistema:

$$\begin{cases} H_v^2 = H_0^2 \cdot e^{-K_v x} \\ \bar{H} = \frac{H_0 + H_v}{2} \end{cases} \quad (0)$$

La soluzione del sistema (0) fornisce il valore teorico del coefficiente di dissipazione dovuto alla sola vegetazione K_v , valido per qualsiasi densità di vegetazione.

Si desidera ora cercare una relazione teorica per il coefficiente di dissipazione di attrito del fondo K_f . Questo sarà funzione, oltre che degli altri parametri del moto ondoso, anche del tirante d'acqua e della densità di vegetazione:

$$K_f = K_f(h, N) \quad (0)$$

Per analizzare singolarmente l'influenza dei due parametri, sono state considerate separatamente le due situazioni, con e senza vegetazione.

In assenza di vegetazione, tutta la dissipazione è dovuta all'attrito del fondo e la (0) si riduce alla (0):

$$H^2 = H_f^2 = H_{f0}^2 \cdot e^{-K_f x} \quad (0)$$

Risolvendo la (0) a partire dai dati sperimentali, si ottiene un valore del coefficiente di dissipazione di attrito che potremmo definire un coefficiente di dissipazione d'attrito massimo, K_{fmax} , perché è il massimo valore di resistenza che può esplicare il fondo, responsabile da solo di tutta la dissipazione dell'altezza d'onda, dal momento che non è presente vegetazione. Si è quindi ricavata una relazione teorica del K_{fmax} , funzione del solo tirante d'acqua, h :

$$K_{f \max} = K_{f \max}(h) \quad (0)$$

Anche in questo caso, analogamente al caso di densità di vegetazione massima, si potrebbe tentare di ricavare una relazione teorica per il coefficiente d'attrito f , a partire dai dati sperimentali della condizione senza vegetazione, valida anche nella condizione di fondo vegetato, ma questa operazione ha comportato diverse difficoltà, legate alla grande dispersione dei dati sperimentali, che avrebbero reso poco affidabile una relazione teorica. Si è quindi preferito procedere in altro modo.

Considerando il caso più generale, per ogni densità di vegetazione N , dai dati sperimentali è noto il valore del coefficiente di dissipazione totale K_{tot} . Noto il coefficiente di dissipazione teorico dovuto alla sola vegetazione K_v , dalla soluzione del sistema (0), è stato calcolato direttamente dalla (0) un valore sperimentale del coefficiente di dissipazione d'attrito K_f :

$$K_f = -K_v + \frac{1}{x} \ln \left[\frac{H_0}{H} \right]^2 \quad (0)$$

Ora normalizzando K_f , per ogni densità di vegetazione, rispetto al K_{fmax} , nella condizione senza vegetazione, si è eliminata la dipendenza dal tirante d'acqua, e si è trovata una espressione funzione della sola densità:

$$\frac{K_f}{K_{f \max}} = K_{rel}(N) \quad (0)$$

In questo modo si è isolata l'influenza dei due parametri nell'espressione del coefficiente di dissipazione d'attrito K_f , che presenta l'espressione generale:

$$K_f = K_{f \max}(h) \cdot K_{rel}(N) \quad (0)$$

La relazione (0) fornisce il valore teorico del coefficiente di dissipazione d'attrito K_f , valido per qualsiasi tirante e per qualsiasi densità di vegetazione.

2.4 Valutazione del coefficiente di resistenza C_D in un campo vegetato

E' chiaro che il successo del modello come strumento di previsione richiede la conoscenza del coefficiente di resistenza C_D . Il valore di questo parametro dipende dal moto intorno alla pianta e dal moto stesso della pianta, che sono funzioni dell'idrodinamica e delle proprietà biomeccaniche. Tuttavia una corretta modellazione del moto di oscillazione della vegetazione è piuttosto complesso, non solo per la difficoltà di risolvere il problema dell'oscillatore armonico non lineare ad n gradi di libertà, ma anche per la complessità e la casualità delle proprietà geometriche e biomeccaniche delle piante. Alcuni tentativi per il caso di moto uniforme (Kouwen e Unny, 1973; Kouwen, 1988; Crollo et al., 2002; Ghisaberti e Nepf, 2002), così come per il caso di moto oscillatorio (Asano et al., 1992; Dubi e Torum, 1995; Mendez et al., 1999a) sono stati effettuati per modellare sia le proprietà biomeccaniche, sia il movimento delle piante. In ogni caso, tutti questi modelli necessitano di dati sperimentali per calibrare il coefficiente di resistenza. Per questo motivo, in questo lavoro di ricerca è stata svolta un'analisi semplificata focalizzando l'attenzione soprattutto sui processi idrodinamici, nell'ipotesi di trascurare il movimento delle piante.

Il parametro di calibrazione nella formulazione di Dalrymple, che è di importanza fondamentale nella determinazione della dissipazione dovuta alla vegetazione, è il coefficiente di resistenza C_D , il quale tiene conto non solo della resistenza al moto determinata dalla vegetazione ma anche dell'attrito del fondo. E' noto che il valore di tale coefficiente è dipendente dal numero di Reynolds e dalla forma e dalla distribuzione delle piante (Mendez e Losada, 2004). Tuttavia esistono numerosi processi che possono contribuire in maniera significativa a determinare il valore del coefficiente di resistenza.

In un campo vegetato la dissipazione dovuta all'attrito di fondo si assume essere sensibilmente inferiore al contributo della dissipazione dovuta alla vegetazione (Mendez e Losada, 2004, Mazda et al., 1997), anche in caso di vegetazione relativamente sparsa (Nepf, 1999). Nella formulazione di Dalrymple solo la resistenza dovuta alla vegetazione viene considerata, mentre l'attrito del fondo viene trascurato.

E' da osservare, a questo proposito e per quanto è a nostra conoscenza, che non esistono in letteratura indagini specifiche che hanno fornito valutazioni circa il rapporto tra la resistenza della vegetazione e quella del fondo.

In questo studio invece viene preso in considerazione anche l'attrito del fondo per tentare di trovare delle relazioni per il coefficiente di resistenza complessivo in presenza di vegetazione.

Immaginiamo, come frequentemente riportato in letteratura, di schematizzare un elemento di vegetazione come un cilindro (nel nostro caso, un cilindro rigido).

L'interazione fra il corpo del cilindro e la corrente oscillante induce vortici e scie a valle della corrente. Considerando il moto attorno ad un singolo cilindro, sia l'attrito superficiale sia il gradiente di pressione inducono forze di resistenza. L'attrito di superficie dipende eventualmente dalla scabrezza di superficie, in ogni caso, per valori del numero di Reynolds sufficientemente elevati, la resistenza d'attrito è molto minore rispetto a quella dovuta al gradiente di pressione (Massel et al, 1999). In questo approccio, dunque, viene considerata solo quest'ultima resistenza.

La resistenza dovuta al gradiente di pressione attorno ad un cilindro in una corrente oscillante induce una forza di resistenza e una di sollevamento. Nei casi considerati in questo studio si assume l'approssimazione della acque basse, nella quale le velocità orbitali verticali sono molto inferiori a quelle orizzontali, quindi le forze di sollevamento verranno trascurate.

Il moto attorno a un cilindro provoca una contrazione delle linee di corrente, che si traduce in un aumento della velocità dell' acqua e quindi una diminuzione della pressione. A valle del punto di separazione si crea una scia, dove la pressione è molto più bassa che a monte dell' oggetto (vedi Figura 4).

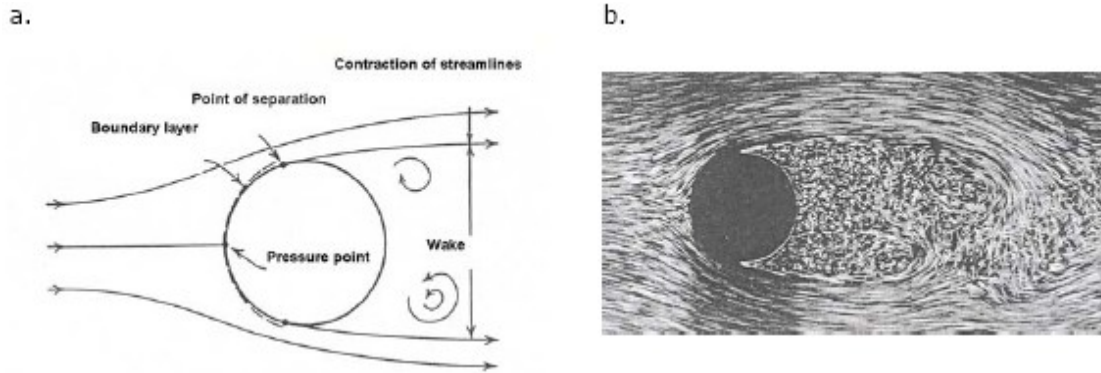


Figura 4 - Moto attorno a un cilindro per $Re=2300$: a. approccio teorico, b. sperimentale, (da Battjes, 1999)

Il gradiente totale della pressione nella direzione del moto dà il maggior contributo alla forza di resistenza. Nella pratica, in un campo vegetato il regime è di moto turbolento. Calcoli del numero di Reynolds per un singolo stelo nel caso di un cilindro con diametro uguale rispettivamente ad una pianta di mangrovia e alla *Spartina*, mostra che i valori del numero di Reynolds si trovano nel range di 10^3 - 10^5 (Figura 5).

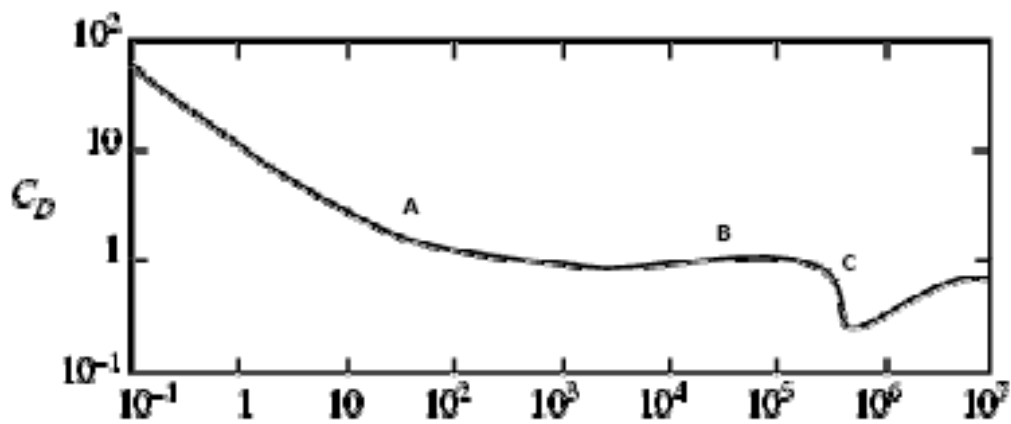


Figura 5 - Coefficiente di resistenza in funzione del numero di Reynolds nel caso di moto attorno ad un singolo cilindro (Battjes, 1999)

Quando si considera una serie di cilindri, numerosi processi influenzano il coefficiente di resistenza. Nell'affrontare il problema è spesso conveniente fare riferimento alla distanza relativa (s/d), dove s rappresenta la distanza fra i cilindri e d il

diametro. Inoltre, in presenza di vegetazione la configurazione degli steli è irregolare e casuale, tuttavia per semplificare il problema possiamo considerare una configurazione sfalsata. Per ogni regime di flusso (laminare o turbolento) diverso è il valore del coefficiente di resistenza, come nel caso del singolo cilindro (Figura 5), ma in un approccio multi cilindro, i limiti dei differenti regimi di moto sono differenti, a causa delle interferenze tra le diverse scie, all'effetto scia e all'effetto di canalizzazione (Nepf, 1999).

Con una distanza relativa molto grande fra i cilindri, maggiore della lunghezza della scia, l'influenza relativa dei cilindri è trascurabile, e può essere applicato il coefficiente del singolo cilindro. Questo è confermato dal caso di moto uniforme da Nepf (1999).

Al diminuire della distanza relativa, gli studi sperimentali di Reidelman a Sarpkaya (1985) hanno concluso che il coefficiente globale di una serie di cilindri è minore del coefficiente del singolo cilindro, in un moto oscillatorio. Una spiegazione può essere data dal fatto che la presenza dei cilindri a monte influenza il campo di moto attorno ai cilindri di valle, come mostrato in Figura 6. Alcuni cilindri di valle possono trovarsi nella scia dei cilindri di monte e quindi essere interessati da una velocità del fluido inferiore, ma da una maggiore intensità della turbolenza, mentre altri possono essere soggetti ad un aumento della velocità a causa dell'accelerazione del fluido attraverso gli spazi fra i cilindri di monte (Heidelman a Sarpkaya, 1999). L'intensità, la lunghezza scala e la diffusione della turbolenza nel corpo d'acqua governano le forze di resistenza indotte dal moto sui cilindri (Massel et al., 1999).

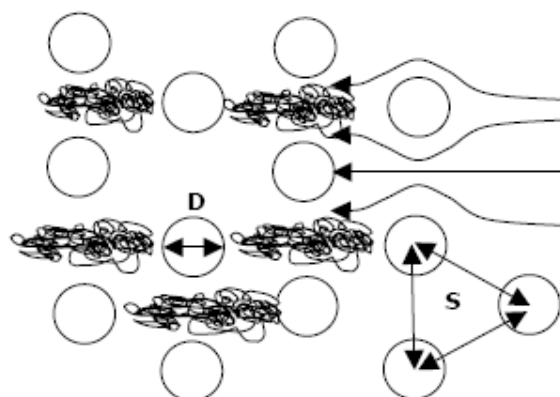


Figura 6 - Configurazione di cilindri sfalsati con scie

Quando la distanza fra le piante diminuisce ulteriormente, si può notare un'altra variazione nel valore del C_D . In accordo con Chabarti (1991) e Massel et al (1999), il valore del C_D aumenta quando la distanza relativa s/d si avvicina a 1.1. Ad un certo punto la vegetazione può diventare così densa, che l'acqua preferisce le vie di minima resistenza, e defluisce principalmente sopra il campo vegetato, invece che attraverso di esso. La vegetazione in questo caso agisce come una sorta di "fondo rialzato semi-permeabile": questo provoca la contrazione delle linee di corrente e l'aumento delle velocità. La resistenza indotta è determinata dalla formazione di uno strato d'attrito in corrispondenza dell'interfaccia fra la vegetazione e lo strato d'acqua sovrastante.

Un altro importante fattore è l'altezza relativa della vegetazione. Se la vegetazione è bassa e completamente sommersa, l'acqua può scegliere la via di resistenza minima e scorrere prevalentemente sopra la vegetazione. Al contrario, quando l'altezza relativa è grande, o la vegetazione parzialmente emersa, l'acqua è comunque costretta a passare attraverso la vegetazione, il che porta ad un differente valore del C_D .

Nepf (1999) ha studiato l'influenza della densità relativa sul coefficiente di resistenza, definendo la densità di vegetazione come:

$$a = N \cdot d = \frac{d}{s} \quad (0)$$

dove N è il numero dei cilindri per metro quadrato, s la distanza relativa e d il diametro dei cilindri. In questo modello ad rappresenta la frazione del volume del campo di moto occupato dalle piante.

Nepf ha combinato i risultati di diversi studi numerici e modelli fisici (Tabella 1), con diverse configurazioni e distanze fra i cilindri in Figura 7, dove n rappresenta il rapporto fra la distanza longitudinale e quella laterale. Per $n=1$ si ha una configurazione sfalsata quadrata. In questo caso, una diminuzione nella distanza relativa (che equivale ad un aumento della densità ad) provoca una diminuzione del coefficiente di resistenza, dovuto ad un aumento dell'interferenza di scia.

Source	Re_d	Configuration	Symbol in Figure 6
Dunn et al. [1996]	1,000-4,000	staggered, $n = 1/2$	open circle
Seginer et al. [1976]	1,000	staggered, $n = 1$	open diamond
Kays and London [1956]	1,000	staggered, $n = 1-3$	square
Petryk [1969]	10,000	random	solid diamond
		staggered, $n = 1, 2$	triangle
Zdravkovich [1993]	1,000	staggered, $n = 1^*$	square with slash
Present study	4,000-10,000	random	solid circle
Model	$> \approx 200$	random	solid line
		staggered, $n = 1/2-2$	dashed lines

Here, n is ratio of longitudinal to lateral row spacing within staggered array.
 *One third, 2/3, and fully staggered.

Tabella 1 – Riepilogo dei numeri di Reynolds per le diverse configurazioni dei cilindri (Nepf, 1999).

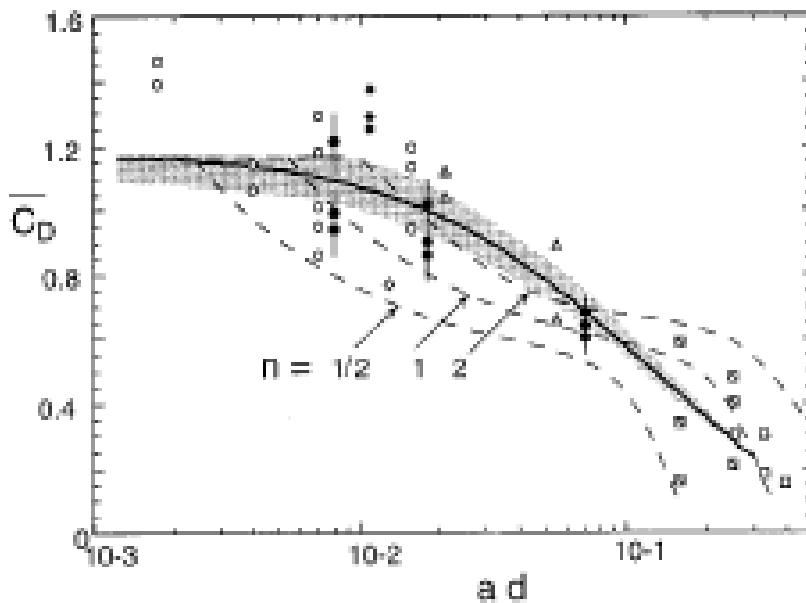


Figura 7 - Dipendenza del C_D dalla densità della vegetazione ad (Nepf 1999)

Il coefficiente di resistenza dipende poi dalle caratteristiche dell'onda. Per caratterizzare idrodinamicamente il fenomeno, è opportuno trovare delle relazioni fra il coefficiente di resistenza della vegetazione C_D , e dei parametri adimensionali del moto. In alcuni studi (Kobayashi et al., 1993; Mendez et al., 1999a), è stato visto che il C_D dipende direttamente dal numero di Reynolds nel quale la velocità caratteristica

corrisponde alla massima ampiezza della velocità orbitale in direzione orizzontale, mentre in altri lavori (Mendez e Losada, 2004) si trovano correlazioni migliori usando il numero di Keulegan-Carpenter. I due numeri sono definiti rispettivamente come:

$$Re = \frac{u_c b}{\nu} \quad (0)$$

$$KC = \frac{u_c T}{b} \quad (0)$$

dove b è il diametro del singolo stelo della pianta, ν la viscosità cinematica dell'acqua, pari a 10^{-6} m²/s, T il periodo dell'onda, u_c la velocità caratteristica che agisce sulla pianta, definita come la massima velocità orbitale orizzontale sulla sommità della vegetazione:

$$u_c = \frac{kgH \cosh(kh_p)}{2\sigma \cosh(kh)} \quad (0)$$

con k numero d'onda, H altezza d'onda, σ pulsazione dell'onda, h_p altezza della pianta, h altezza del tirante d'acqua.

Mendez e Losada (2004) hanno trovato diverse relazioni fra il coefficiente di resistenza e il numero di Keulegan-Carpenter per differenti valori dell'altezza relativa della vegetazione α , definita come rapporto fra l'altezza della pianta, e l'altezza del tirante ($\alpha = h_p/h$). In Figura 8 sono mostrati i risultati di 154 prove di un modello fisico in una canaletta con vegetazione artificiale, dove il parametro di calibrazione è C_D e la densità e il diametro della vegetazione restano costanti. Si può notare che i cilindri usati in questo modello hanno un diametro di 2.5 cm e una densità di 1200 cilindri/m². Un diametro così grosso, combinato con una densità molto alta, si traduce con valori del coefficiente di resistenza bassi. In questo modello il 60% dello spazio è occupato dalla massa della vegetazione e solo il 40% dall'acqua. Mendez e Losada non hanno dato un'interpretazione dei risultati. Alcuni processi presunti che possono spiegare le relazioni fra il coefficiente di resistenza e il numero di Keulegan-Carpenter vengono di seguito descritti.

Per le onde caratterizzate da periodi maggiori, in un certo intervallo di tempo si verifica un numero inferiore di inversioni della velocità orizzontale, ovvero un numero

inferiore di accelerazioni e decelerazioni del moto, in rispetto al caso di un'onda corta, caratterizzata da periodi relativamente brevi. Dal momento che in un moto decelerato viene dissipata una maggior quantità di energia in rispetto ad un moto accelerato, a causa della maggior turbolenza (Schiereck, 2001; Booij, 1992), ne consegue che l'energia dissipata durante la fase di decelerazione non è più disponibile per l'accelerazione successiva. Questo significa che in un certo intervallo di tempo le onde corte dissipano più energia delle onde lunghe. Questo è verificato nella relazione C_D-KC trovata da Mendez e Losada: un valore del periodo inferiore fa diminuire il numero di Keulegan-Carpenter, a cui corrisponde un maggior coefficiente di resistenza.

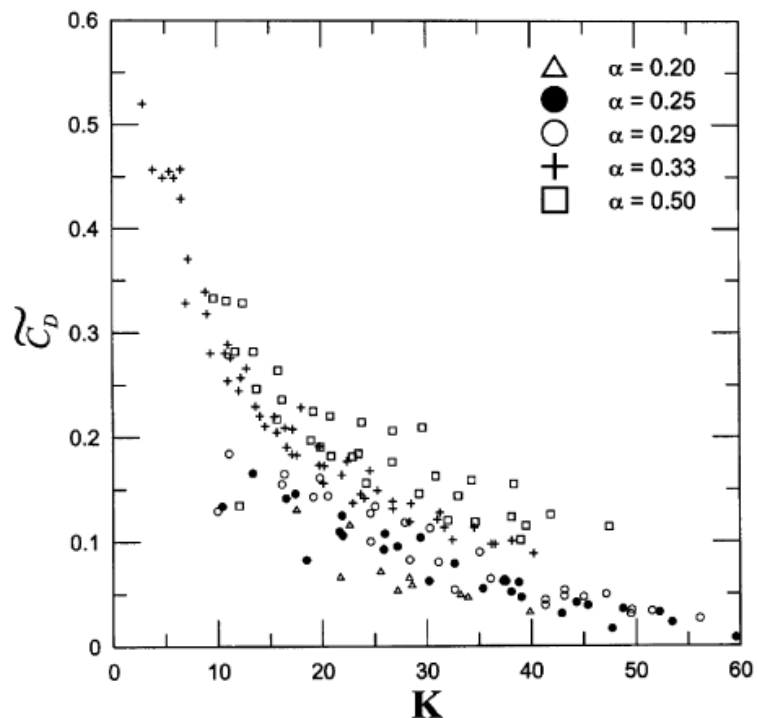


Figura 8 - Relazione fra il coefficiente di resistenza C_D e il numero di Keulegan-Carpenter per diversi valori dell'altezza relativa della vegetazione (Mendez e Losada, 2004)

Dalle precedenti considerazioni, è risultato che in ogni diversa situazione i processi più importanti devono essere presi in considerazione nella determinazione del coefficiente di resistenza. E' chiaro che il valore di tale coefficiente dipende dal numero di Reynolds (e quindi dal regime del moto) e dalla forma e dalla configurazione delle

piante. Il regime del moto dipende principalmente dalle caratteristiche dell'onda e dalla distanza relativa, dalla posizione e dal diametro dei cilindri.

Una relazione fra il coefficiente di resistenza e le caratteristiche dell'onda è stata definita da Mendez e Losada (2004), mediante l'introduzione del numero di Keulegan-Carpenter per vegetazione con diverse altezze relative (0).

La dipendenza del coefficiente di resistenza dalla distanza relativa è stata studiata da Nepf (1999), la quale ha trovato che la diminuzione del coefficiente di resistenza al diminuire della distanza relativa è dovuto all'interferenza di scia. Un altro parametro importante da prendere in considerazione, in quanto contribuisce ad aumentare l'interferenza di scia è la viscosità turbolenta. Questo parametro è inglobato nel coefficiente C_D calibrato.

Ciò che deve essere tenuto a mente è che diversi processi correlati alla resistenza, ed inizialmente trascurati, come l'attrito del fondo, il moto della vegetazione e l'inerzia possono essere presenti nelle situazioni reali, ma non vengono considerati nella formulazione di Dalrymple. Ciò potrebbe tradursi in valori del coefficiente di resistenza diversi da quelli reali, perché dei contributi di questi processi non viene tenuto conto nel coefficiente di resistenza, e quindi non è del tutto corretto riferirsi a questo parametro come il reale coefficiente di resistenza.

Oggetto di questa ricerca è proprio cercare di valutare il contributo dell'attrito del fondo nella determinazione del coefficiente di resistenza, e trovare delle relazioni fra questi due parametri.

3 Indagini sperimentali sugli effetti dissipativi del moto ondoso

3.1 Vegetazione utilizzata

Le prove di laboratorio hanno avuto lo scopo di simulare il comportamento di una specie di vegetazione molto presente sulla superficie delle barene, la *Spartina maritima*. Questo tipo di pianta ha un gambo relativamente rigido, come una canna, con un diametro dell'ordine dei 10 mm e un'altezza variabile dai 30 ai 70 cm (Tiner, 1993). La densità media (N) con cui è presente sul campo varia fra 100 e 600 steli/m² (Bergen et al., 2000; Tyler e Zieman, 1999).

La vegetazione utilizzata nel corso delle prove è un tipo di erba marina sintetica in materiale plastico (polipropilene). Ogni pianta è costituita da numerosi steli divergenti a partire dalla base. La flessibilità della pianta artificiale e la densità del materiale costituente si avvicinano a quelle della *Spartina*. Le piantine artificiali sono state fissate a dei pannelli in PVC dello spessore di 1 cm, preventivamente forati con maglia ortogonale di 4 cm, che costituiscono il fondo. I fori sono del diametro di 3 mm. Tale è infatti il diametro del gambo che tiene uniti gli steli alla base della pianta artificiale. È stato possibile inserire il gambo nei fori e fissare ogni pianta al pannello con la sola pressione.



Figura 9 - *Spartina maritima* (sinistra) e vegetazione artificiale (destra)

Il modello teorico di confronto ingloba le caratteristiche di flessibilità, tipo di materiale, gradi di libertà del movimento della vegetazione, in un unico coefficiente di resistenza, C_D , non essendo semplice modellare singolarmente le caratteristiche fisiche della vegetazione.

I parametri caratteristici del tipo di vegetazione utilizzata, da fissare preventivamente nel modello di confronto, sono l'altezza della piantina (h_p) e l'area della piantina per unità di altezza investita dal moto ondoso. L'altezza h_p è stata misurata pari a 15 cm., La grandezza b , definita come larghezza della pianta per unità di altezza, nella maggior parte delle formulazioni teoriche viene di fatto fatta coincidere con il diametro del gambo della vegetazione, trattandosi nella maggior parte dei casi di vegetazione (flessibile o rigida) con singolo stelo cilindrico. Nel caso in esame, non essendo in presenza di vegetazione cilindrica, si è pensato di fissare come area per unità di altezza il valore del diametro di un singolo stelo della vegetazione erbosa. L'effetto provocato dagli steli addossati l'uno all'altro è stato considerato fissando nel modello, quale coefficiente di densità, il numero di steli per unità di area orizzontale.

La superficie coperta da vegetazione è di 4 m². La densità media (steli/m²) degli steli è stata quantificata dividendo per 4 il numero di steli complessivo presente sulla superficie vegetata. Quest'ultimo dato è stato calcolato moltiplicando il numero di steli di ogni pianta per il numero di piante. Ogni singola pianta artificiale conta un numero di 120 steli il cui diametro è stato stimato di 1.5 mm.

3.2 Apparato sperimentale

Le prove sperimentali sono state effettuate presso il laboratorio di Ingegneria Marittima del Dipartimento IMAGE, Università di Padova, in una canaletta bidimensionale lunga 36 m, larga 1 m, alta 1.3 m (Figura 10). Il tratto di canale interessato dalla presenza del falso fondo e della vegetazione occupa complessivamente 16 m della lunghezza totale. Il campo vegetato occupa 4 m della canaletta sperimentale, preceduti da 8 m di fondo non vegetato, per permettere al moto ondoso di stabilizzarsi prima di incidere sulla vegetazione, e seguiti da altri 4 m, prima dell'assorbitore d'onde, costituito da una scogliera preesistente ricoperta da un apposito materasso assorbente.

Studiare gli effetti della vegetazione limitando al massimo l'influenza di altri fattori (attrito, shoaling, ecc...) ha reso necessario disporre di fondo piano. Il fondale piano è stato composto con pannelli in pvc ($1 \times 1 \text{ m}^2$) accostati. Poiché il fondo presente nella canaletta presenta una pendenza 1:100, si è ricorso ad una struttura di raccordo in alluminio per porvi al di sopra i pannelli in posizione orizzontale.

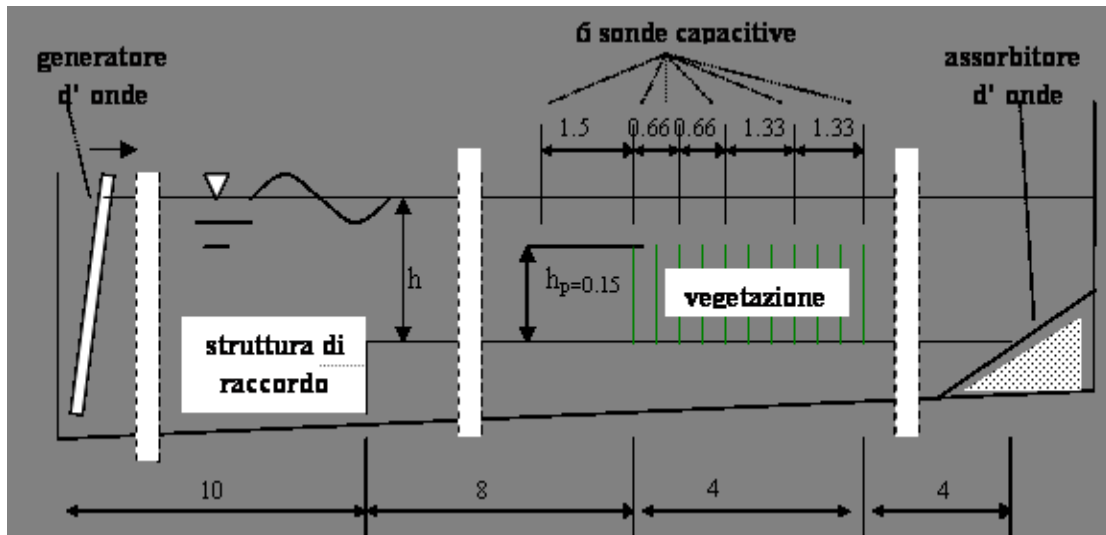


Figura 10 - Schema setup sperimentale

L'inserimento della struttura di raccordo al di sopra del fondo proprio della canaletta ha provocato una discontinuità all'inizio della struttura, nel passaggio dal fondale originale sul quale vengono create le onde, al fondale orizzontale rialzato sul quale è posta la vegetazione. Per superare il problema, in un primo momento si è pensato di inserire una pedana, per accompagnare il moto ondoso in maniera più continua dal fondale originale della canaletta al fondo rialzato vegetato; si è notato tuttavia, che la presenza della pedana creava un effetto di riflessione non trascurabile sull'onda incidente. Al contrario, gli 8 m di fondo orizzontale non vegetato, disposti tra l'inizio della struttura di raccordo del fondale e l'inizio della zona occupata dalla vegetazione sono sufficienti per permettere al moto ondoso di stabilizzarsi prima di incidere sulle piante artificiali. Si è dunque deciso di togliere la pedana e lasciare la struttura di raccordo così com'è.

Le misurazioni sono state effettuate utilizzando 6 sonde capacitive posizionate lungo tutto lo strato erboso, ad una distanza dall'inizio dello strato erboso rispettivamente di 0.66 m, 1.32 m, 2.66 m, e 4 m. La prima sonda è stata posta a 1.5 m dall'inizio del campo vegetato, per permettere una misurazione dell'onda indisturbata.

3.3 Descrizione delle prove effettuate

L'attività sperimentale è consistita in registrazioni della durata di 20 minuti in condizioni di moto ondoso regolare, prodotto dal generatore *HR Wallingford*.

Il modello installato riproduce condizioni idrodinamiche tipiche di una zona di barena nella laguna di Venezia in scala 1:2. I parametri caratteristici del moto nella scala del modello si ottengono, quindi, in base al valore della scala geometrica:

$$H_{0\text{ modello}} = \frac{H_{0\text{ modello}}}{2} \quad (0)$$

$$h_{\text{modello}} = \frac{h_{\text{prototipo}}}{2} \quad (0)$$

$$T_{\text{modello}} = \frac{T_{\text{prototipo}}}{\sqrt{2}} \quad (0)$$

Per quanto riguarda la scala temporale è noto che in similitudine di Froude, fissata la scala geometrica di un modello λ , il valore scala della grandezza tempo varia con $\lambda^{1/2}$.

Al fine di riprodurre condizioni tipiche delle zone barenali, sono state effettuate prove fissando 5 diversi valori del tirante d'acqua rispetto al fondo in pvc, in modo da indagare sia i casi in cui la vegetazione è sommersa, sia in casi in cui la vegetazione è parzialmente emersa. I cinque livelli di studio sono: 10, 15, 20, 25, 30 cm dal fondo. La vegetazione artificiale presenta un'altezza di 15 cm, ossia 30 cm nel prototipo.

Sono state eseguite due serie di prove. Nella prima è stato indagato il comportamento di quattro diverse densità di vegetazione, le cui configurazioni sono schematizzate in Figura 11.

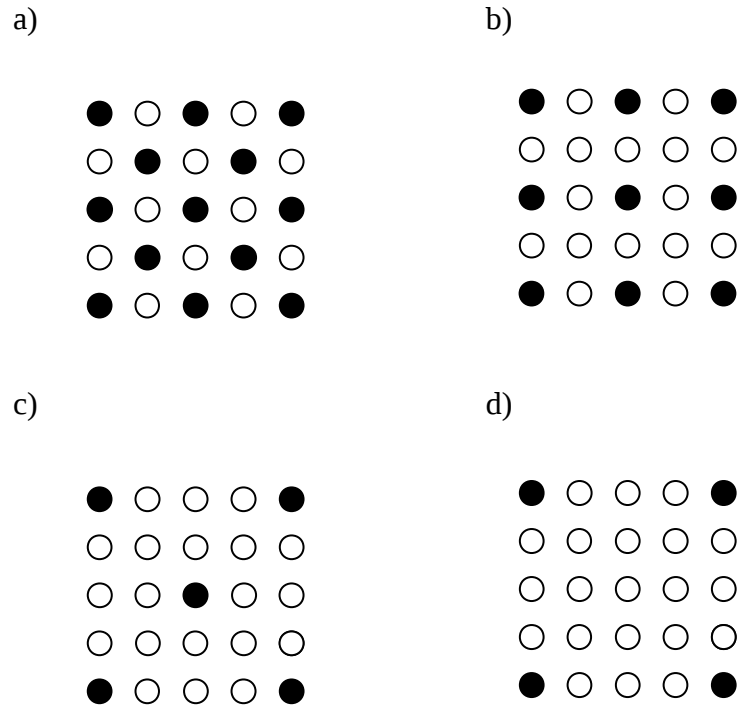


Figura 11 - Schema delle configurazioni della vegetazione nella prima serie di prove. a) $N=312.5$ piante/m²; b) $N=156.25$ piante/m²; c) $N=84.5$ piante/m²; d) $N=43.75$ piante/m².

Per ogni prova il periodo dell'onda è stato fissato a partire dal valore caratteristico misurato nelle barene, dell'ordine dei 2 s. In realtà è stato considerato un valore del periodo nel prototipo T variabile dai 2 s ad 1 s, per poter realizzare onde il più regolari possibile in laboratorio: si è riscontrato, infatti, soprattutto per i valori più bassi del tirante, che un periodo di 2 s non permetteva in molti casi lo svilupparsi di onde regolari con forma vicina a quella sinusoidale.

La lunghezza d'onda è stata determinata dalla relazione di dispersione, che mette in relazione il numero d'onda k ($k=2\pi/L$) col tirante h e col periodo T :

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{gk \tanh(kh)} \quad (0)$$

Questa prima serie di prove ha avuto principalmente lo scopo di studiare l'effetto della densità di vegetazione sull'attenuazione del moto ondoso, senza analizzare nel dettaglio l'influenza degli altri parametri caratteristici. Per ogni prova, fissato il valore del tirante h e la densità di vegetazione N , i parametri altezza significativa incidente H_0 , periodo T , ripidità dell'onda H_0/L sono stati fatti variare liberamente. In Tabella 2 è presentato uno schema delle caratteristiche delle onde generate per ogni densità di vegetazione ($h, T, f, H_0, L, H_0/L$).

onda	h (cm)	T (s)	f	H_0 (cm)	L (m)	H_0/L
regAA1	10	1.07	0.93	0.7	1	0.01
regAA2	10	1.07	0.93	1.7	1	0.02
regAA3b	10	0.7	1.43	3.1	0.6	0.05
regAA4	10	0.7	1.43	4.3	0.6	0.07
regBB1	15	1.42	0.70	1.3	1.6	0.01
regBB2a	15	1.07	0.93	2.1	1.2	0.02
regBB3b	15	0.85	1.18	3	0.9	0.03
regBB4	15	0.85	1.18	4.2	0.9	0.05
regBB5	15	0.85	1.18	4.6	0.9	0.05
regBB5b	15	0.85	1.18	5.5	0.9	0.06
regC1	20	1.42	0.70	2.2	1.9	0.01
regC2	20	1.06	0.94	2.5	1.3	0.02
regC3	20	1.06	0.94	3.3	1.3	0.03
regC4	20	1.06	0.94	3.9	1.3	0.03
regC5	20	1.06	0.94	4.7	1.3	0.04
regC7	20	0.85	1.18	6.4	1	0.06
regC8	20	0.85	1.18	7.1	1	0.07
regC10a	20	0.85	1.18	7.8	1	0.08
regC10b	20	0.92	1.09	7.9	1.1	0.07
regD2	25	1.07	0.93	2.1	1.4	0.02
regD3	25	1.28	0.78	3	1.8	0.02
regD4	25	1.07	0.93	3.5	1.4	0.03
regD5	25	1.07	0.93	4.3	1.4	0.03
regD6	25	1.07	0.93	5.3	1.4	0.04
regD8	25	0.85	1.18	6.5	1	0.07
regD9	25	0.85	1.18	7.5	1	0.08
regD11	25	0.91	1.10	7.8	1.2	0.07
regD12	25	0.91	1.10	8.9	1.2	0.07
regD13	25	0.98	1.02	11.2	1.3	0.09
regE1	30	1.42	0.70	3.6	2.2	0.02
regE2	30	1.41	0.71	4.8	2.2	0.02
regE3	30	1.41	0.71	6.1	2.2	0.03
regE4	30	1.27	0.79	6.6	1.9	0.03
regE5	30	1.27	0.79	7.6	1.9	0.04
regE6	30	1.06	0.94	8.1	1.5	0.05
regE7	30	1.06	0.94	9	1.5	0.06
regE8	30	0.99	1.01	11.1	1.4	0.08
regE9	30	0.99	1.01	11.8	1.4	0.08
regE10	30	1.06	0.94	13.4	1.5	0.09

Tabella 2 – Caratteristiche delle onde generate nella prima serie di prove

Come altezza significativa incidente viene considerato il valor medio fra le altezze significative misurate per tutte le diverse densità di vegetazione, ad una distanza di 1.5 m prima del fondo vegetato, considerata come altezza d'onda indisturbata. Infatti il generatore d'onde non è dotato di un sistema di feedback che permetta di fissare in modo univoco l'altezza d'onda. Perciò le prove relative ad una medesima onda effettuate con densità diverse presentano valori di altezza d'onda incidente diversi. Questo non compromette comunque lo studio sperimentale, poiché l'analisi è incentrata sulla differenza tra l'altezza d'onda a monte e quella a valle della vegetazione per ogni prova eseguita.

La seconda serie di prove, invece, è stata finalizzata a determinare l'influenza dei parametri caratteristici delle onde nell'attenuazione del moto ondoso. Per effettuare quest'analisi di sensibilità, si è ritenuto opportuno limitare lo studio alle due densità di vegetazione maggiori, che però, a differenza del caso precedente, presentano entrambe una configurazione sfalsata (Figura 12) e si sono fatti variare i valori del periodo e dell'altezza d'onda significativa incidente secondo dei criteri ben precisi.

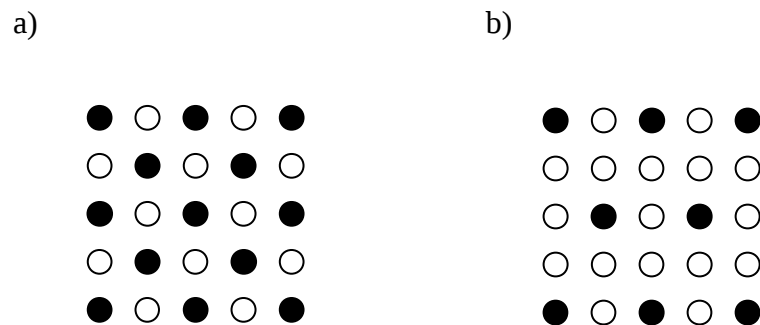


Figura 12 - Schema delle configurazioni della vegetazione nella seconda serie di prove. a) $N=312.5$ piante/m²; b) $N=156.25$ piante/m²; c) $N=84.5$ piante/m²; d) $N=162.5$ piante/m².

Per ogni densità di vegetazione e per ogni tirante, sono stati fissati solo tre valori del periodo (0.8, 1 e 1.2 secondi), mentre l'altezza d'onda significativa incidente è stata determinata fissando tre valori ideali del rapporto fra l'altezza d'onda incidente e la lunghezza d'onda, ovvero della ripidità dell'onda H_0/L , pari a 0.03, 0.05 e 0.08: i primi due caratteristici di onde lunghe, come le tipiche onde di marea che si trovano in barena, l'ultimo caratteristico di onde intermedie, come quelle prodotte da natanti.

Si ricorda infatti che valgono le seguenti relazioni fra altezza e lunghezza d'onda:

$$\frac{H}{L} < \frac{1}{20} \quad \text{per onde lunghe} \quad (0)$$

$$\frac{1}{20} \leq \frac{H}{L} \leq \frac{1}{2} \quad \text{per onde intermedie} \quad (0)$$

$$\frac{H}{L} > \frac{1}{2} \quad \text{per onde corte} \quad (0)$$

In questo modo è stato possibile effettuare un confronto fra le diverse prove, variando un solo parametro alla volta, e mantenendo tutti gli altri costanti. Naturalmente in laboratorio non è sempre stato possibile ottenere altezze d'onda corrispondenti esattamente ai valori ideali di ripidità: in alcuni casi, specialmente per le onde con altezza d'onda maggiore, il valore di ripidità ottenuto sperimentalmente è molto più basso del valore ideale, e in altri non è stato possibile generare onde che si avvicinassero al valore di ripidità di 0.08.

In Tabella 3 sono riassunte le caratteristiche delle onde generate per ogni densità di vegetazione nella seconda serie di prove. Infine in Figura 13 vengono mostrate alcune immagini delle fasi sperimentali.

INDAGINI SPERIMENTALI SUGLI EFFETTI DISSIPATIVI DEL MOTO ONDOSO

onda	h (cm)	T (s)	f	H ₀ (cm)	L (m)	H ₀ /L ideale	H ₀ /L sper
reg10a	10	1.0	1.00	2.73	1.00	0.03	0.027
reg10b	10	1.0	1.00	5.91	1.00	0.05	0.059
reg10c5	10	1.0	1.00	6.19	1.00	0.08	0.062
reg10d1	10	0.8	1.25	2.03	0.76	0.03	0.027
reg10e2	10	0.8	1.25	3.50	0.76	0.05	0.046
reg10f3	10	0.8	1.25	4.29	0.76	0.08	0.056
reg10g	10	1.2	0.83	3.89	1.23	0.03	0.032
reg10h3	10	1.2	0.83	3.34	1.23	0.05	0.027
reg15a	15	1.0	1.00	3.24	1.09	0.03	0.030
reg15b	15	1.0	1.00	5.70	1.09	0.05	0.052
reg15c4	15	1.0	1.00	5.96	1.09	0.08	0.055
reg15d	15	0.8	1.25	2.15	0.82	0.03	0.026
reg15e	15	0.8	1.25	4.25	0.82	0.05	0.052
reg15f6	15	0.8	1.25	5.37	0.82	0.08	0.065
reg15g	15	1.2	0.83	4.10	1.35	0.03	0.030
reg15h5	15	1.2	0.83	5.32	1.35	0.05	0.039
reg20a	20	1.0	1.00	3.29	1.21	0.03	0.027
reg20b	20	1.0	1.00	5.72	1.21	0.05	0.047
reg20c	20	1.0	1.00	8.40	1.21	0.08	0.069
reg20d	20	0.8	1.25	2.47	0.89	0.03	0.028
reg20e	20	0.8	1.25	4.28	0.89	0.05	0.048
reg20f	20	0.8	1.25	6.51	0.89	0.08	0.073
reg20g	20	1.2	0.83	4.53	1.52	0.03	0.030
reg20h	20	1.2	0.83	7.90	1.52	0.05	0.052
reg25a	25	1.0	1.00	3.69	1.30	0.03	0.028
reg25b	25	1.0	1.00	6.34	1.30	0.05	0.049
reg25c	25	1.0	1.00	9.78	1.30	0.08	0.075
reg25d	25	0.8	1.25	2.88	0.93	0.03	0.031
reg25e	25	0.8	1.25	4.77	0.93	0.05	0.051
reg25f	25	0.8	1.25	7.25	0.93	0.08	0.078
reg25g	25	1.2	0.83	4.79	1.66	0.03	0.029
reg25h2	25	1.2	0.83	8.91	1.66	0.05	0.054
reg25i1	25	1.2	0.83	11.41	1.66	0.08	0.069
reg30a	30	1.0	1.00	4.12	1.37	0.03	0.030
reg30b	30	1.0	1.00	6.95	1.37	0.05	0.051
reg30c	30	1.0	1.00	10.97	1.37	0.08	0.080
reg30d	30	0.8	1.25	3.02	0.96	0.03	0.031
reg30e2	30	0.8	1.25	4.85	0.96	0.05	0.051
reg30f	30	0.8	1.25	7.56	0.96	0.08	0.079
reg30g1	30	1.2	0.83	5.27	1.77	0.03	0.030
reg30h1	30	1.2	0.83	8.50	1.77	0.05	0.048

Tabella 3 – Caratteristiche delle onde generate nella seconda serie di prove

INDAGINI SPERIMENTALI SUGLI EFFETTI DISSIPATIVI DEL MOTO ONDOSO

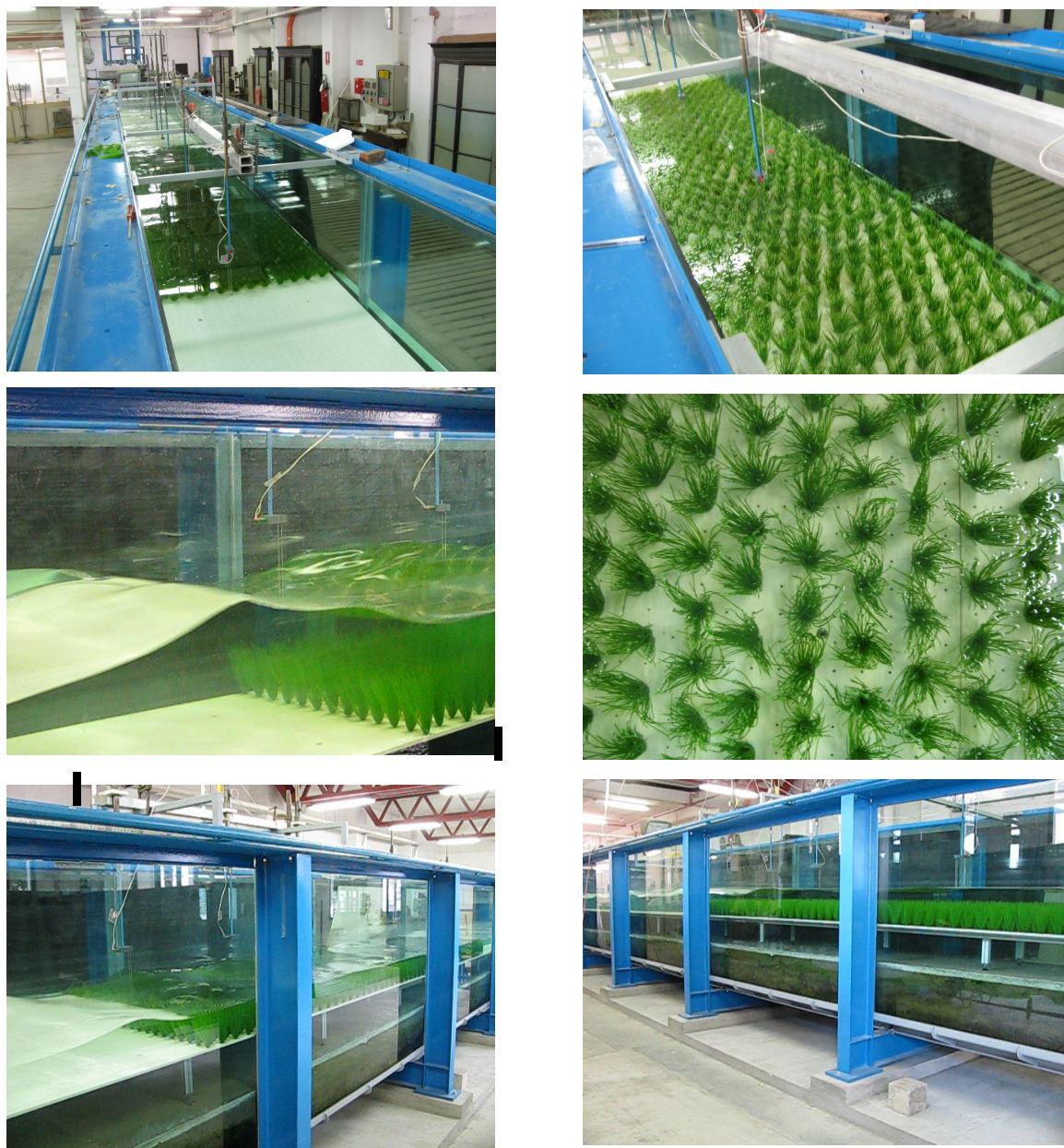


Figura 13 - Alcune fasi dell' attività sperimentale

3.4 Output strumentazione di misura

Le sonde capacitive sono collegate ad un rack di acquisizione e quindi ad un computer. Le misurazioni delle sonde sono costituite da registrazioni di differenze di capacità determinate dalla chiusura del circuito di condensatori (due condensatori paralleli) da parte del liquido. L'output delle sonde restituisce una registrazione delle altezze d'onda con frequenza assegnata, nel presente studio fissata a 20 Hz. Questo segnale è poi elaborato tramite il software HR wavedata che, oltre a permettere di visualizzare le registrazioni, traduce in altezze d'onda le differenze di capacità misurate. Sul segnale è effettuata sia un'analisi statistica, sia un'analisi spettrale.

L'analisi statistica è effettuata applicando il metodo Zero Crossing che utilizza le registrazioni nel dominio dei tempi. Vengono registrate come onde quelle dettate dal passaggio del segnale attraverso il livello zero, coincidente nello specifico con il livello di riposo della superficie libera. Il metodo dello Zero Crossing si dice Zero Up Crossing o Zero Down Crossing a seconda dei casi: se si individua un'onda tramite l'attraversamenti dello zero rispettivamente verso valori positivi o verso valori negativi dell'elevazione di superficie. Semplificato in questo modo il segnale, vengono calcolati diversi parametri statistici che permettono di esprimere in modo sintetico le caratteristiche del modo ondoso. I parametri statistici più rilevanti forniti dal software sono in particolare: N_{onde} , T_m , H_{max} , H_3 (media di 1/3 delle onde più alte), $H_{1/10}$ (media di 1/10 delle onde più alte), H_m , H_{ms} (H energeticamente equivalente), valore medio, massimo e minimo dei dati registrati (capacità registrata in volts).

L'analisi spettrale trasforma il segnale, registrato nel dominio dei tempi, in segnale nel dominio delle frequenze. Il risultato è la visualizzazione di uno spettro d'energia in funzione della frequenza. L'algoritmo usato per calcolare lo spettro è la FFT (fast Fourier transform). I parametri restituiti dall'analisi spettrale sono in particolare: T_p (periodo di picco), f_p (frequenza di picco), H_{m0} (altezza significativa spettrale= $4\sqrt{m_0}$), m_0 , m_1 , m_2 , m_4 (momenti di ordine indicato al pedice), E (densità di energia).

4 Risultati

4.1 Analisi di sensibilità dei parametri

E' stata effettuata un'analisi di sensibilità al fine di determinare l'influenza di ogni singolo parametro caratteristico dell'onda e della vegetazione sullo smorzamento del moto ondoso.

Lo smorzamento del moto ondoso è stato espresso in termini di riduzione percentuale dell'altezza d'onda significativa nei 4 m di vegetazione:

$$\Delta H(\%) = (1 - H_{4m} / H_0) \cdot 100 \quad (0)$$

dove H_{4m} è l'altezza d'onda significativa alla coordinata $x=4$ m (al termine del fondo vegetato), e H_0 è l'altezza d'onda significativa incidente sulla vegetazione, alla coordinata $x=0$. Si sarebbe potuto calcolare lo smorzamento di energia d'onda per unità di lunghezza, ma dato che esso non è costante lungo i 4 m, si è ritenuto più opportuno far riferimento allo smorzamento totale nei 4 m di vegetazione.

Lo smorzamento si può anche definire in termini di riduzione percentuale di energia d'onda a nei 4 m di vegetazione:

$$\Delta E(\%) = (1 - E_{4m} / E_0) \cdot 100 \quad (0)$$

Nelle ipotesi assunte l'energia d'onda è proporzionale ad H^2 , conseguentemente dall'espressione della dissipazione di energia si può dedurre che $\Delta E(\%)$ risulterà maggiore rispetto a $\Delta H(\%)$ per una certa onda.

Per effettuare l'analisi di sensibilità, come spiegato nel paragrafo 3.3, sono considerati i risultati relativi unicamente alla seconda serie di prove. Vengono messi in relazione i valori di attenuazione dell'altezza d'onda relativi a prove diverse, in cui il parametro oggetto di studio viene fatto variare, mentre gli altri vengono mantenuti costanti. I parametri considerati sono: il tirante d'acqua (h), caratteristiche della vegetazione (densità N), e caratteristiche dell'onda (altezza H_0 , periodo T , ripidità H_0/L).

4.1.1 Influenza del tirante

Una variazione del tirante, e quindi dell'altezza relativa della vegetazione influisce sulla quantità di smorzamento del moto ondoso. In Figura 14 viene riportato il confronto fra i valori di attenuazione percentuale dell'altezza d'onda, in funzione del tirante, per diverse densità di vegetazione. Fissato il tirante, ogni punto rappresenta il valore medio di tutte le onde generate con quel dato tirante. Il grafico visualizza un andamento decrescente all'aumento della profondità, per ogni densità di vegetazione, compreso il caso senza vegetazione. Questo trova riscontro nell'analisi qualitativa del fenomeno. Lo strato che contribuisce allo smorzamento del moto ondoso è quello che comprende la vegetazione. Un valore maggiore del tirante comporta una diminuzione del rapporto tra strato che contribuisce allo smorzamento e strato liquido totale. Dall'idrodinamica è noto che l'energia dell'onda si ottiene integrando l'energia di una particella sulla distanza verticale che va dal fondo alla superficie libera. Di conseguenza è plausibile che l'attenuazione diminuisca all'aumentare del tirante.

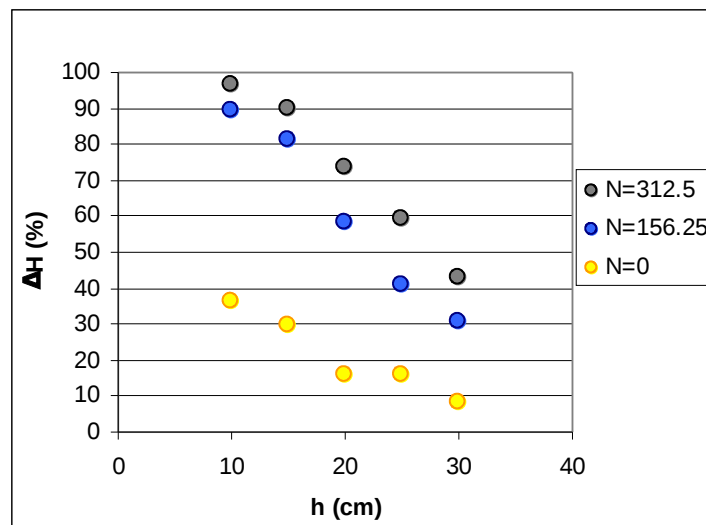


Figura 14 - Influenza del tirante, h , sulla dissipazione totale dell'altezza d'onda, ΔH (%).

Per visualizzare meglio la diminuzione di altezza d'onda significativa, è stato considerato il coefficiente di trasmissione K_t , definito come rapporto fra l'altezza significativa dell'onda trasmessa e l'altezza significativa dell'onda incidente (H/H_0), in funzione dell'altezza relativa della vegetazione h_p/h . In Figura 15 viene mostrata tale

RISULTATI

relazione per tutte le prove eseguite, mentre in Figura 16 sono riportati i valori medi del K_t , fissato il tirante.

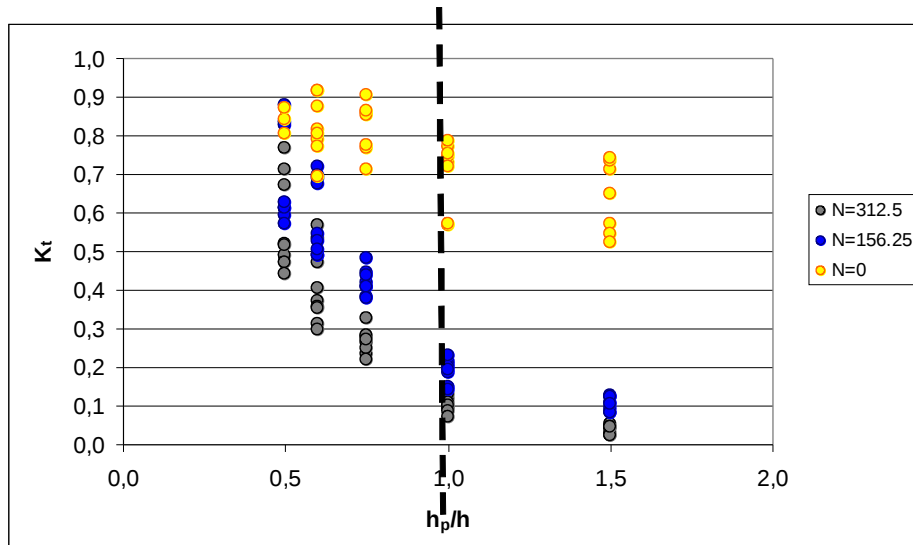


Figura 15 - Coefficiente di trasmissione, K_t , in funzione del tirante

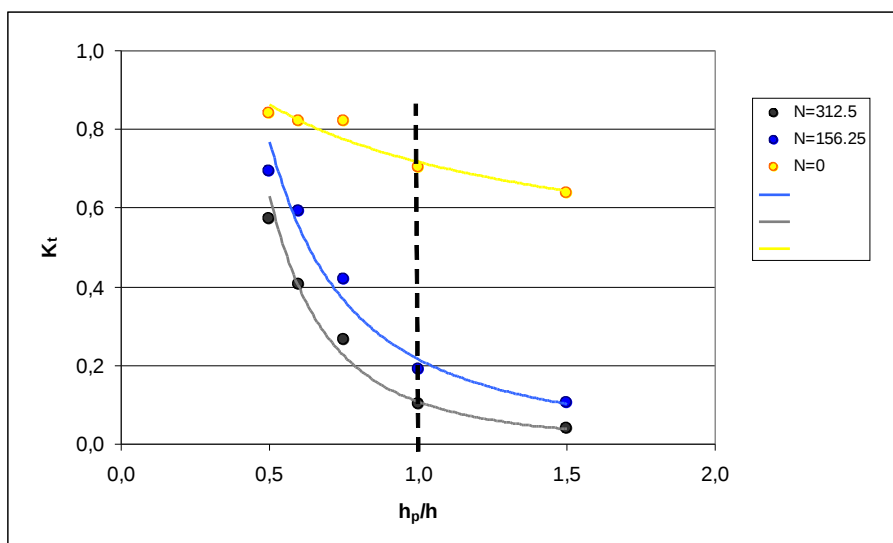


Figura 16 - Relazione fra il coefficiente di trasmissione, K_t , e il tirante

Come si può vedere dai grafici, si ha un brusco aumento della diminuzione del coefficiente K_t nel caso di vegetazione completamente sommersa: una diminuzione del tirante (cioè un avvicinamento del livello dell'acqua alla sommità della vegetazione) aumenta l'influenza della vegetazione sulle onde, provocando una diminuzione non lineare dell'altezza significativa, che è ben approssimata da una legge di potenza.

Quando il livello dell'acqua raggiunge la vegetazione e si verifica la situazione di vegetazione emersa, tale diminuzione si attenua progressivamente.

4.1.2 Influenza delle caratteristiche dell'onda

4.1.2.1 Influenza dell'altezza d'onda iniziale

L'altezza d'onda iniziale ha una certa importanza nel fenomeno di attenuazione dell'onda. Un'onda con una grande altezza d'onda contiene più energia ed è più influenzata dalla vegetazione rispetto ad un'onda con un'altezza d'onda inferiore come risulta dalla struttura dell'equazione (0). In Figura 17 vengono mostrati i valori di attenuazione dell'altezza d'onda significativa nei 4 m di fondo vegetato, al variare dell'altezza d'onda iniziale, mantenendo costanti tutti gli altri parametri (h , T , N). A titolo rappresentativo viene riportato il risultato per $N=312.5$ piante/m², confrontando tre onde caratterizzate da un periodo di 1 s, un tirante di 30 cm, e diversi valori dell'altezza d'onda iniziale, fermo restando che negli altri casi, con diverse densità di vegetazione e onde caratterizzate da tiranti e periodi diversi il risultato sostanzialmente non cambia. Come ci si aspettava, un'onda incidente più alta viene influenzata in misura maggiore rispetto ad un'onda più bassa, dalla presenza della vegetazione, che esercita una maggiore azione di attenuazione.

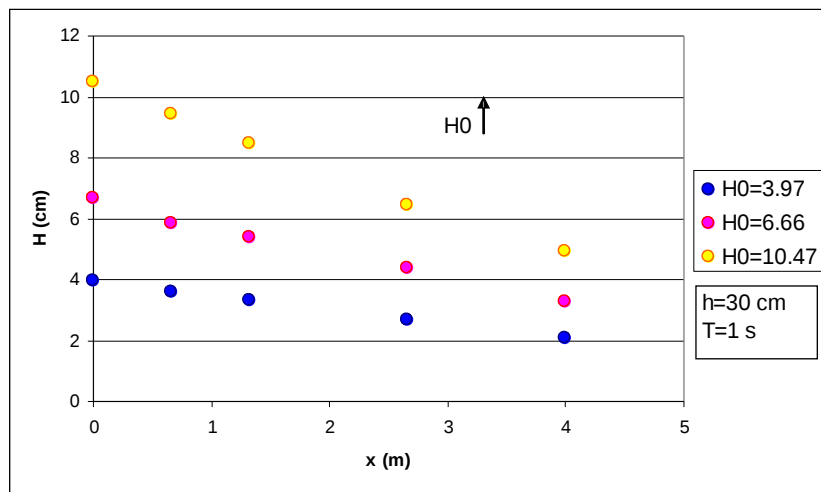


Figura 17 - Attenuazione dell'altezza d'onda significativa H , lungo lo strato vegetato, al variare dell'altezza d'onda significativa iniziale, per $N=312.5$ piante/m²

RISULTATI

In Figura 18 sono riportati i risultati in termini di riduzione percentuale dell'altezza d'onda significativa in funzione dell'altezza d'onda significativa iniziale, per alcune prove eseguite nel caso $N=312.5$ piante/m². Ad ogni colore corrisponde una serie di onde in cui sono stati mantenuti costanti i valori del tirante e del periodo, e si è fatta variare l'altezza d'onda iniziale. Si riscontra una chiara tendenza all'aumento della dissipazione al crescere dell'altezza d'onda, che può essere osservato per tutti i livelli. Naturalmente, all'aumentare del tirante, la dissipazione diminuisce.

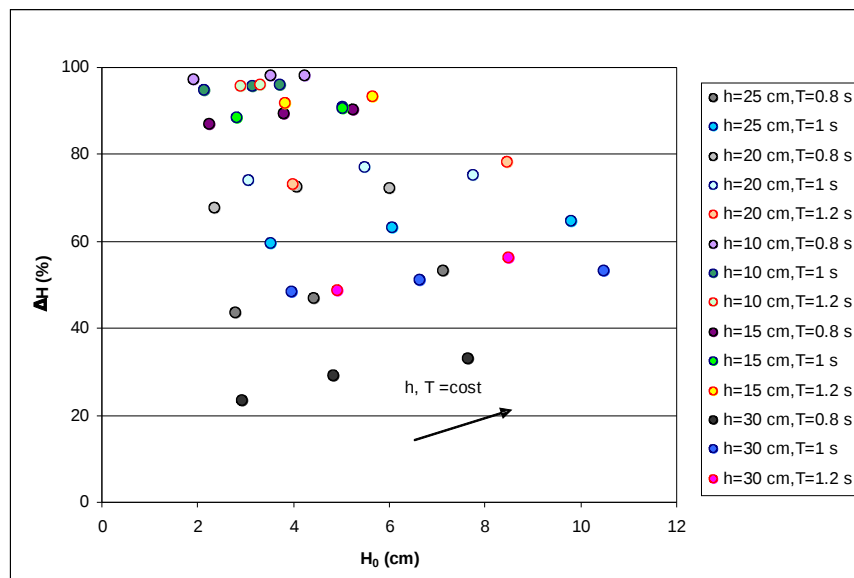


Figura 18 - Influenza dell'altezza d'onda iniziale H_0 sulla diminuzione percentuale dell'altezza d'onda significativa H , per $N=312.5$ piante/m²

Per completezza sono stati considerati anche i risultati relativi alla prima serie di prove, per vedere se, considerando densità di vegetazione diverse, cambia l'effetto dell'altezza d'onda iniziale sull'attenuazione del moto ondoso. In Figura 19 sono riassunti in un unico grafico i confronti relativi a quattro serie distinte di onde: in ognuna vengono mantenuti costanti i parametri h , T , mentre viene fatto variare H_0 .

Si può notare che mentre per le densità di vegetazione maggiori (312.5 e 156.25 piante/m²) valgono le considerazioni fatte in precedenza, e cioè si osserva una chiara tendenza all'aumento della dissipazione al crescere dell'altezza d'onda, non si può affermare altrettanto per le altre densità. Con 84.5 piante/m² la tendenza diventa sempre meno marcata, all'aumentare del tirante, fino a presentare un comportamento opposto, di

RISULTATI

diminuzione del $\Delta H\%$ all'aumentare di H_0 , con un tirante di 30 cm. Le prove con densità di vegetazione minore, 43.75 piante/m² si distaccano in modo ancor più netto dalla tendenza individuata per le densità maggiori: in alcuni casi si mantengono sugli stessi valori, oppure diminuiscono decisamente all'aumentare dell'altezza d'onda incidente.

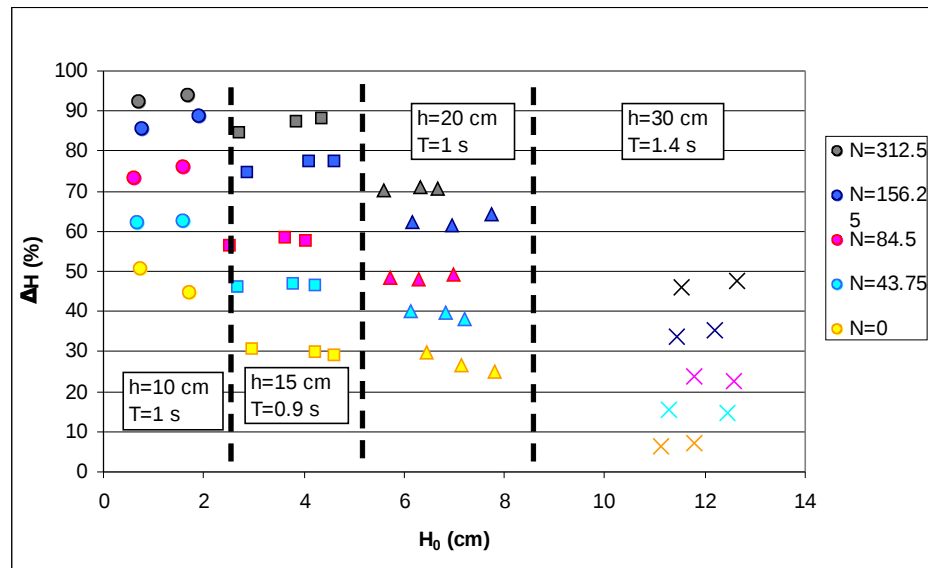


Figura 19 - Influenza dell'altezza d'onda iniziale H_0 sulla diminuzione percentuale dell'altezza d'onda significativa H : confronto per diverse densità di vegetazione

I risultati ottenuti indicano che l'attenuazione del moto ondoso aumenta al crescere dell'altezza d'onda per densità di vegetazione alte, mentre non può essere definito un altrettanto chiaro andamento della dissipazione per densità di vegetazione minori.

Si vedrà più avanti come questo comportamento possa essere in parte spiegato andando a considerare anche l'effetto dell'attrito del fondo, oltre alla presenza della vegetazione.

4.1.2.2 Influenza del rapporto H_0/L

Oltre a considerare il parametro H_0 , si è ritenuto opportuno considerare il rapporto H_0/L , fra l'altezza d'onda significativa incidente e la lunghezza d'onda, ovvero la ripidità dell'onda. In Figura 20 viene illustrata la dissipazione dell'altezza d'onda significativa H in funzione della ripidità dell'onda. Analogamente al caso precedente, viene riportato il risultato per $N=312.5$ piante/m², confrontando tre onde caratterizzate dallo stesso periodo, pari a 1 s, lo stesso tirante, pari a 25 cm, e diverse ripidità.

RISULTATI

Si può notare una dipendenza della dissipazione dalla ripidità dell'onda analoga a quella verificata nel caso dell'altezza d'onda, e cioè un aumento della dissipazione all'aumentare del rapporto H_0/L .

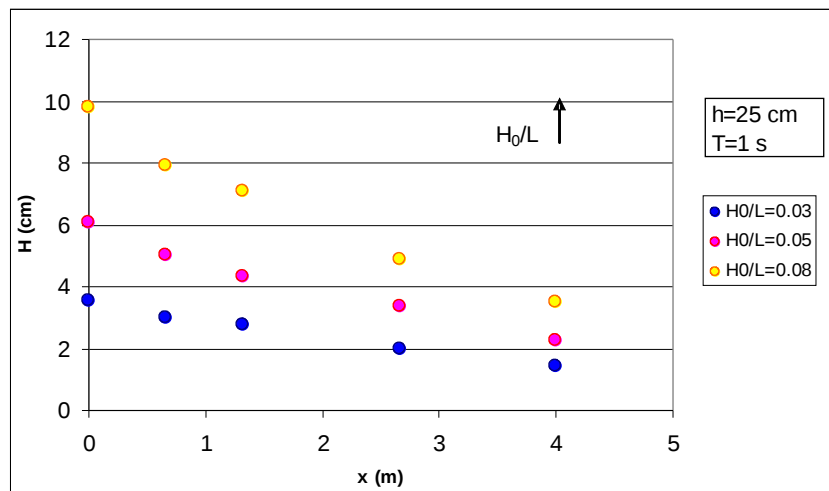


Figura 20 - Attenuazione dell'altezza d'onda lungo lo strato vegetato al variare della ripidità dell'onda, per $N=312.5$ piante/m²

In Figura 21 sono riportati i risultati in termini di riduzione percentuale dell'altezza d'onda significativa in funzione della ripidità dell'onda, per alcune prove eseguite nel caso $N=312.5$ piante/m². Ad ogni colore corrisponde una serie di onde, caratterizzate da identici valori del tirante e del periodo, e diversa ripidità.

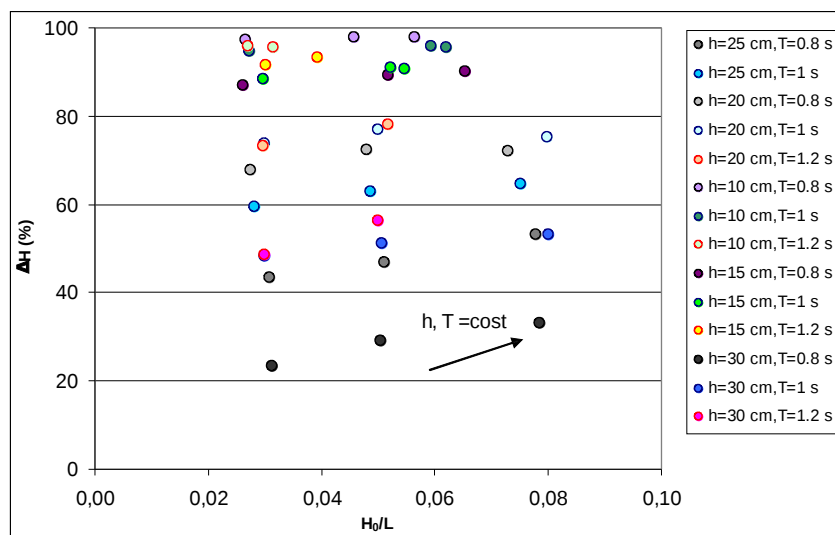


Figura 21 - Influenza della ripidità dell'onda, H_0/L , sulla diminuzione percentuale dell'altezza d'onda significativa H , per $N=312.5$ piante/m²

Dall'analisi del grafico, la tendenza all'aumento della dissipazione al crescere della ripidità dell'onda risulta più marcata finché si resta nell'intervallo delle onde lunghe ($H_0/L < 0.05$), mentre va attenuandosi per valori di tale rapporto compresi nell'intervallo delle onde intermedie ($0.05 < H_0/L < 0.5$).

4.1.2.3 *Influenza del periodo dell'onda*

Quando si considera uno spettro d'onda, onde diverse con frequenza diverse sono dissipate in modi diversi. Uno spettro che si sviluppa in un intervallo di frequenze più basse dissipa più energia di uno spettro che interessa un intervallo di frequenze più alte. Infatti uno spettro d'onda con un periodo di picco più alto contiene più energia: dal momento che l'energia dell'onda è proporzionale ad H^2 , in tale intervallo di energia sono presenti le onde con altezza maggiore, che vengono dissipate maggiormente dalla vegetazione. Questo comportamento è mostrato in Figura 22, dove sono confrontati i valori di attenuazione di altezza d'onda, nel caso $N=312.5$ piante/m², di tre onde caratterizzate da un tirante di 25 cm, una ripidità di 0.08, e diversi valori del periodo (Nel caso di onde regolari monocromatiche, il periodo di picco coincide con il periodo semplice).

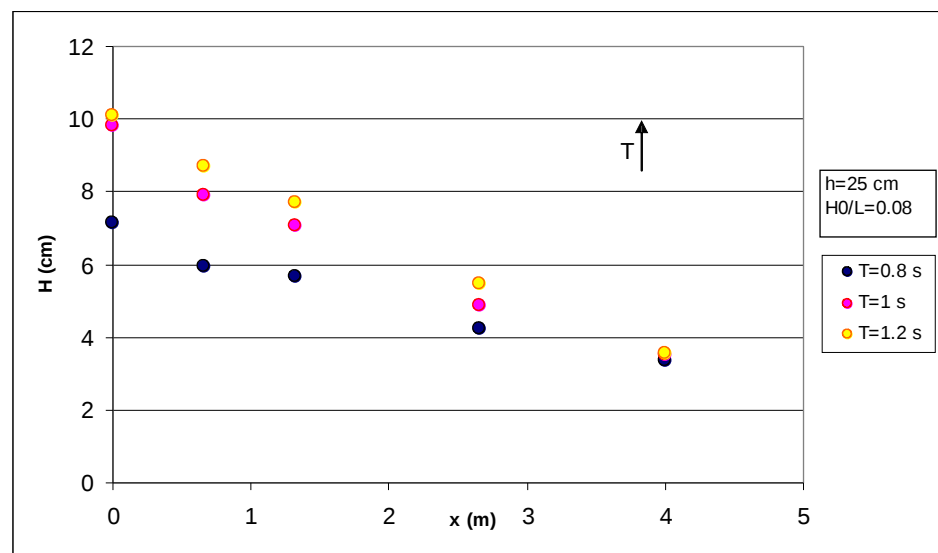


Figura 22 - Attenuazione dell'altezza d'onda lungo lo strato vegetato al variare del periodo T , per $N=312.5$ piante/m²

RISULTATI

In Figura 23 sono riportati i risultati in termini di riduzione percentuale dell'altezza d'onda significativa in funzione del periodo dell'onda, per alcune prove eseguite nel caso $N=312.5$ piante/m². Ad ogni colore corrisponde una serie di onde, caratterizzate da identici valori del tirante e della ripidità, e diversi valori del periodo.

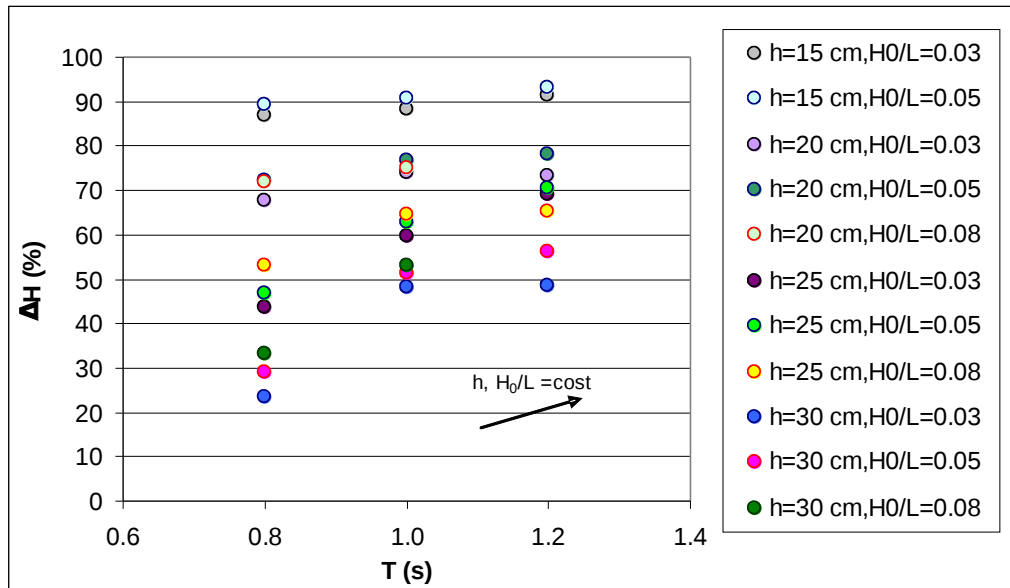


Figura 23 - Influenza del periodo dell'onda T sulla diminuzione percentuale dell'altezza d'onda significativa H , per $N=312.5$ piante/m²

4.1.3 Influenza delle caratteristiche della vegetazione

Una variazione nelle caratteristiche della vegetazione produce un effetto nella trasmissione dell'onda attraverso un campo vegetato, com'è stato spiegato nel capitolo 2.4. In particolare la configurazione degli steli, la distanza relativa e il diametro degli steli influenzano il campo di moto attorno agli steli e di conseguenza la quantità di energia dissipata. Nella formulazione della dissipazione di energia di Dalrymple (0) i coefficienti che esprimono le caratteristiche della vegetazione C_D , N e b sono moltiplicati linearmente, da cui risulta che una variazione in uno di questi tre parametri influenza il modello in ugual misura. E' quindi sufficiente determinare la reazione del modello alla variazione di uno solo dei parametri, dal momento che il modello reagisce in maniera analoga alla variazione di un'altra caratteristica della pianta.

RISULTATI

In questo studio il parametro che è stato fatto variare è la densità della vegetazione N . In Figura 24 è illustrata l'attenuazione dell'altezza d'onda, al variare della densità di vegetazione. Nel grafico vengono confrontati i valori di attenuazione relativi alla stessa onda, caratterizzata da un periodo di 1 s, un tirante di 25 cm, e un'altezza d'onda iniziale di 10 cm, per le due densità di vegetazione $N=312.5$ e $N=156.25$ piante/m². Viene riportato anche il caso senza vegetazione.

All'aumentare della densità, si può notare una rapida diminuzione dell'altezza d'onda nella prima parte dello strato vegetato, mentre ad una certa distanza l'altezza d'onda presenta un'altezza inferiore e la vegetazione ha minor effetto su di essa, come prevede la soluzione (0).

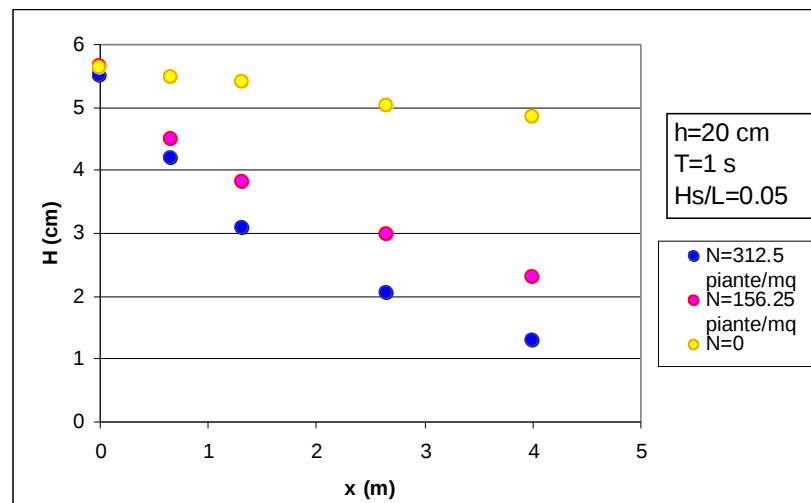


Figura 24 - Attenuazione dell'altezza d'onda, al variare della densità di vegetazione.

In Figura 25 sono presentati i valori di attenuazione percentuale dell'altezza d'onda, al variare della densità di vegetazione. A differenza dello studio degli altri parametri, qui vengono riportati i valori medi di tutte le onde generate nelle due serie di prove, fissato il tirante. A rigore il confronto dovrebbe essere effettuato solo fra onde con identici h , H_0/L , T , tuttavia si è preferito considerare tutte le prove ai fini di indagare l'effetto della densità di vegetazione sull'attenuazione del moto ondoso. Si è riscontrato, infatti, da un confronto fra i dati relativi ai casi di densità maggiore e al caso senza vegetazione nelle due serie di prove, che una variazione nei parametri h , H_0/L , T nelle due serie di prove non produce un effetto così determinante sui risultati, che restano pressoché invariati o si discostano di poco l'uno dall'altro nelle due serie di prove,

RISULTATI

per cui si può considerare trascurabile l'influenza di tali parametri nello studio dell'effetto della densità di vegetazione sull'attenuazione del moto ondoso.

In Figura 25 sono presentati i valori di attenuazione percentuale dell'altezza d'onda, al variare della densità di vegetazione. In Figura 26 i risultati sono stati mediati su ogni tirante. Si può notare che l'andamento dell'attenuazione percentuale dell'altezza d'onda in funzione di N è ben approssimato da una curva per la quale il valore di $\Delta H\%$ inizialmente, per densità di vegetazioni basse, aumenta più velocemente, per poi aumentare sempre meno.

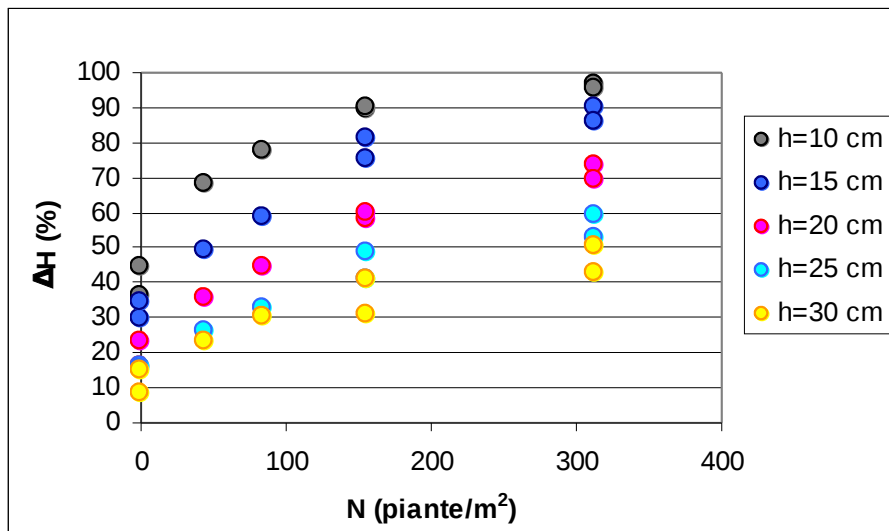


Figura 25 - Influenza della densità di vegetazione N sulla dissipazione dell'altezza d'onda H

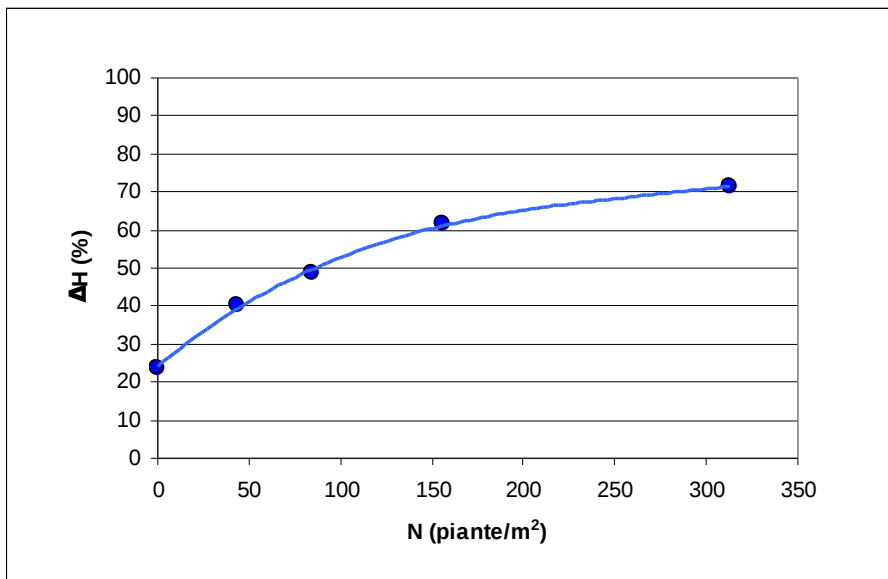


Figura 26 - Relazione fra la dissipazione dell'altezza d'onda H e la densità di vegetazione N

Dall'esame del caso con fondo libero da vegetazione, si può notare come sia presente una parte non trascurabile di dissipazione dovuta all'attrito di fondo. L'effetto dell'attrito è tanto maggiore quanto più alta è la velocità in corrispondenza al fondo. In presenza di vegetazione fitta l'attenuazione maggiore porta ad una brusca riduzione di velocità. Man mano che si dirada la vegetazione, la minor attenuazione porta a profili di velocità sempre più prossimi a quello indisturbato. E' chiaro, perciò, che l'attrito di fondo, ovvero la dissipazione prodotta dallo sforzo tangenziale sul fondo, sarà fattore trascurabile per le densità alte. Lo sarà tanto meno, invece, tanto più scende la densità di vegetazione. Un discorso qualitativo di questo tipo spiega, in parte, il risultato dell'analisi di sensibilità condotta sull'altezza d'onda (paragrafo 4.1.2.1): per le densità minori, l'attenuazione del moto non ha un andamento ben delineato, come accade per le densità maggiori, perché iniziano a farsi sentire in maniera rilevante anche gli effetti dell'attrito di fondo, oltre a quelli della presenza di vegetazione. Questo aspetto sarà approfondito meglio in seguito, al termine del confronto coi dati teorici.

4.1.4 Conclusioni sull'attenuazione del moto ondoso

L'analisi condotta nei paragrafi precedenti permette di individuare l'effetto dei principali parametri che influiscono nel fenomeno in termini di smorzamento del moto ondoso.

Le conclusioni principali che si possono trarre sono le seguenti:

- L'attenuazione del moto ondoso è proporzionale all'altezza d'onda soprattutto per densità di vegetazione alte;
- Non può essere definito un chiaro andamento della dissipazione in funzione dell'altezza d'onda per densità di vegetazione minori, poiché l'effetto dell'attrito di fondo non è più trascurabile;
- Lo smorzamento del moto ondoso aumenta al crescere della densità di vegetazione;
- L'attenuazione del moto ondoso diminuisce al crescere del valore del livello di riposo della superficie libera su cui le onde si propagano (tirante);

RISULTATI

- L'effetto dell'attrito di fondo non è trascurabile per le densità di vegetazione minori;

E' pensabile, a questo punto, di riassumere i risultati ottenuti in alcuni grafici che spieghino in maniera complessiva il fenomeno di attenuazione studiato sperimentalmente. In questa ottica in Figura 27 sono riassunti i valori medi della dissipazione percentuale, in funzione del valore del tirante e della densità di vegetazione. Si possono individuare andamenti simili fra i dati relativi alle diverse densità di vegetazione.

Lo smorzamento dell'onda è inversamente proporzionale al tirante. I punti nel grafico sono ben interpolati da curve con legge esponenziale, che si differenziano in funzione della densità. Le curve si presentano con forma molto simile, ma traslate, per il diverso effetto della densità sul fenomeno dell'attenuazione. Le leggi delle curve ricavate per interpolazione sono:

$$\Delta H(\%) = 138.54 \cdot e^{-3.507 h} \quad \text{per } N=312.5 \text{ piante/m}^2 \quad (0)$$

$$\Delta H(\%) = 135.08 \cdot e^{-4.0286 h} \quad \text{per } N=162.25 \text{ piante/m}^2 \quad (0)$$

$$\Delta H(\%) = 122.46 \cdot e^{-4.9329 h} \quad \text{per } N=84.5 \text{ piante/m}^2 \quad (0)$$

$$\Delta H(\%) = 114.31 \cdot e^{-5.626 h} \quad \text{per } N=43.75 \text{ piante/m}^2 \quad (0)$$

Una stima approssimata sul grado di attenuazione del moto ondoso può essere ottenuta, quindi, entrando nel grafico di Figura 27 con il valore del tirante cercato, e proiettandosi sulle ordinate utilizzando la curva della densità di vegetazione appropriata.

RISULTATI

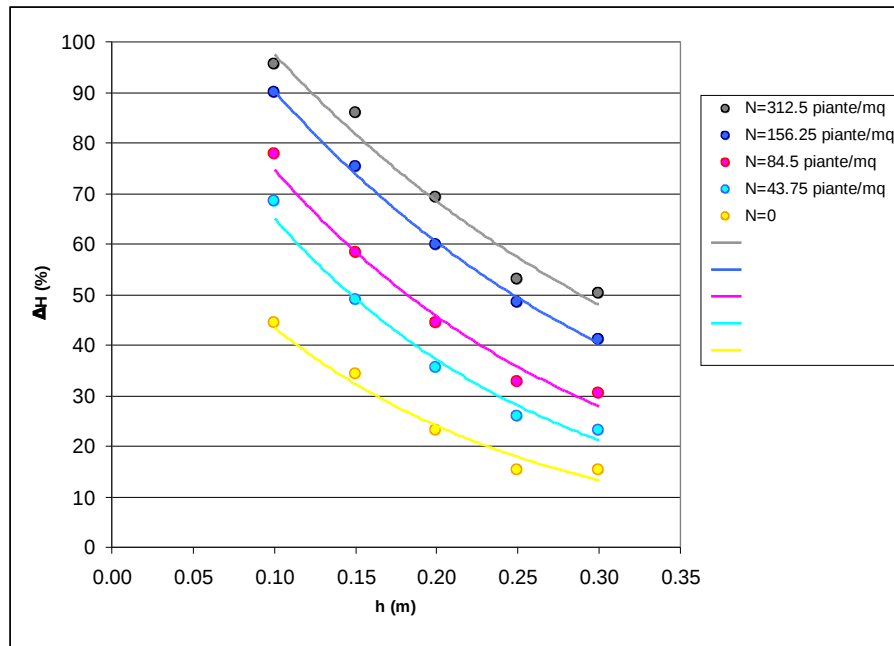


Figura 27 - Valori medi riassuntivi della dissipazione percentuale dell'altezza d'onda, in funzione del tirante e della densità di vegetazione

In Figura 28 sono presentati i medesimi risultati, espressi in termini di perdita percentuale di energia. L'andamento delle curve è simile al caso precedente. Le curve interpolatrici sono meno regolari, il che sta ad indicare che la stima che si può effettuare in termini di attenuazione di energia non sembra essere altrettanto buona come quella che si può effettuare in termini di smorzamento dell'onda. Il risultato è ragionevole se si considera che l'energia è proporzionale ad H^2 .

Nelle Tabelle delle onde generate (Tabella 2 e Tabella 3) è possibile riscontrare che all'aumentare del livello aumenta, in media, anche l'altezza delle onde. Perciò, un certo scarto tra i valori di attenuazione in termini di altezza significativa, relativo a densità di vegetazione diverse per lo stesso tirante, corrisponde ad un aumento più che proporzionale al crescere del tirante, in termini di energia. Questa considerazione si riflette sulla forma delle curve del grafico di Figura 28 che, a differenza del grafico di Figura 27, sono diverse tra loro e si aprono a ventaglio rispetto al punto relativo al tirante di 0.10 m.

RISULTATI

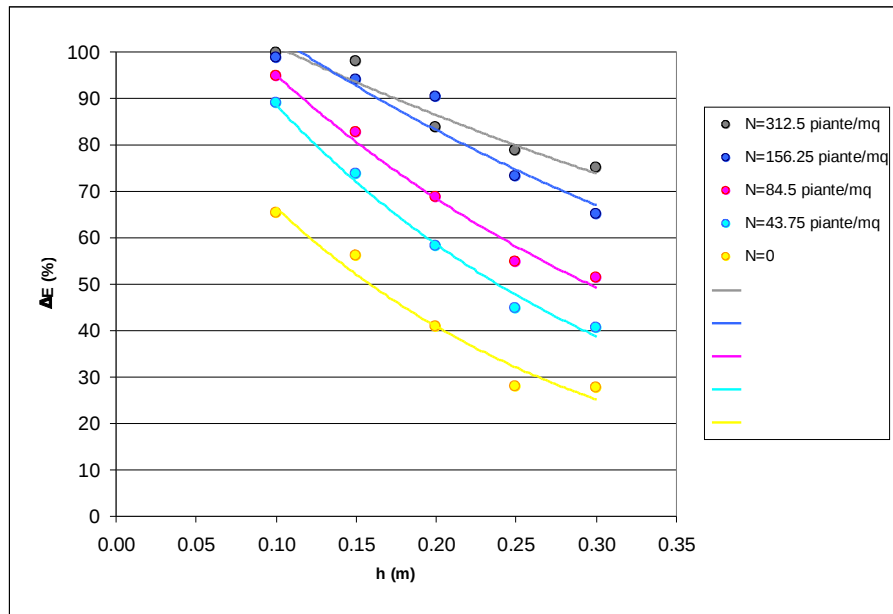


Figura 28 - Valori medi riassuntivi della dissipazione percentuale dell'energia d'onda, in funzione del tirante e della densità di vegetazione

4.2 Calibratura del coefficiente di resistenza C_D

I valori del coefficiente di resistenza della vegetazione C_D , sono stati determinati per ogni prova a partire dai valori del coefficiente di dissipazione K_v , interpolando la curva teorica espressa dalla relazione (0) con i dati sperimentali, utilizzando il metodo dei minimi quadrati, considerando K_v l'unico parametro di calibrazione. Noto il valore del K_v , dalla (0) si ricava direttamente il valore del C_D . A titolo di esempio in Figura 29 vengono riportati i risultati relativi solo ad alcune delle prove effettuate nel caso di densità di vegetazione massima ($N=312.5$ piante/m²). Nei grafici viene mostrato il confronto fra i dati sperimentali e i valori d'altezza onda forniti dal modello teorico, al variare dei diversi parametri in gioco (h , H_0/L , e T). Si può notare un buon accordo fra i dati sperimentali e i risultati teorici in tutti e tre i casi.

RISULTATI

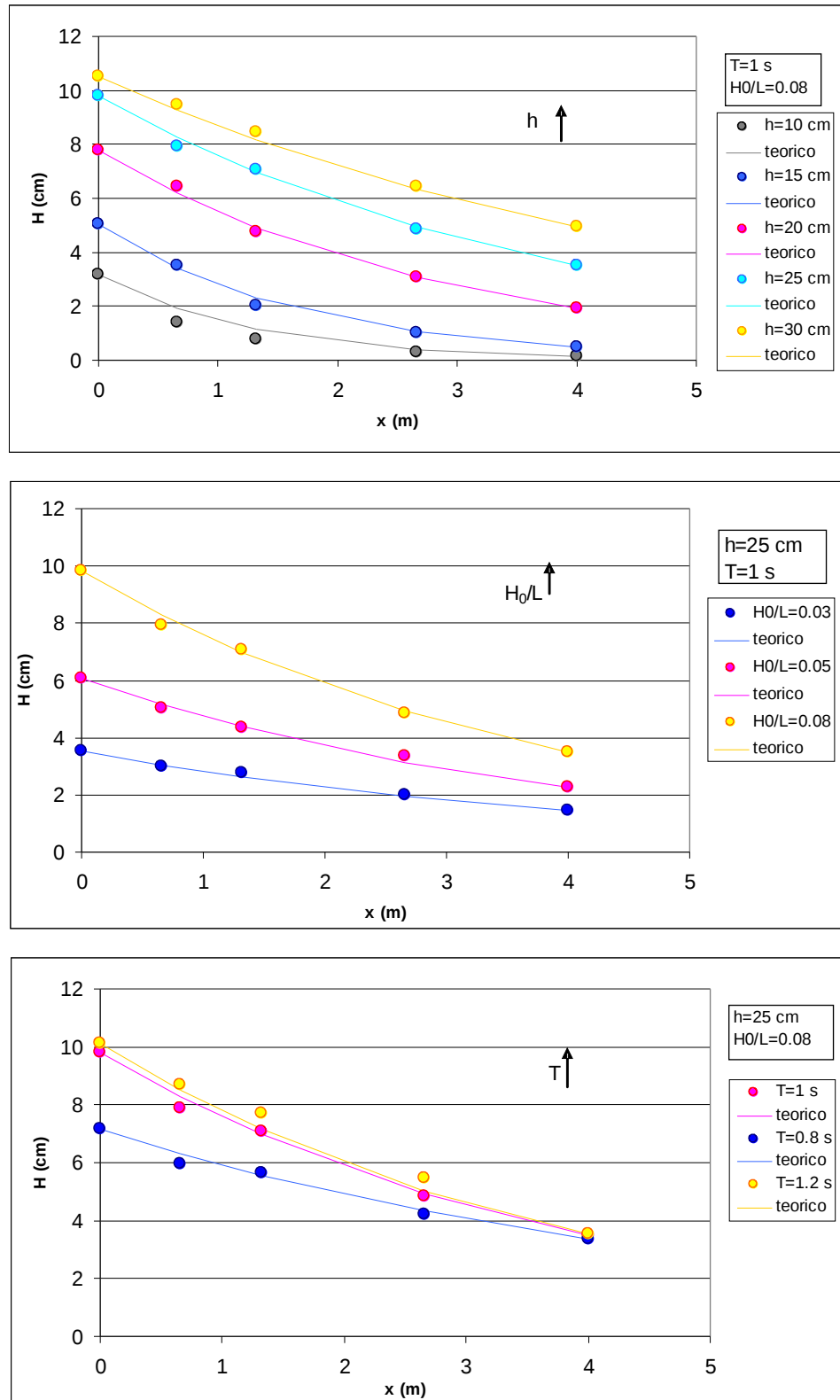


Figura 29 - Evoluzione dell' altezza d' onda H : confronto fra i dati sperimentali e il modello teorico per $N=312.5$ piante/m², al variare di h , H_0/L , T

RISULTATI

In Tabella 4 e Tabella 5 sono riassunti i valori dei C_D ottenuti dalla calibratura delle due serie di prove eseguite, al variare dei parametri H_0/L , H_0 , h , e la loro visualizzazione grafica è mostrata in Figura 30.

onda	h (cm)	T (s)	H_0 (cm)	H_0/L	C_D
regAA1	10	1.07	0.7	0.01	1.35
regAA2	10	1.07	1.7	0.02	0.65
regAA3b	10	0.7	3.1	0.05	0.28
regAA4	10	0.7	4.3	0.07	0.22
regBB1	15	1.42	1.3	0.01	1.62
regBB2a	15	1.07	2.1	0.02	0.97
regBB3b	15	0.85	3	0.03	0.72
regBB4	15	0.85	4.2	0.05	0.57
regBB5	15	0.85	4.6	0.05	0.53
regBB5b	15	0.85	5.5	0.06	0.46
regC1	20	1.42	2.2	0.01	0.87
regC2	20	1.06	2.5	0.02	0.89
regC3	20	1.06	3.3	0.03	0.69
regC4	20	1.06	3.9	0.03	0.58
regC5	20	1.06	4.7	0.04	0.51
regC7	20	0.85	6.4	0.06	0.51
regC8	20	0.85	7.1	0.07	0.47
regC10a	20	0.85	7.8	0.08	0.44
regC10b	20	0.92	7.9	0.07	0.40
regD2	25	1.07	2.1	0.02	1.05
regD3	25	1.28	3	0.02	0.81
regD4	25	1.07	3.5	0.03	0.81
regD5	25	1.07	4.3	0.03	0.73
regD6	25	1.07	5.3	0.04	0.63
regD8	25	0.85	6.5	0.07	0.48
regD9	25	0.85	7.5	0.08	0.44
regD11	25	0.91	7.8	0.07	0.43
regD12	25	0.91	8.9	0.07	0.36
regD13	25	0.98	11.2	0.09	0.33
regE1	30	1.42	3.6	0.02	0.80
regE2	30	1.41	4.8	0.02	0.64
regE3	30	1.41	6.1	0.03	0.56
regE4	30	1.27	6.6	0.03	0.59
regE5	30	1.27	7.6	0.04	0.54
regE6	30	1.06	8.1	0.05	0.55
regE7	30	1.06	9	0.06	0.53
regE8	30	0.99	11.1	0.08	0.34
regE9	30	0.99	11.8	0.08	0.33
regE10	30	1.06	13.4	0.09	0.37

Tabella 4 – C_D calibrati per tutte le onde della prima serie di prove eseguite per $N=312.5$ piante/m²

RISULTATI

onda	h (cm)	T (s)	H ₀ (cm)	H ₀ /L	C _D
reg10a	10	1,0	2,73	0,027	0,847
reg10b	10	1,0	5,91	0,059	0,510
reg10c5	10	1,0	6,19	0,062	0,513
reg10d1	10	0,8	2,03	0,027	1,100
reg10e2	10	0,8	3,50	0,046	0,697
reg10f3	10	0,8	4,29	0,056	0,582
reg10g	10	1,2	3,89	0,032	0,703
reg10h3	10	1,2	3,34	0,027	0,723
reg15a	15	1,0	3,24	0,030	0,800
reg15b	15	1,0	5,70	0,052	0,506
reg15c4	15	1,0	5,96	0,055	0,482
reg15d	15	0,8	2,15	0,026	0,974
reg15e	15	0,8	4,25	0,052	0,605
reg15f6	15	0,8	5,37	0,065	0,481
reg15g	15	1,2	4,10	0,030	0,701
reg15h5	15	1,2	5,32	0,039	0,568
reg20a	20	1,0	3,29	0,027	0,867
reg20b	20	1,0	5,72	0,047	0,560
reg20c	20	1,0	8,40	0,069	0,359
reg20d	20	0,8	2,47	0,028	1,072
reg20e	20	0,8	4,28	0,048	0,733
reg20f	20	0,8	6,51	0,073	0,488
reg20g	20	1,2	4,53	0,030	0,614
reg20h	20	1,2	7,90	0,052	0,384
reg25a	25	1,0	3,69	0,028	0,911
reg25b	25	1,0	6,34	0,049	0,597
reg25c	25	1,0	9,78	0,075	0,398
reg25d	25	0,8	2,88	0,031	1,029
reg25e	25	0,8	4,77	0,051	0,711
reg25f	25	0,8	7,25	0,078	0,557
reg25g	25	1,2	4,79	0,029	0,836
reg25h2	25	1,2	8,91	0,054	0,494
reg25i1	25	1,2	11,41	0,069	0,311
reg30a	30	1,0	4,12	0,030	1,010
reg30b	30	1,0	6,95	0,051	0,669
reg30c	30	1,0	10,97	0,080	0,452
reg30d	30	0,8	3,02	0,031	0,954
reg30e2	30	0,8	4,85	0,051	0,786
reg30f	30	0,8	7,56	0,079	0,599
reg30g1	30	1,2	5,27	0,030	0,626
reg30h1	30	1,2	8,50	0,048	0,469

Tabella 5 – C_D calibrati per tutte le onde della seconda serie di prove eseguite per N=312.5 piante/m²

RISULTATI

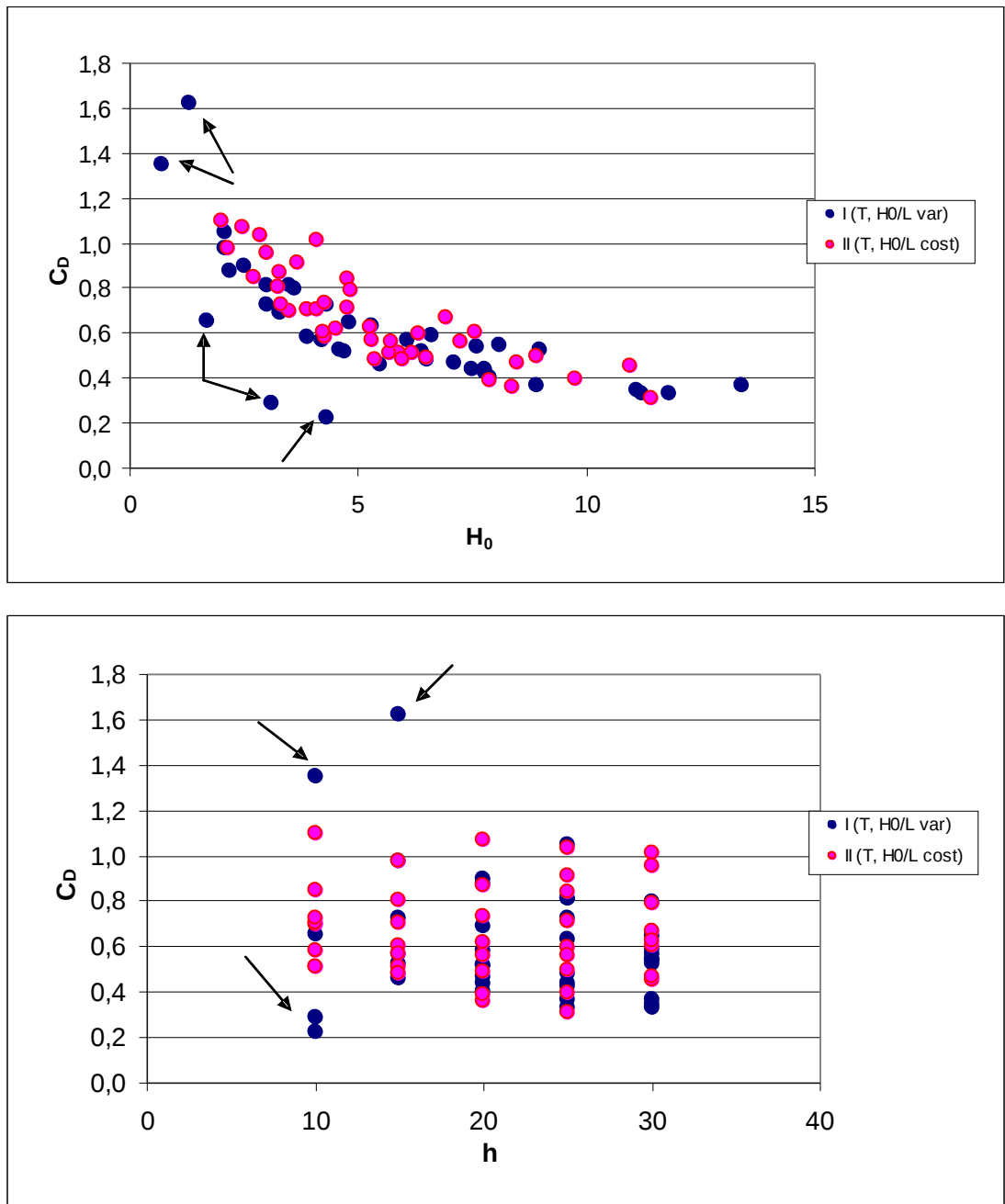


Figura 30 - Valori del C_D calibrati nelle due serie di prove, per $N=312.5$ piante/ m^2 , al variare di H_0 , H_0/L , h

Fin qui è stata illustrata un'analisi qualitativa, effettuata unicamente sulla base dei dati sperimentali. Si desidera ora inquadrare il problema da un punto di vista teorico, per cercare di determinare delle relazioni teoriche che permettano di stimare l'attenuazione del moto ondoso in funzione di tutte le variabili che concorrono significativamente a

RISULTATI

caratterizzare il fenomeno. Come spiegato nel paragrafo 2.3, si è proceduto considerando in primo luogo il caso di vegetazione molto densa, ipotizzando che la resistenza sia dovuta all'effetto della sola vegetazione. Si è cercato quindi di ricavare delle relazioni teoriche per il coefficiente della resistenza C_D , responsabile dell'effetto della sola vegetazione, in funzione di un qualche parametro del moto ondoso, assumendo che tali relazioni si mantengano valide per qualsiasi densità di vegetazione. L'ipotesi che il C_D non sia influenzato dalla densità di vegetazione è tutta da verificare, ma vedremo in seguito come sia validata dal buon accordo coi dati sperimentali. Come parametri del moto ondoso per caratterizzare il fenomeno, sono stati scelti il numero di Reynolds e il numero di Keulegan-Carpenter, seguendo gli esempi in letteratura (Kobayashi e Asano, 1993; Mendez e Losada, 2004).

In Figura 31 vengono riportati i valori del coefficiente di resistenza C_D in funzione del numero di Reynolds per tutte le prove eseguite: nel grafico si possono notare due punti che si discostano nettamente dagli altri, corrispondenti entrambi al caso di vegetazione parzialmente emersa. Si può notare come l'andamento del coefficiente di resistenza C_D in funzione del numero di Reynolds può essere ben approssimato da una legge di potenza:

$$C_D = 21.585 Re^{-0.6794} \quad (0)$$

Discorso analogo può essere fatto per la dipendenza del C_D dal numero di Keulegan-Carpenter, dove i punti sperimentali possono essere ancora ben approssimati da una legge di potenza. Il risultato è mostrato in Figura 32.

RISULTATI

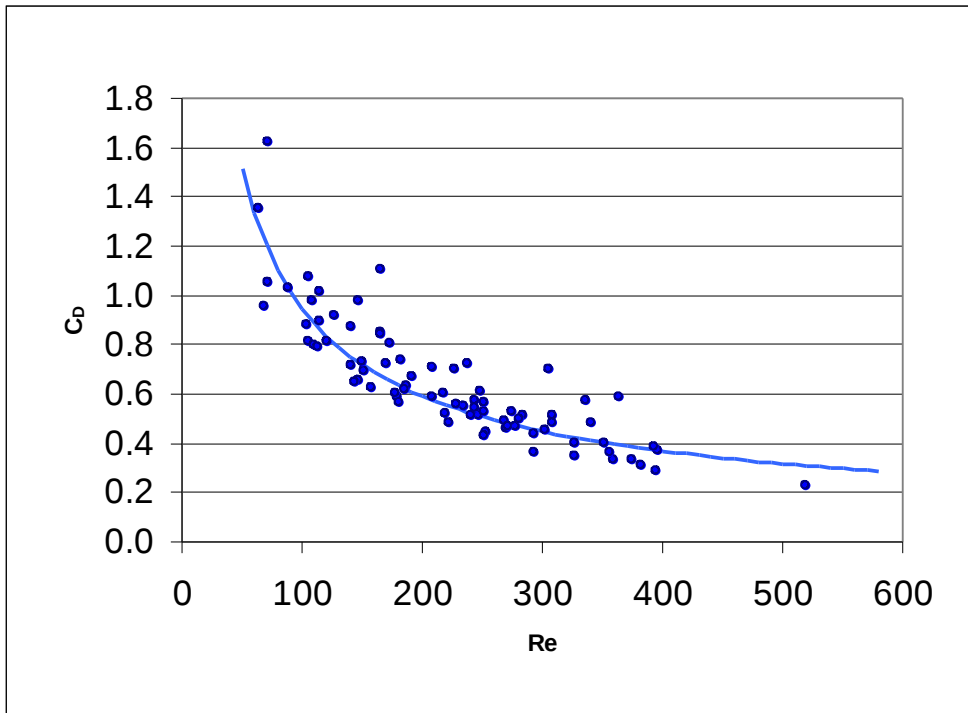


Figura 31 - Relazione fra il coefficiente di resistenza C_D e il numero di Reynolds

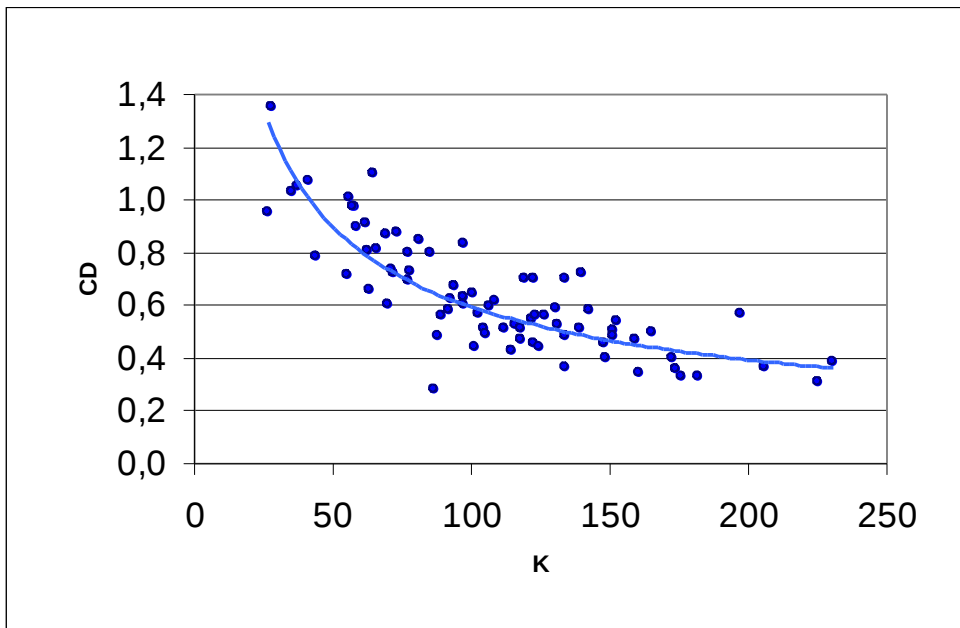


Figura 32 - Relazione fra il coefficiente di resistenza C_D e il numero di Keulegan-Carpenter

RISULTATI

Dall'analisi delle Figura 31 e Figura 32, risulta che il coefficiente C_D è molto più correlato col numero di Reynolds, rispetto al numero di Keulegan-Carpenter: nel primo caso, infatti, il coefficiente di correlazione è pari a 0.75, mentre nel secondo a 0.66.

La relazione (0) permette di determinare il C_D in funzione dell'idrodinamica, per ogni densità di vegetazione, e quindi tramite la (0) è possibile quantificare l'effetto della dissipazione dovuto alla sola vegetazione anche per densità di vegetazione inferiori. Nel tentativo di dare una spiegazione alla dispersione dei punti lungo la curva C_D-Re , è stata analizzata più nel dettaglio tale relazione fra il coefficiente di resistenza C_D e il numero di Reynolds.

Nell'espressione del numero di Reynolds (0) compare una velocità orbitale, nella cui formulazione (0) entrano in gioco le variabili caratteristiche del moto e della vegetazione (H_0 , h , T , h_p). In particolare si è voluto evidenziare la relazione C_D-Re al variare del tirante. Il risultato è mostrato in Figura 33.

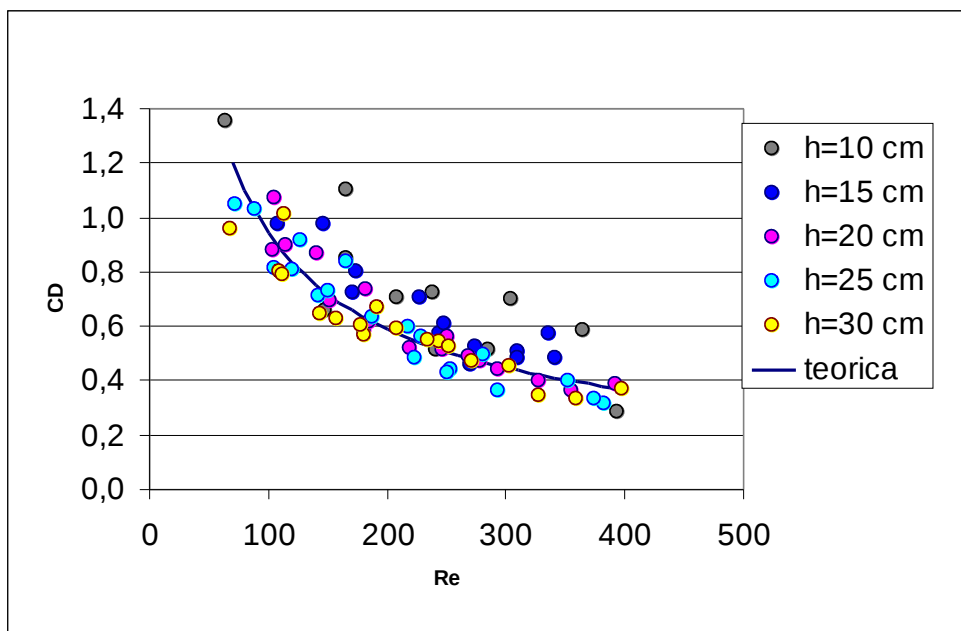


Figura 33 - Relazione fra il coefficiente di resistenza C_D e il numero di Reynolds, al variare del tirante

Il risultato mostra come i punti relativi al caso di vegetazione emersa (tiranti di 10 e 15 cm) si discostino maggiormente dalla curva di interpolazione. In particolare i punti sperimentali si trovano al di sopra della curva teorica, il che significa che la relazione

RISULTATI

teorica, per i motivi già indicati, sottostima la resistenza opposta dalla vegetazione nel caso di bassi tiranti.

In Figura 34 viene mostrato il confronto fra i valori dei C_D ottenuti dai dati sperimentali e quelli calcolati a partire dalla relazione teorica (0). Com'era già stato evidenziato nelle considerazioni precedenti, i punti corrispondenti ai tiranti più bassi sono quelli che si discostano di più dalla curva teorica.

La forte variabilità dei valori ottenuti per il C_D potrebbe dunque essere dovuta anche agli effetti della flessibilità delle piante: infatti nella formula di resistenza idrodinamica usata per calcolare il C_D (0) si pone l'approssimazione di far riferimento ad una velocità assoluta, invece che una velocità relativa, senza tener conto degli effetti dovuti al moto della vegetazione. Tali effetti devono dunque essere compresi nel C_D stesso, che in conseguenza di ciò può assumere valori molto diversi.

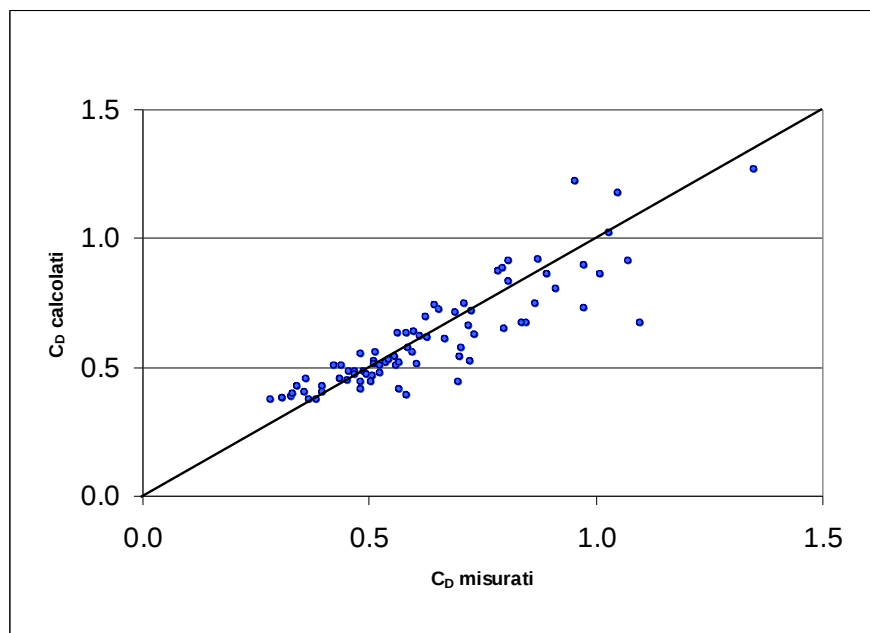


Figura 34 - Confronto fra i valori di C_D stimati e calcolati

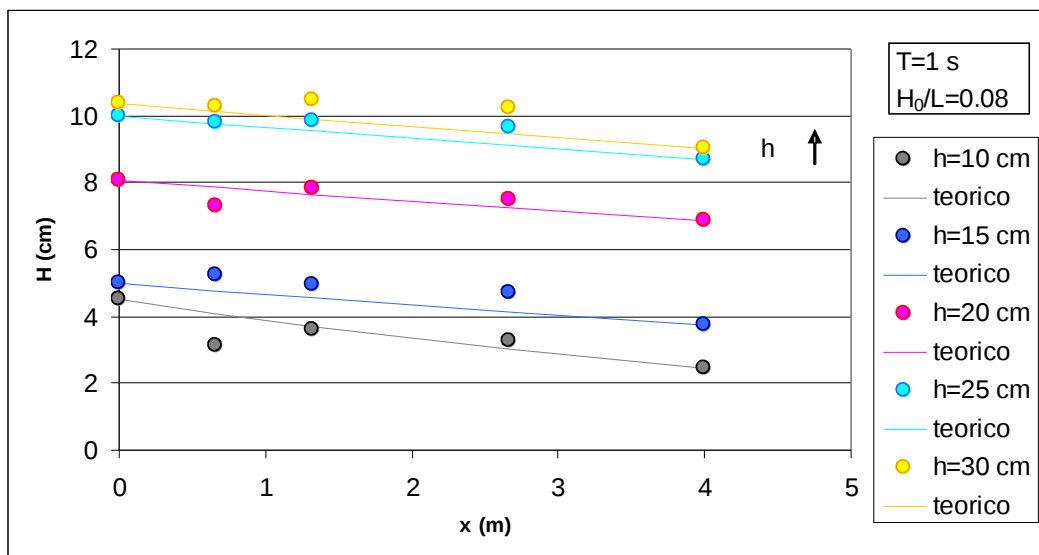
Si ricorda che questo valore del C_D ingloba l'effetto della sola vegetazione, a cui deve essere sommato quello dell'attrito del fondo, che verrà determinato come spiegato nel prossimo paragrafo.

4.3 Calibratura del coefficiente di attrito del fondo f

Dalle considerazioni esposte in precedenza, è stato messo in luce che l'attrito del fondo gioca un ruolo non trascurabile nel fenomeno di attenuazione del moto ondoso. Si registrano, infatti, valori di riduzione dell'altezza d'onda che arrivano a sfiorare valori del 50%, con un valore del tirante di 10 cm (Figura 14 e Figura 25). Per stimare gli effetti prodotti dall'attrito del fondo, si è quindi utilizzato il modello teorico presentato nel paragrafo 2.1, applicato in condizioni di fondo sgombro da vegetazione.

Analogamente al caso con vegetazione, i valori del coefficiente di dissipazione di attrito del fondo K_f sono stati determinati per ogni prova interpolando la curva teorica espressa dalla relazione (0) con i dati sperimentali, utilizzando il metodo dei minimi quadrati, considerando K_f l'unico parametro di calibrazione.

In Figura 35 vengono riportati i risultati relativi alle stesse onde esaminate nel paragrafo precedente (vedi Figura 29), qui considerate in assenza di vegetazione. Nei grafici viene mostrato il confronto fra i dati sperimentali e i valori d'altezza onda forniti dal modello teorico, al variare dei diversi parametri in gioco (h , H_0/L , e T). Anche in questo caso si può notare un discreto accordo fra i dati sperimentali e i risultati teorici in tutti e tre i casi. Solo nel caso dell'onda con tirante 25 cm, ripidità pari a 0.08, e periodo pari a 1.2 s sembra esserci maggior discrepanza, dovuta all'incertezza nei dati sperimentali.



RISULTATI

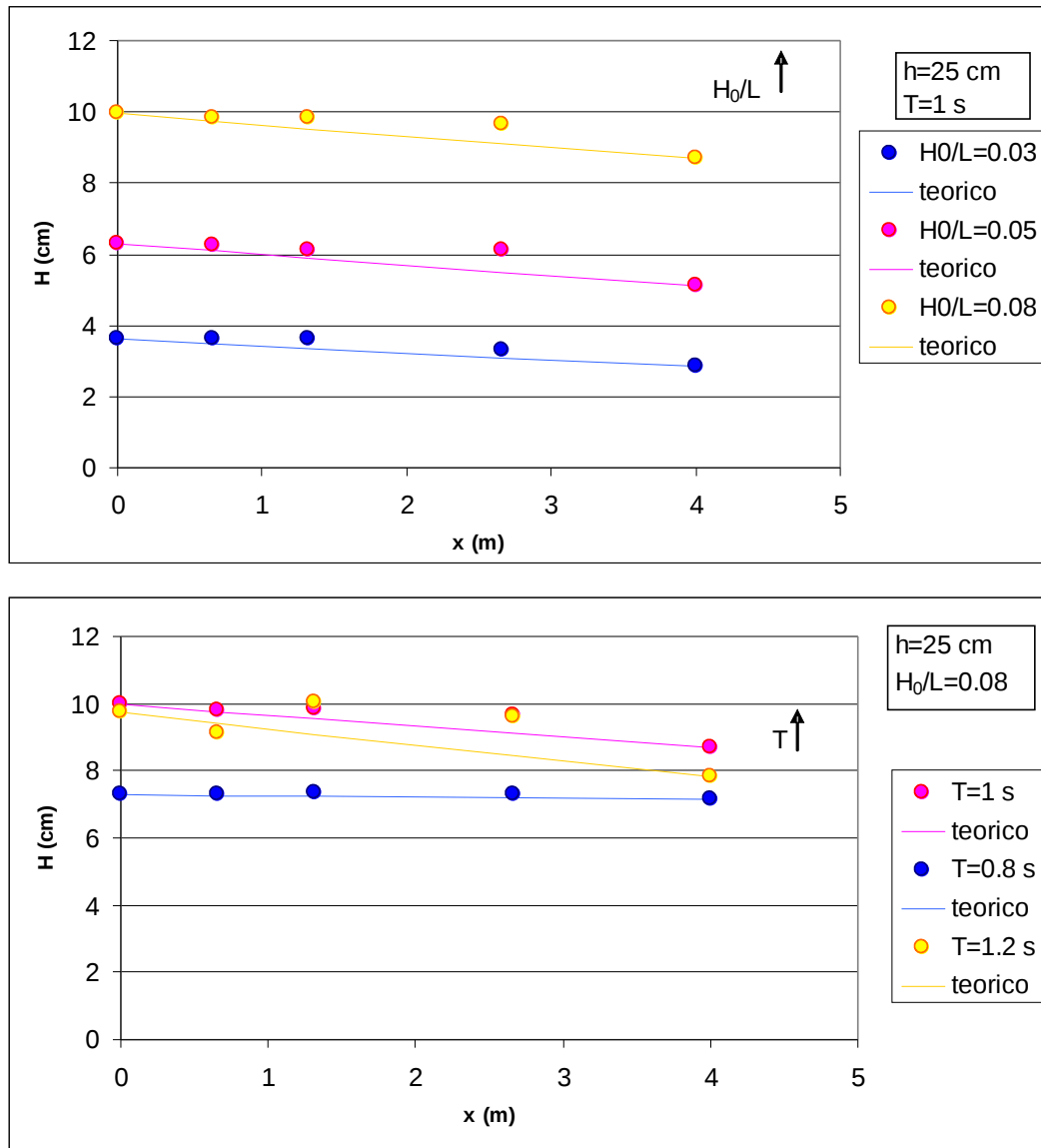


Figura 35 - Evoluzione dell' altezza d' onda H : confronto fra i dati sperimentali e il modello teorico in assenza di vegetazione, al variare di h , H_0/L , T

Come nell'esame del caso del coefficiente di resistenza dovuto alla vegetazione C_D , vengono di seguito riassunti in Tabella 6 e Tabella 7 i valori dei coefficienti K_f ottenuti dalla calibratura delle due serie di prove eseguite, al variare dei parametri H_0/L , H_0 , h , mentre la loro visualizzazione grafica è mostrata in Figura 36. Si precisa che i coefficienti ottenuti sono dei $K_{f_{max}}$, perché esprimono il massimo valore di resistenza che può esplicitare il fondo, responsabile da solo di tutta la dissipazione dell'altezza d'onda, dal momento che non è presente vegetazione.

RISULTATI

onda	h (cm)	T (s)	H ₀ (cm)	H ₀ /L	K _{fmax}
regAA1	10	1.07	0.7	0.01	0.35
regAA2	10	1.07	1.7	0.02	0.29
regAA3b	10	0.7	3.1	0.05	0.31
regAA4	10	0.7	4.3	0.07	0.23
regBB1	15	1.42	1.3	0.01	0.34
regBB2a	15	1.07	2.1	0.02	0.22
regBB3b	15	0.85	3	0.03	0.18
regBB4	15	0.85	4.2	0.05	0.18
regBB5	15	0.85	4.6	0.05	0.17
regBB5b	15	0.85	5.5	0.06	0.19
regC1	20	1.42	2.2	0.01	0.12
regC2	20	1.06	2.5	0.02	0.14
regC3	20	1.06	3.3	0.03	0.12
regC4	20	1.06	3.9	0.03	0.11
regC5	20	1.06	4.7	0.04	0.10
regC7	20	0.85	6.4	0.06	0.18
regC8	20	0.85	7.1	0.07	0.15
regC10a	20	0.85	7.8	0.08	0.15
regC10b	20	0.92	7.9	0.07	0.12
regD2	25	1.07	2.1	0.02	0.11
regD3	25	1.28	3	0.02	0.14
regD4	25	1.07	3.5	0.03	0.11
regD5	25	1.07	4.3	0.03	0.08
regD6	25	1.07	5.3	0.04	0.08
regD8	25	0.85	6.5	0.07	0.07
regD9	25	0.85	7.5	0.08	0.08
regD11	25	0.91	7.8	0.07	0.05
regD12	25	0.91	8.9	0.07	0.04
regD13	25	0.98	11.2	0.09	0.07
regE1	30	1.42	3.6	0.02	0.13
regE2	30	1.41	4.8	0.02	0.13
regE3	30	1.41	6.1	0.03	0.13
regE4	30	1.27	6.6	0.03	0.06
regE5	30	1.27	7.6	0.04	0.05
regE6	30	1.06	8.1	0.05	0.09
regE7	30	1.06	9	0.06	0.09
regE8	30	0.99	11.1	0.08	0.03
regE9	30	0.99	11.8	0.08	0.04
regE10	30	1.06	13.4	0.09	0.08

Tabella 6 – K_f calibrati per tutte le onde della prima serie di prove eseguite in assenza di vegetazione

RISULTATI

onda	h (cm)	T (s)	H ₀ (cm)	H ₀ /L	K _{f max}
reg10a	10	1.0	2.73	0.027	0.013
reg10b	10	1.0	5.91	0.059	0.281
reg10c5	10	1.0	6.19	0.062	0.304
reg10d1	10	0.8	2.03	0.027	0.216
reg10e2	10	0.8	3.50	0.046	0.170
reg10f3	10	0.8	4.29	0.056	0.156
reg10g	10	1.2	3.89	0.032	0.151
reg10h3	10	1.2	3.34	0.027	0.325
reg15a	15	1.0	3.24	0.030	0.158
reg15b	15	1.0	5.70	0.052	0.131
reg15c4	15	1.0	5.96	0.055	0.148
reg15d	15	0.8	2.15	0.026	0.143
reg15e	15	0.8	4.25	0.052	0.166
reg15f6	15	0.8	5.37	0.065	0.122
reg15g	15	1.2	4.10	0.030	0.284
reg15h5	15	1.2	5.32	0.039	0.280
reg20a	20	1.0	3.29	0.027	0.134
reg20b	20	1.0	5.72	0.047	0.075
reg20c	20	1.0	8.40	0.069	0.081
reg20d	20	0.8	2.47	0.028	0.051
reg20e	20	0.8	4.28	0.048	0.073
reg20f	20	0.8	6.51	0.073	0.002
reg20g	20	1.2	4.53	0.030	0.128
reg20h	20	1.2	7.90	0.052	0.170
reg25a	25	1.0	3.69	0.028	0.118
reg25b	25	1.0	6.34	0.049	0.103
reg25c	25	1.0	9.78	0.075	0.068
reg25d	25	0.8	2.88	0.031	0.044
reg25e	25	0.8	4.77	0.051	0.044
reg25f	25	0.8	7.25	0.078	0.001
reg25g	25	1.2	4.79	0.029	0.183
reg25h2	25	1.2	8.91	0.054	0.131
reg25i1	25	1.2	11.41	0.069	0.110
reg30a	30	1.0	4.12	0.030	0.108
reg30b	30	1.0	6.95	0.051	0.087
reg30c	30	1.0	10.97	0.080	0.069
reg30d	30	0.8	3.02	0.031	-0.018
reg30e2	30	0.8	4.85	0.051	-0.021
reg30f	30	0.8	7.56	0.079	-0.024
reg30g1	30	1.2	5.27	0.030	0.077
reg30h1	30	1.2	8.50	0.048	0.093

Tabella 7 – K_f calibrati per tutte le onde della seconda serie di prove eseguite in assenza di vegetazione

RISULTATI

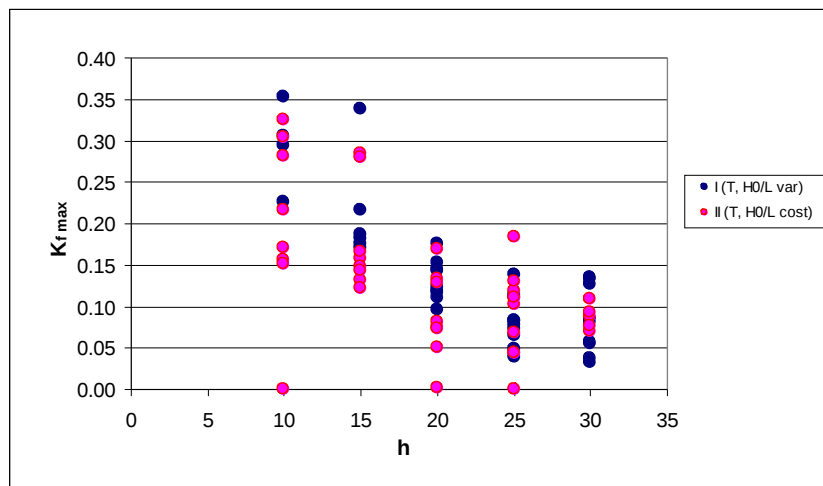
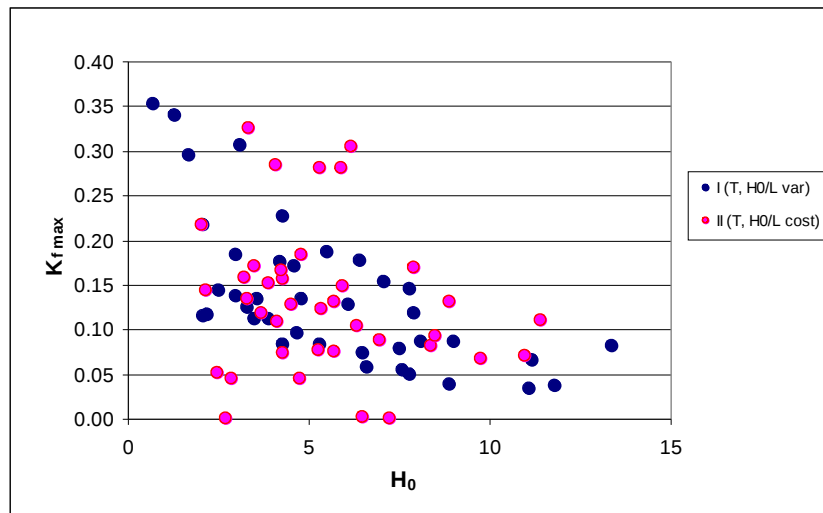
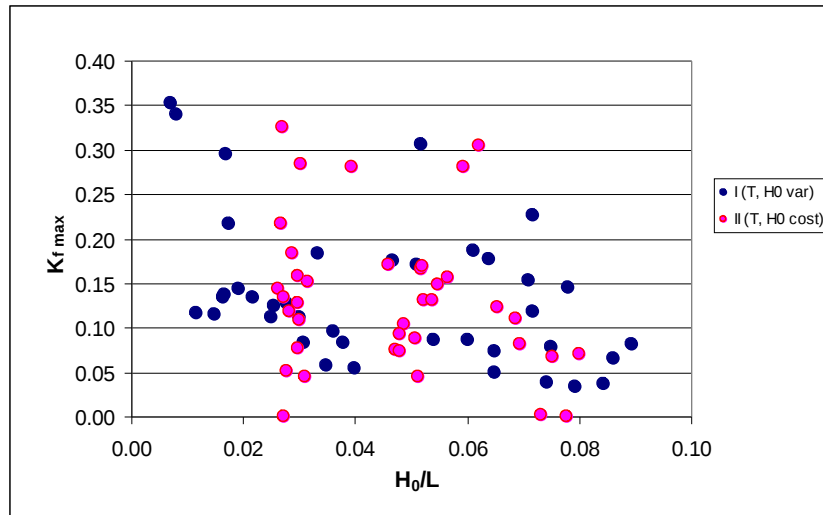


Figura 36 - $K_{f \max}$ calibrati nelle due serie di prove, in assenza di vegetazione, al variare di H_0 , H_0/L , h

RISULTATI

A differenza delle analisi fatte per il coefficiente di resistenza della vegetazione C_D , (dove si è riscontrata una chiara tendenza alla diminuzione del C_D all'aumentare dell'altezza d'onda incidente H_0 e della ripidità dell'onda H_0/L , mentre nulla si è potuto dire riguardo alla dipendenza del C_D dal tirante h), nel caso del $K_{f\ max}$ la tendenza alla diminuzione all'aumentare di H_0 risulta meno evidente, mentre è chiara la tendenza alla diminuzione all'aumentare di h . Al contrario, nei confronti del parametro H_0/L non è possibile individuare un comportamento ben preciso del $K_{f\ max}$.

Si desidera ora cercare una relazione teorica per il coefficiente di dissipazione di attrito del fondo K_f . Il procedimento seguito è stato illustrato nel paragrafo 2.3. L'obiettivo è quello di determinare una relazione di dipendenza del K_f dal tirante d'acqua e dalla densità di vegetazione, considerati separatamente, assumendo trascurabile l'influenza di altri parametri.

In primo luogo si considerano i valori dei coefficienti di dissipazione di attrito del fondo, determinati in assenza di vegetazione, $K_{f\ max}$, in funzione del tirante d'acqua. In Figura 37 sono plottati in funzione del tirante i valori dei $K_{f\ max}$ medi fissato il tirante, ottenuti dalle due serie di prove sperimentali.

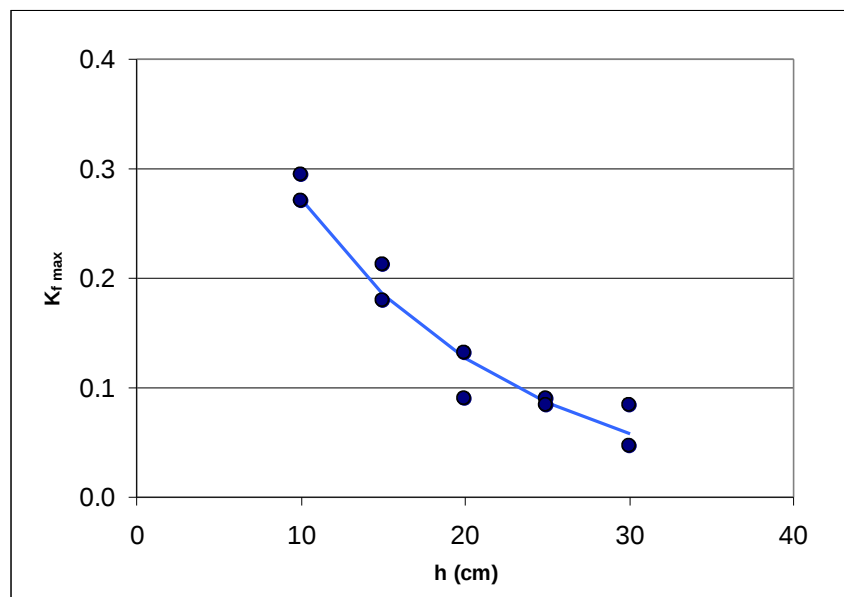


Figura 37 – Valori medi dei coefficienti di dissipazione d' attrito in assenza di vegetazione, in funzione del tirante

RISULTATI

Come si vede dalla Figura 37, l'andamento del coefficiente di dissipazione d'attrito $K_{f \max}$ in funzione del tirante d'acqua, può essere ben approssimato da una legge di potenza:

$$K_{f \max} = 0.5825e^{-0.0765h} \quad (0)$$

dove h rappresenta il tirante. In questo caso il coefficiente di correlazione R^2 è pari a 0.8927.

Andando ora ad esaminare il caso più generale con vegetazione, il valore sperimentale del coefficiente di dissipazione d'attrito K_f si ottiene per differenza tra il coefficiente di dissipazione totale, calcolato dalla (0) a partire dai dati sperimentali, e il coefficiente di dissipazione teorico dovuto alla sola vegetazione K_v , ottenuto dalla soluzione del sistema (0). I valori dei K_f così ottenuti, mediati per ogni tirante, sono mostrati in Figura 38.

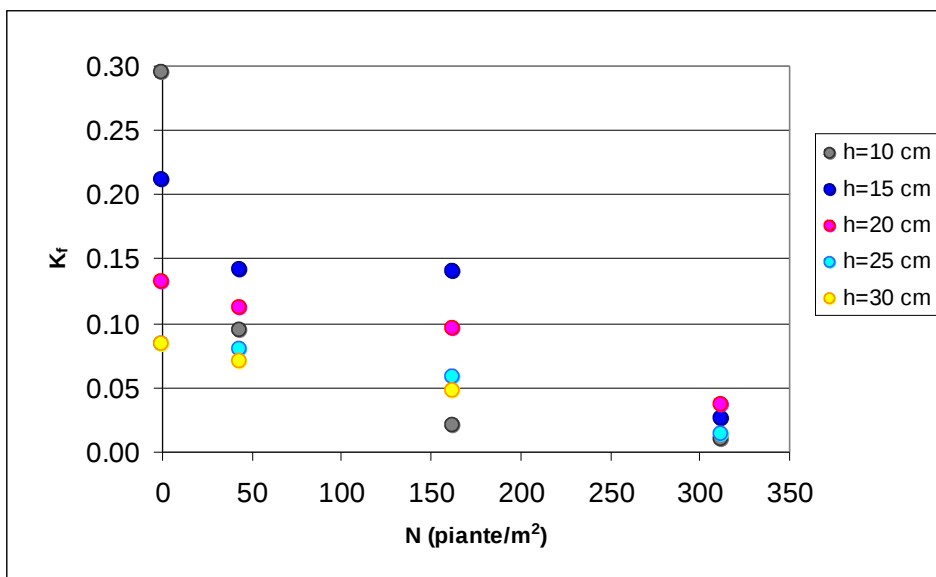


Figura 38 – Valori sperimentali dei K_f in funzione della densità di vegetazione, mediati per ogni tirante

Ora normalizzando i valori dei K_f rispetto al $K_{f \max}$ ricavato nel caso senza vegetazione, si ottiene un rapporto $K_f/K_{f \max}$ funzione della sola densità di vegetazione, in cui la dipendenza dal tirante diventa trascurabile, relativamente modesta se confrontata con le incertezze presenti nei dati sperimentali (Figura 39).

RISULTATI

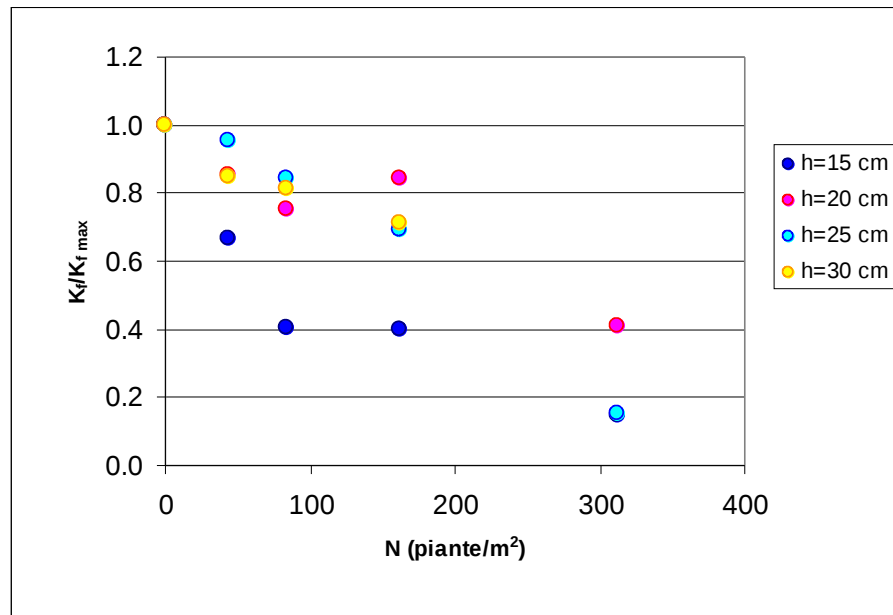


Figura 39 – Rapporto $K_f/K_{f,max}$ in funzione della densità di vegetazione, differenziato per tirante

In realtà i punti ottenuti per valori diversi del tirante non sono esattamente allineati. Viene omesso il risultato nel caso di tirante di 10 cm, perché l'incertezza dei dati sperimentali per livelli così bassi, nel caso di vegetazione emersa, genera una notevole dispersione dei punti. Anche nel caso di tirante di 15 cm, pari all'altezza della vegetazione, i punti si discostano rispetto a quelli corrispondenti a vegetazione completamente sommersa, in particolare sono più bassi rispetto agli altri. Sembrerebbe quindi che la stima fosse buona nel caso di vegetazione completamente sommersa, mentre lascia qualche incertezza nel caso contrario, di vegetazione parzialmente emersa. Il caso di densità di vegetazione intermedia ($N=156.25$ piante/m²) presenta delle anomalie rispetto all'andamento generale dei punti sperimentali, che tendono, com'è naturale, a diminuire all'aumentare della densità di vegetazione, perché via via che aumenta il numero di piante, l'effetto della resistenza opposta dalle piante diventa sempre più importante, mentre quella esercitata dall'attrito diventa trascurabile, fino ad annullarsi per $N \rightarrow \infty$.

Mantenendo comunque valida l'assunzione di considerare il rapporto $K_f/K_{f,max}$ dipendente prevalentemente dalla densità di vegetazione, e in maniera trascurabile dal

RISULTATI

tirante, i valori di tale rapporto sono stati mediati sui diversi tiranti, per cercare di trovare una relazione che leghi questi alla densità di vegetazione, come è mostrato in Figura 40.

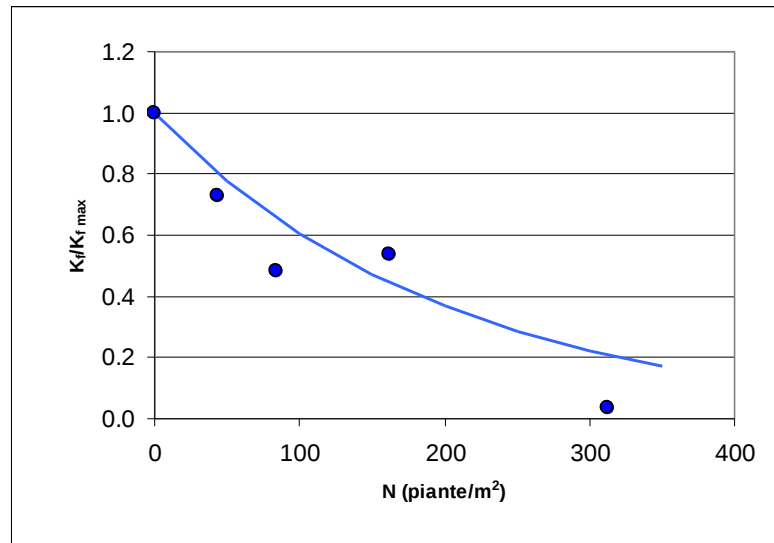


Figura 40 – Relazione fra il rapporto $K_f/K_{f_{max}}$ e la densità di vegetazione

La funzione che meglio approssima l'andamento del rapporto $K_f/K_{f_{max}}$ in funzione della densità di vegetazione è un'esponenziale:

$$\frac{K_f}{K_{f_{max}}} = e^{-0.005N} \quad (0)$$

In generale, stimato l'attrito al fondo in assenza di vegetazione, e quindi il valore del parametro $K_{f_{max}}$, si corregge tale valore per effetto della vegetazione mediante la (0). Nel caso in esame, assumendo di stimare la resistenza al fondo in assenza di vegetazione attraverso l'equazione (0) determinata sperimentalmente si ottiene:

$$K_f = e^{-0.005N} \cdot 0.5825e^{-0.0765h} \quad (0)$$

Il valore del K_f teorico dato dalla (0), sommato al valore del K_v teorico dato dalla (0), restituisce un valore del coefficiente di dissipazione totale teorico K_{tot} , dovuto sia alla presenza della vegetazione, sia all'attrito.

L'indagine si è rivolta esclusivamente a considerare l'influenza della densità di vegetazione sul coefficiente di dissipazione di attrito K_f (equazione (0)), ma si potrebbe tentare di migliorare il risultato, isolando la dipendenza del coefficiente di dissipazione di attrito K_f da altri parametri del moto (tirante h , caratteristiche dell'onda T , H_0 , H_0/L , o

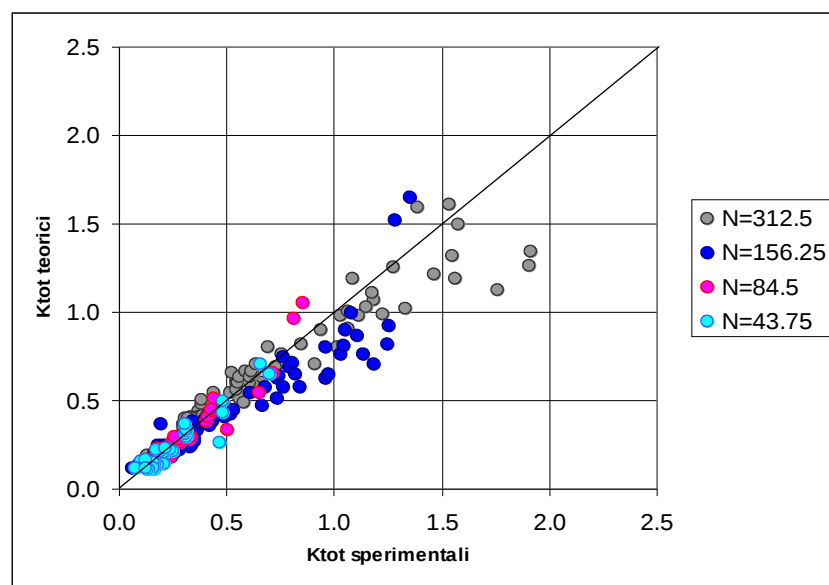
RISULTATI

caratteristiche geometriche della vegetazione b , h_p). Questo può essere oggetto di ulteriori approfondimenti e di ricerche future.

Viene ora proposto in Figura 41 (e Figura 42, in scala logaritmica) un confronto fra i valori teorici del coefficiente di dissipazione totale K_{tot} , calcolati come descritto sopra, e i valori del K_{tot} misurati sperimentalmente, dove sono evidenziati i diversi valori della densità di vegetazione. In Figura 43 e Figura 44 viene riproposto lo stesso confronto fra i valori teorici del coefficiente di dissipazione totale K_{tot} e i valori del K_{tot} misurati sperimentalmente, mettendo in evidenza i diversi valori del tirante.

Da un'analisi di Figura 41 e Figura 43, si può notare come i punti relativi ai tiranti più bassi e alle densità di vegetazione maggiori presentino uno scatter maggiore, mentre aumentando i livelli del tirante e diminuendo la densità di vegetazione i punti si dispongono bene attorno alla retta ideale a 45°, il che va a confermare la bontà della stima dei coefficienti. In scala logaritmica (Figura 42 e Figura 44) non si riscontrano scostamenti evidenti fra i valori sperimentali e quelli teorici del coefficiente di dissipazione totale K_{tot} .

Si può, dunque, concludere che i dati sperimentali sono ben approssimati dalla stima teorica, e si può confermare la validità delle ipotesi iniziali (sovrapposizione lineare degli effetti, indipendenza del coefficiente di resistenza C_D dalla densità di vegetazione).



RISULTATI

Figura 41 – Confronto fra i coefficienti di dissipazione totale sperimentali e teorici, al variare della densità della vegetazione

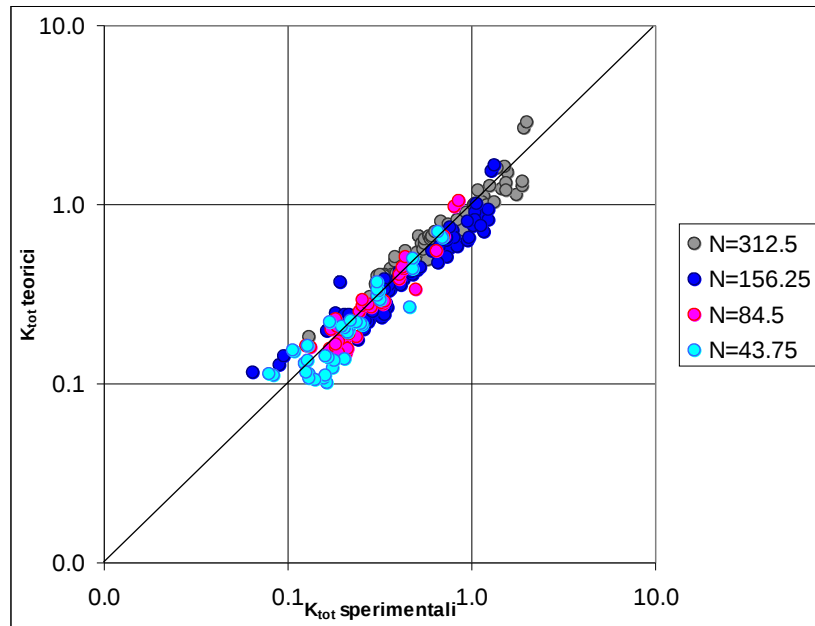


Figura 42 – Confronto fra i coefficienti di dissipazione totale sperimentali e teorici, al variare della densità della vegetazione (scala logaritmica)

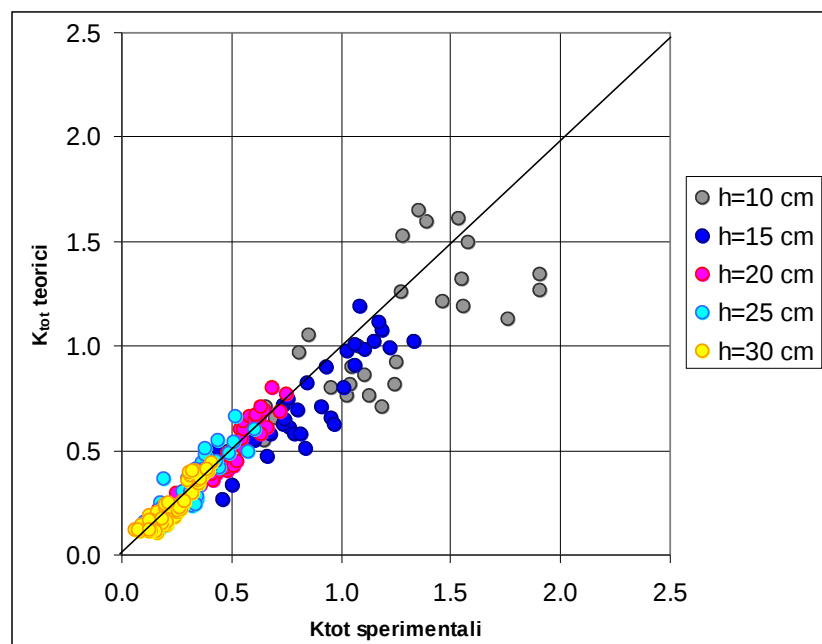


Figura 43 – Confronto fra i coefficienti di dissipazione totale sperimentali e teorici, al variare del tirante

RISULTATI

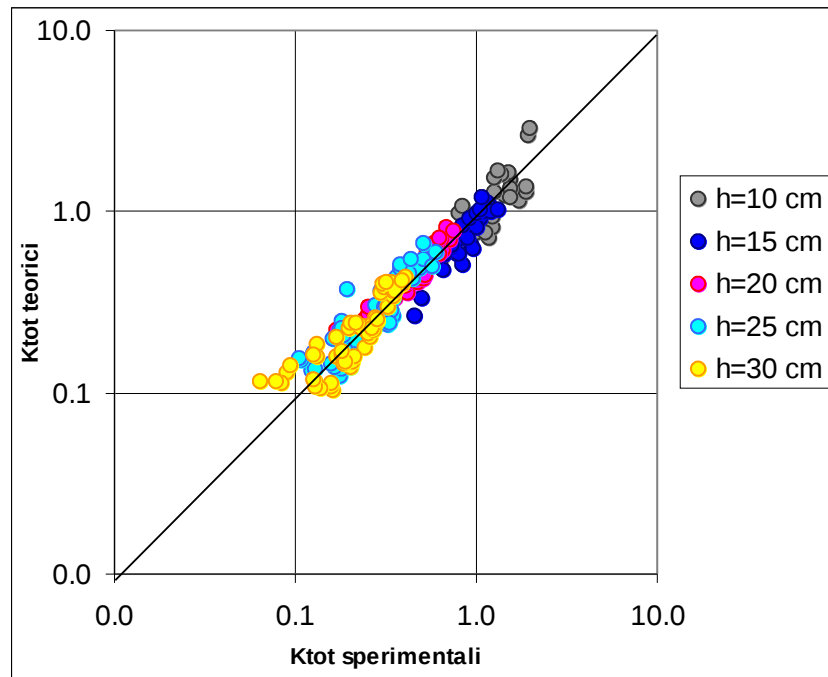
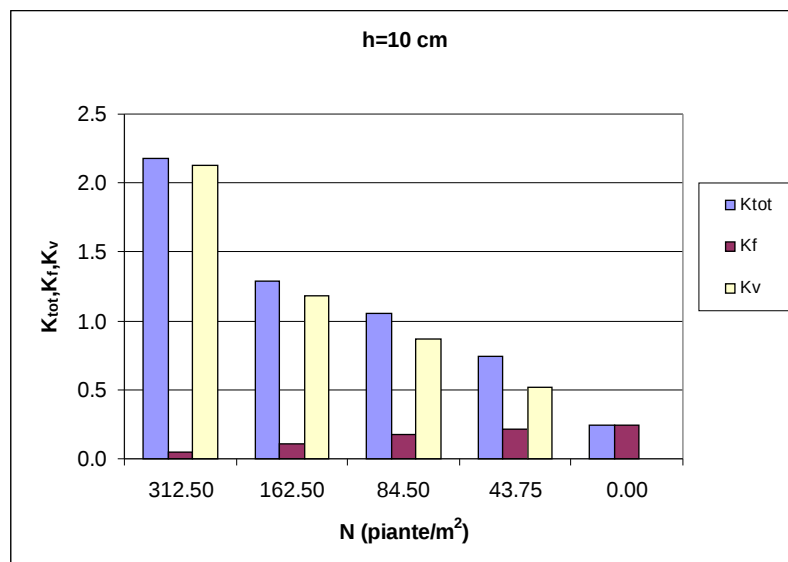
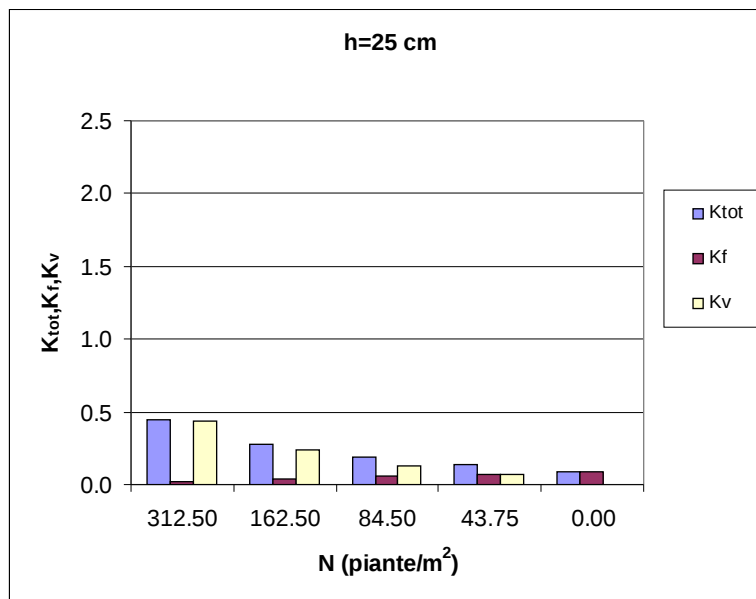
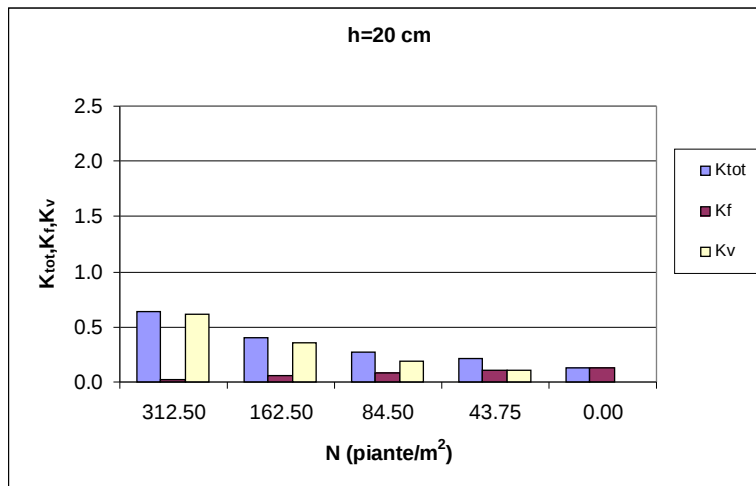
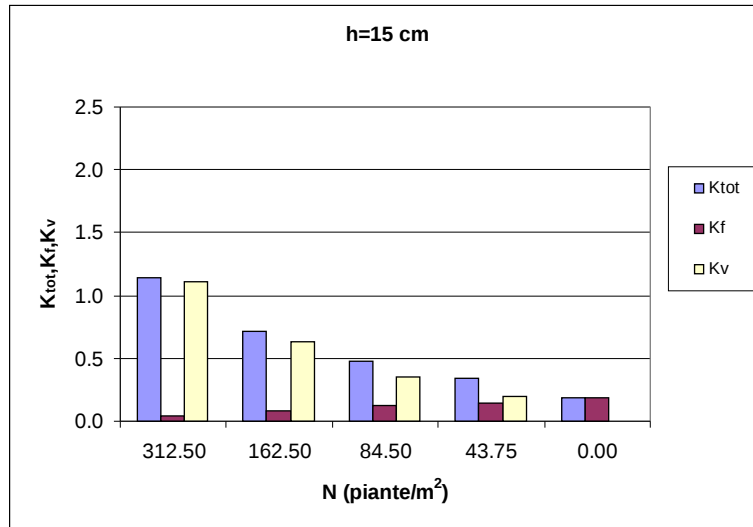


Figura 44 – Confronto fra i coefficienti di dissipazione totale sperimentali e teorici al variare del tirante (scala logaritmica)

Vengono riportati di seguito, per ogni tirante, i valori del coefficiente di dissipazione totale, con i due contributi dati dalla vegetazione e dall'attrito di fondo.



RISULTATI



RISULTATI

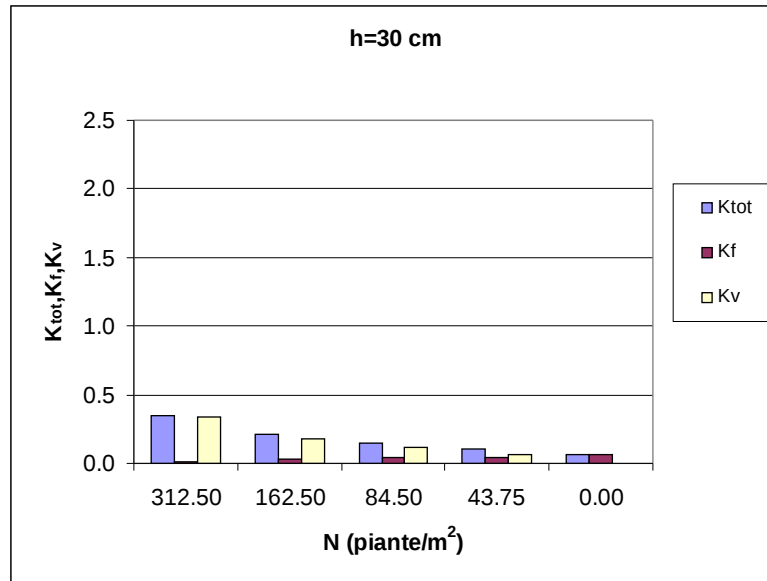


Figura 45 – Coefficiente di dissipazione di attrito totale, della vegetazione, di attrito, in funzione della densità di vegetazione, al variare del tirante

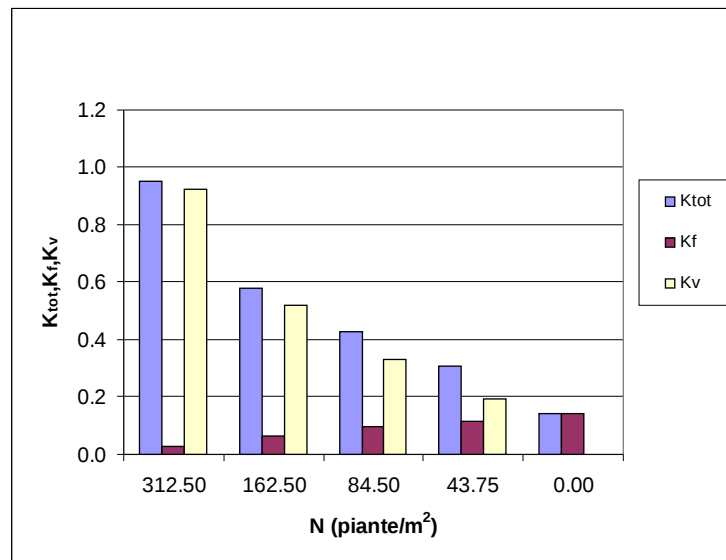


Figura 46 – Coefficiente di dissipazione d'attrito totale, della vegetazione, di attrito, in funzione della densità di vegetazione: valori mediati sul tirante

Noto il valore del coefficiente di dissipazione di attrito K_v , è possibile calcolare dalla (0) il valore del coefficiente d'attrito f . In Figura 47 e Figura 48 vengono riportati i valori del coefficiente d'attrito f , in funzione della densità di vegetazione, al variare del tirante. I valori comunemente presenti in letteratura per tale coefficiente variano entro un

RISULTATI

intervallo di 0.01-0.05 (Collins, 1972), mediamente di un ordine di grandezza inferiore a quelli trovati in questa ricerca. Come si vedrà, ciò è dovuto al fatto che nelle presenti indagini il fondo è da considerarsi liscio e il numero di Reynolds associato alla velocità orbitale al fondo relativamente basso rispetto a quanto si verifica normalmente in natura. Come si può vedere, i valori più bassi di f , confrontabili con quelli in letteratura sono riferiti al caso di massima densità di vegetazione, per qualsiasi valore del tirante. In Figura 48 sono riportati gli stessi risultati, mediati sul tirante.

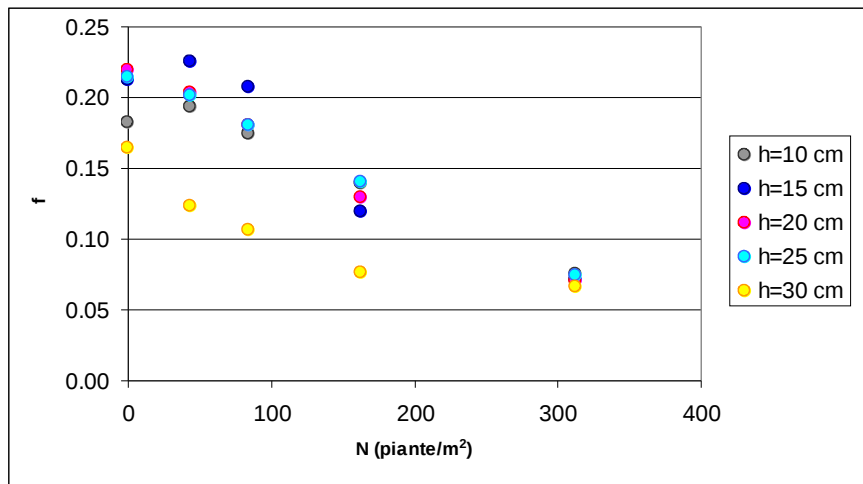


Figura 47 – Coefficiente di attrito, f , in funzione della densità di vegetazione, al variare del tirante

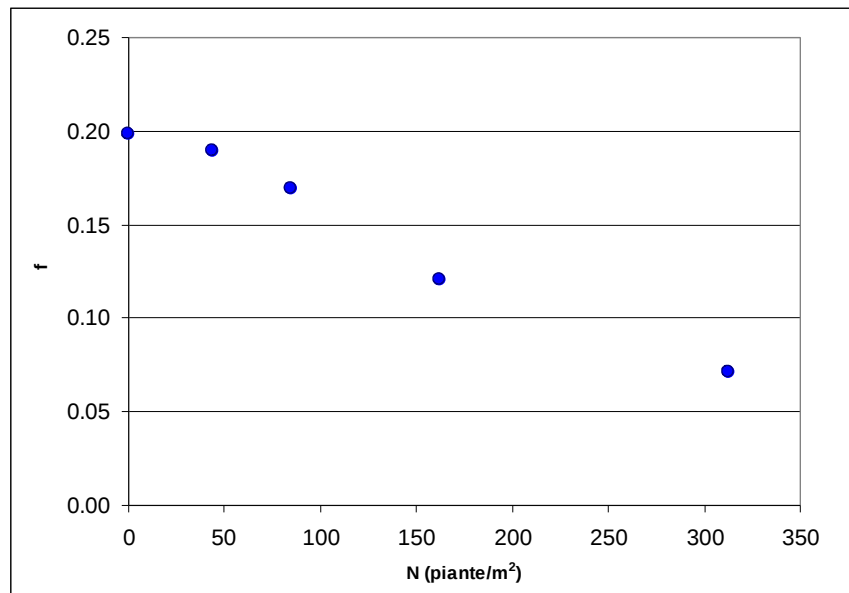


Figura 48 – Coefficiente di attrito, f , in funzione della densità di vegetazione: valori mediati sul tirante

RISULTATI

In conclusione di questa analisi, analogamente alle considerazioni fatte nel caso del coefficiente di resistenza della vegetazione C_D , vengono messi in relazione i valori del coefficiente di attrito f e il numero di Reynolds (Figura 49).

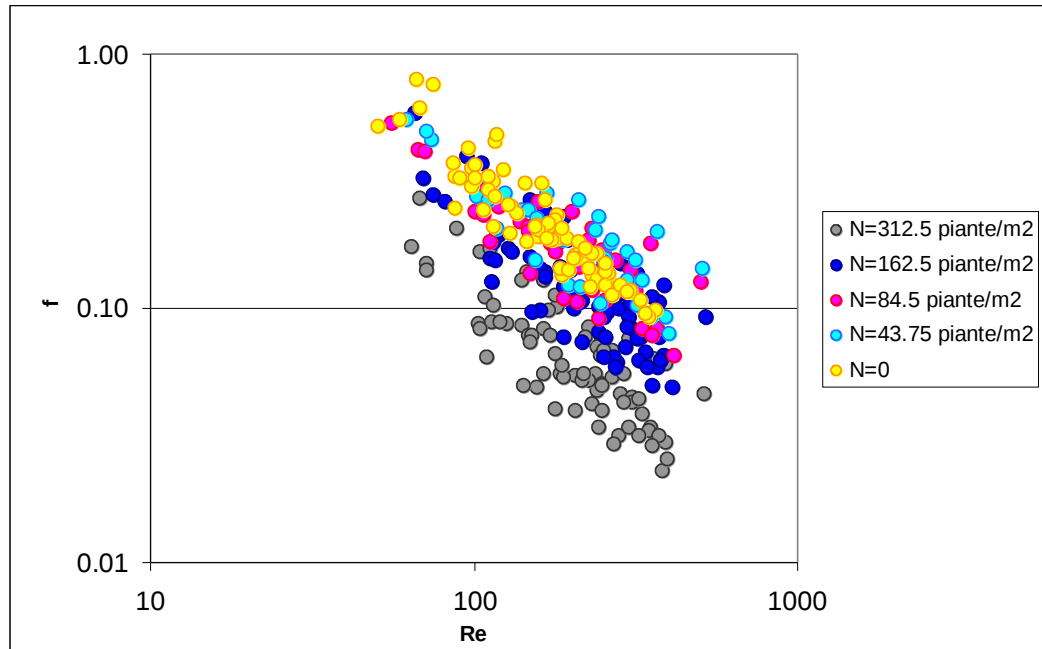


Figura 49 – Relazione fra il coefficiente di attrito f e il numero di Reynolds, al variare della densità di vegetazione

Dall'analisi del grafico, risulta che i punti meglio allineati sono quelli corrispondenti al caso senza vegetazione, e finché la densità di vegetazione si mantiene bassa i punti si comportano ancora abbastanza bene, ma all'aumentare progressivo della densità di vegetazione, il fattore di attrito diminuisce e la distribuzione dei punti risulta dispersa in modo irregolare.

Andando ora a confrontare i risultati ottenuti con i dati presenti in letteratura (Figura 50), si vede come ci sia una buona sovrapposizione dei punti relativi al caso senza vegetazione con la curva teorica che esprime la dipendenza del fattore di attrito f dal numero di Reynolds (Jonsson,1966), nel caso di moto laminare ($Re < 10^4$):

$$f = \frac{2}{\sqrt{Re}} \quad (0)$$

mentre all'aumentare della densità di vegetazione i punti si discostano sempre di più dalla curva teorica. Questo è in accordo con le ipotesi iniziali, dove si è assunto che nel

RISULTATI

caso di vegetazione molto densa tutta la resistenza sia dovuta all'effetto della sola vegetazione, e sia trascurabile l'effetto dell'attrito del fondo. All'aumentare della densità di vegetazione, infatti, inizia ad aumentare l'effetto della resistenza della vegetazione, fino a diventare predominante rispetto all'attrito del fondo. Nel grafico il coefficiente di attrito è considerato come un coefficiente di resistenza globale che, agli effetti della nostra analisi, tiene già in conto anche degli effetti della vegetazione nella dissipazione dell'energia d'onda. E' plausibile, pertanto, che in queste condizioni il fattore d'attrito f risulti sottostimato.

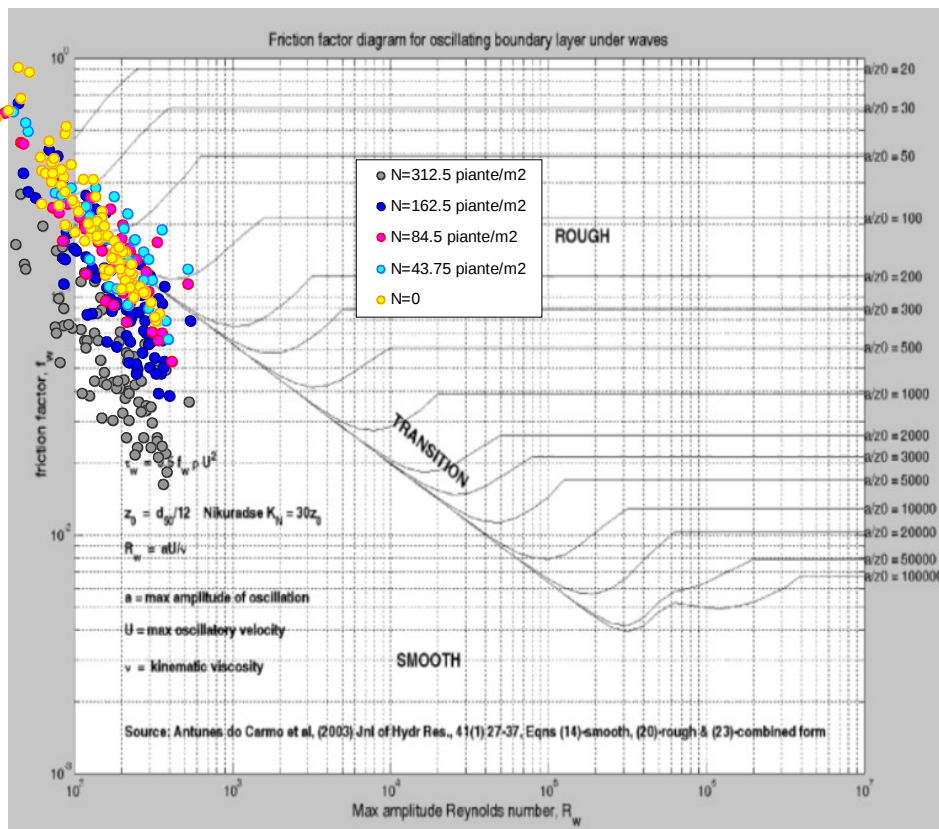


Figura 50 – Relazione fra il coefficiente di attrito f e il numero di Reynolds: confronto coi dati di letteratura

5 Conclusioni

In questo studio è stato indagato il fenomeno di smorzamento del moto ondoso in presenza di una superficie vegetata, attraverso un'indagine sperimentale in laboratorio e un approccio teorico per quanto riguarda la valutazione dell'effetto dell'attrito del fondo in presenza di vegetazione.

L'indagine sperimentale è stata realizzata in due serie di prove, dove è stata valutata la dissipazione di altezza d'onda al variare delle condizioni idrodinamiche e delle caratteristiche della vegetazione. Si è osservata l'influenza delle singole variabili nell'attenuazione percentuale di altezza d'onda lungo i 4 m di fondo coperto da vegetazione. Le variabili prese in esame sono altezza d'onda incidente H_0 , ripidità dell'onda H_0/L , periodo dell'onda T , tirante h , densità di vegetazione N .

Si è visto che l'attenuazione del moto ondoso è proporzionale all'altezza d'onda per densità di vegetazione alte, mentre per densità di vegetazione minori l'effetto dell'attrito di fondo non è più trascurabile e non può essere definito un chiaro andamento della dissipazione in funzione dell'altezza d'onda.

A partire dai dati sperimentali sono stati calibrati i valori del coefficiente di resistenza della vegetazione C_D , presente nel modello proposto da Mendez e Losada, che si rifà alla formulazione di Dalrymple. Una certa discrepanza fra i valori calibrati del C_D in questo lavoro (compresi nell'intervallo 0.3-1.2) e quelli presenti in letteratura (0.01-0.52, Mendez e Losada, 2004; 0.075-1.04, Kobayashi e Asano, 1993; 0.01-0.15, Augustin et al, 2009), può dipendere dalla diversa definizione del C_D , in questo studio riferito al singolo stelo, negli altri casi all'intera pianta.

Si può concludere che il modello di Mendez e Losada qui utilizzato approssima bene i dati sperimentali nel caso di vegetazione completamente sommersa, mentre presenta maggior incertezza nella situazione di vegetazione parzialmente emersa, dove i dati sperimentali non seguono un andamento ben definito.

CONCLUSIONI

Sono stati parametrizzati i valori del C_D in funzione dei numeri di Reynolds e Keulegan-Carpenter, allo scopo di determinare una relazione teorica del C_D (che non inglobasse in sé anche l'effetto dell'attrito di fondo), in funzione dei parametri adimensionali che entrano in gioco nel fenomeno dell'attenuazione del moto ondoso. Dal confronto fra i valori sperimentali e teorici del coefficiente di resistenza, è stata confermata la buona stima dei dati sperimentali da parte della relazione teorica.

Si è infine cercato di determinare un coefficiente K_f responsabile dell'effetto del solo attrito di fondo, in presenza di vegetazione. Sono state fatte alcune ipotesi (linearità degli effetti, indipendenza del C_D dalla densità di vegetazione) ed è stata trovata una relazione teorica per il coefficiente di dissipazione di attrito K_f , in funzione del tirante e della densità di vegetazione. Dal confronto fra il valore del coefficiente di dissipazione totale K_{tot} teorico, e il valore sperimentale del K_{tot} , calcolato direttamente dalle misurazioni dell'altezza d'onda lungo lo strato vegetato, è emerso un buon accordo fra l'approccio teorico e i dati sperimentali. Sono risultate quindi validate anche le ipotesi iniziali e si può concludere che la relazione teorica così trovata, può essere considerata un valido strumento per determinare la resistenza dell'attrito di fondo, in presenza di vegetazione.

Andando invece a considerare i risultati in termini di coefficiente di attrito del fondo f , i valori ottenuti (0.08-0.2) risultano di circa un ordine di grandezza superiori a quelli presenti in letteratura (0.01-0.05, Collins, 1972), perché nelle presenti indagini il regime del moto è laminare (fondo liscio e numero di Reynolds associato alla velocità orbitale al fondo relativamente basso), mentre normalmente in natura si verificano condizioni di transizione o di moto turbolento.

Resta da indagare ulteriormente l'influenza dell'attrito del fondo nei fenomeni di attenuazione del moto ondoso in presenza di vegetazione. Possibili sviluppi futuri potrebbero prendere in considerazione anche altre variabili, oltre al tirante e alla densità di vegetazione, nella formulazione teorica del K_v .

BIBLIOGRAFIA.

- Asano, T., Deguchi, H. e Kobayashi, N. (1993). Interaction between water waves and vegetation. *Proceedings of the Twenty-Third Coastal Engineering Conference, American Society of Civil Engineering, New York*, 2710-2723.
- Augustin, L.N., Irish, J. L. e Lynett, P. (2008). Laboratory and numerical studies of wave damping by emergent and near-emergent wetland vegetation. *Coastal Engineering* 56, 332-340.
- Battjes, J.A. (2001). Short waves. *Lecture notes for the course CT4320. Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology*.
- Bendoricchio, G., Di Luzio, M., Baschieri, P. e Capodaglio, A. (1993). Diffuse pollution in the lagoon of Venice. *Water , Science and Technology* 28, 69-78.
- Bergen, A., Alderson, C., Bergfors, R., Aquila, C. e Matsil, M.A. (2000). Restoration of *Spartina alterniflora* salt marsh following a fuel oil spill. New York City, NY. *Wetland Ecology Management* 8, 185-195.
- Camfield, F.E. (1983). Wind wave growth with high friction. *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean engineering* 109 (1), 115-117.
- Chakrabarti, S.K. (1991). Wave forces on offshore structures. *Handbook of Coastal and Ocean Engineering, Herbich J.B. ed., Vol. 2. Gulf Publishing Company*, 1-54.
- Collins, J. I., 1972. Prediction of shallow water spectra. *Journal of Geophysical research* 93 (C1), 491-508.
- D'Alpaos, L. (1992). Evoluzione morfologica della laguna di Venezia dal tempo di Denax ad oggi e sue conseguenze sul regime idrodinamico. *Istituto Veneto di SS.LL.AA., Conterminazione lagunare: storia, ingegneria, politica e diritto nella laguna di Venezia*.
- D'Alpaos, L. (2003). Conoscere il comportamento idrodinamico della laguna del passato per progettare la laguna del futuro. *Atti dell'Istituto Veneto di SS.LL.AA., Tomo CLXII (2003-2004) Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Venezia*.
- Dalrymple, R.A., Kirby J.T. e Hwang P.A. (1984). Wave diffraction due to areas of energy dissipation. *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean engineering* 110 (1), 67-79.
- Defina, A. e Bixio, A. (2005). Mean flow and turbulence in vegetated open channel flow. *Water Resources Research* 41, 1-12.
- Dubi, A. (1995). Damping of water waves by submerged vegetation: a case of study on *Laminaria hyperborea*. *PhD thesis, University of Trondheim, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway*.

BIBLIOGRAFIA

- Dubi, A. e Torum, A. (1995). Wave damping by kelp vegetation. *Proceedings of the Twenty-Fourth Coastal Engineering Conference, American Society of Civil Engineering, New York*, 142-156.
- Dubi, A. e Torum, A. (1997). Wave energy dissipation in kelp vegetation. *Proceedings of the Twenty-Fifth Coastal Engineering Conference, American Society of Civil Engineering, New York*, 2626-2639.
- Elwany, M.H.S., O'Reilly, W.C., Guza, R.T. e Flick, R.E. (1995). Effects of Southern California kelp beds on waves. *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean engineering* 121 (2), 143-150.
- Fonseca, M.S. e Cahalan, J.A. (1992). A preliminary evaluation of wave attenuation by four species of seagrass. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 35, 565-576.
- Fonseca M.S., Fisher J.S., Zieman J.C., Thalye G.W. (1982). Influence of Seagrass, *Zostera Marina* L., on Current Flow. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 15, 351-164.
- Gacia, E. e Duarte, C.M. (2001). Sediment retention by a Mediterranean *Posidonia oceanica* meadow: the balance between deposition and resuspension. *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences* 52, 505-514.
- Gagliano, G. e Wicker, K. (1989). Processes of Wetland Erosion in the Mississippi Deltic Plain. *Proceedings of Symposium: Marsh Management in Louisiana - Effects and Issues*, Duffy, W.G. and D. Clark Editors.
- Ghisalberti, M. e Nepf, H. M. (2002). Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic floes. *Journal of Geophysical Research* 107 (C2) (3), 1-11.
- Hasselmann, K. e Collins, J. I. (1968). Spectral dissipation of finite-depth gravity waves due to turbulent bottom friction. *Journal of Marine Research* 26 (1), 1-12.
- Heideman, J.C. e Sarpkaya, T (1985). Hydrodynamic forces on Dense Arrays of Cylinders. *17th annual Offshore technology conference Houston, Texas*.
- Ifuku, M. e Hayashi, H. (1998). Development of eelgrass *Zostera marina* bed utilizing sand drift control mats. *Coastal Engineering Journal* 40 (3), 223-239.
- Jonsson, I.G. (1966). Wave boundary layers and friction factors. *Proceedings of 10th International Conference on Coastal Engineering, Tokyo, Japan, ASCE, New York*, 127-148.
- Kadlec, R. (1990). Overland flow in wetlands: vegetation resistance. *Journal of Hydraulic Engineering* 116, 691-707.
- Klopstra, D., Barneveld, H.J., Van Noortwijk J.M. e Van Velzen E.H (1997). Analytical model for hydraulic roughness of submerged vegetation, in *Managing Water: Coping With Scarcity and Abundance, Proceedings IAHR, American Society of Civil Engineering, Rston, VA*, 775-780.

BIBLIOGRAFIA

- Kobayashi, N., Raichen, A.W. e Asano, T. (1993). Wave attenuation by vegetation. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 199 (1), 30–48.
- Knutson, P.L., Seeling, W.N. e Inskeep, M.R. (1982). Wave damping in *Spartina alterniflora* marshes. *Wetlands* 2, 87-104.
- Kouwen, N. (1998). Field estimation of the biomechanical properties of grass. *Journal of Hydraulic Research* 26 (5), 559-568.
- Kouwen, N. e Unny, T: E. (1973). Flexible roughness in open channel flow. *Journal of Hydraulic Division, ASCE* 99 (HY55), 713-728.
- Larson, M. (1995). Model for decay of random waves in surf zone. *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean engineering* 121 (1), 1-12.
- Lovas, S.M. (2000). Hydro-physical conditions in kelp forests and the effect on wave damping and dune erosion: a case study on *Laminaria hyperborea*. *PhD thesis, University of Trondheim, The Noewegian Institute of Technology, Trondheim, Norway.*
- Lovas, S.M. e Torum, A. (2001). Effects of submerged fegetation upon wave damping and run-up on beaches. *Coastal Engineering* 44, 851-863.
- Luo, W. e Monbaliu, J. (1994). Effects of the bottom friction formulation on the energy balance for gravity waves in shallow water. *Journal of Geophysical Research* 99 (C9), 18501-18511.
- Mazda Y., Wolanski, E., King, B., Sase, A., Ohtsuka, D. e Magi, M. (1997). Drag forces due to vegetation in mangrove swamps. *Mangroves and salt marshses* 1, 199-205.
- Mazda Y., Kobashi, D. e Okada, S. (2005). Tidal-scale hydrodynamics within mangrove swamps. *Wetlands Ecology and Management* 13, 647-655.
- Meijer, D.G., e Van Helzen, E.H. (1999). Prototype-scale flume experiments on hydraulic roughness of submerged vegetation, *Proceedings of 28th IAHR Congress, Graz, Austria.*
- Meijer, M.C. (2005). Wave attenuation over salt marsh vegetation. *M.Sc Thesis, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences.*
- Mendez, F.J. e Losada, I.J. (2004). An empirical model to estimate the propagation of random breaking and nonbreaking waves over vegetation fields. *Coastal engineering* 51, 103-118.
- Mendez, F.J., Losada, I.J e Losada, M.A. (1999a). Hydrodynamics induced by wind waves in a vegetation field. *Journal of Geophysical Research* 104 (C8), 18383-18396.
- Mirfenderesk,H. e Young, R. (2003). Direct measurements of bottom friction factor beneath surface gravity waves. *Applied Ocean Research* 25, 269-287.
- Moller, I. e Spencer, T. (2002). Wave dissipation over macro-tidal salt marshes: effects of marsh edge tipology and vegetation change. *Journal of Coastal Research, Special Issue* 36, 506-521.

BIBLIOGRAFIA

- Moller, I., Spencer, T., French, J.R., Leggett, D.J. e Dixon, M. (1999). Wind wave attenuation over saltmarsh surfaces: preliminary results from Norfolk, England. *Journal of Coastal Research* 12 (4), 1009-1016.
- Moller, I., Spencer T., French J.R., Leggett D.J. e Dixon M. (1999). Wave transformation over salt marshes: a field and numerical modeling study from North Nolfolk, England. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 49, 411-426.
- Mork, M. (1996). Wave attenuation due to bottom vegetation. *Waves and Nonlinear Processes in Hydrodynamics, Kluwer Academic Publishing, Oslo, Norway*, 371-382.
- Myrhaug, D., Holmedal, L.E. e Ong, C.O. (2009). Nonlinear random wave-induced drag force on a vegetation field. *Coastal Engineering* 56, 371-376.
- Nepf, H. (1999). Drag, turbulence and diffusivity in flow through emergent vegetation. *Water Resources Research* 35(2), 479-489.
- Nepf, H. e Vivoni, E.R. (2000). Flow structure in depth-limited, vegetated flow. *Journal of Geophysical Research* 105, 547-557.
- Nikora, V., Larned, S., Nikora, N., Debnath, K., Cooper, G. e Reid, M. 2008. Hydraulic resistance due to aquatic vegetation in small streams: a field study. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 134(9), 1326-1332.
- Ota, T., Kobayashi, N. e Kirby, J.T. (2004). Wave and Current Interactions with Vegetation. *Proceedings of 29th Coastal Engineering Conference, World Scientific, Singapore*, 508-520.
- Pryce, W.A., Tomlinson, K.W. e Hunt, J.N. (1968). The effect of artificial seaweed in promoting the build-up of beaches. *Proceedings of the 11th International Coastal Engineering Conference*, vol.1, 570-578.
- Putman, J.A. e Johnson, J.W. (1949). The dissipation of wave energy by bottom friction. *Transactions, American Geophysical Union* 30, 67-74.
- Seymour, R.J. (1996). Discussion of "Effects of southern California kelp beds on waves". *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean engineering* 122 (4), 207-208.
- Seymour, R.J., Tegner M.J, Dayton P.K. e Parnell P.E. (1989). Storm wave-induced mortality of giant kelp, *Macrocystis pyrifera*, in Southern California. *Estuarine, Coastal, Self Sciences* 28, 277-292.
- Stephan, U. e Gutknecht, D. (2002). Hydraulic resistance of submerged flexible vegetation, *Journal of Hydrology* 269 (1-2), 27-43.
- Stone, B.M. e Shen, H.T. (2002). Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness. *Journal of Hydraulic Engineering* 128 (5), 500-506.

BIBLIOGRAFIA

- Teeter, A.M., Johnson, B.H., Berger, C., Stelling, G., Scheffner N.W., Garcia, M.H. e Parchure, T.M. (2001). Hydrodynamic and sediment transport modeling emphasis on shallow-water, vegetated areas (lakes, reservoirs, estuaries and lagoons). *Hydrobiologia* 444, 1-23.
- Tiner, R.W. (1993). Field Guide to Coastal Wetland Plants of the Southeastern United States. *The University of Massachusetts Press, Amherst, MA.*, 80-83.
- Tschirky, P., Hall, K. e Turcke, D. (2001). Wave attenuation by emergent wetland vegetation. *Proceedings of the Twenty-Seventh Coastal Engineering Conference, American Society of Civil engineering, Virginia*, 865-877.
- Tyler, A.C. e Zieman, J. C. (1999). Patterns of development in the creekbank region of a barrier Island *Spartina alterniflora* marsh. *Marine Ecology, Prog. Ser.* 180, 161-177.
- Visentin, E. (2007). Effetti della vegetazione sull' attenuazione del moto ondoso. *Tesi di Laurea, Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Marittima, Ambientale e Geotecnica.*
- Williams, B.J.(2006). *Hydrobiological Modelling*, University of Newcastle, NSW, Australia.

Elenco dei simboli usati

- a densità di vegetazione (Nepf)
- b area della singola pianta per unità di altezza
- c celerità di propagazione dell' onda
- C_D coefficiente di resistenza della vegetazione
- c_g celerità di gruppo dell'onda
- d diametro dei cilindri (Nepf)
- E densità d' energia dell'onda
- E densità d' energia dell'onda iniziale (in $x=0$)
- E densità d' energia dell'onda alla fine del fondo vegetato (in $x=4$ m)
- f coefficiente d'attrito
- F vettore forza per unità di volume agente sulla vegetazione
- F_x azione idrodinamica orizzontale per unità di volume
- g accelerazione di gravità
- H altezza d'onda significativa
- \bar{H} altezza d'onda significativa media lungo la coordinata spaziale x
- H_0 altezza d'onda significativa iniziale (in $x=0$)
- H_{4m} altezza d'onda significativa alla fine del fondo vegetato (in $x=4$ m)
- h tirante
- h_p altezza della vegetazione
- k numero d'onda
- K_f coefficiente di dissipazione d' attrito di fondo
- K_{fmax} coefficiente di dissipazione d' attrito di fondo massimo
- K_v coefficiente di dissipazione della vegetazione
- K_{tot} coefficiente di dissipazione totale
- L lunghezza d'onda
- N numero di steli per unità di area orizzontale
- S distanza relativa fra i cilindri (Nepf)
- T periodo dell'onda
- u vettore velocità del fluido
- u velocità del fluido
- u_c velocità orbitale caratteristica agente sulla pianta

ELENCO DEI SIMBOLI USATI

- \mathcal{E}^f dissipazione di energia per unità di area e per unità di tempo dovuta all' attrito di fondo
- \mathcal{E}_v dissipazione d' energia per unità di area e per unità di tempo indotta dalla vegetazione
- η sopraelevazione di superficie
- ν viscosità cinematica dell' acqua
- ρ densità dell'acqua
- σ pulsazione dell'onda