



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE
MARCHE**

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

DICEA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E ARCHITETTURA

Corso di Laurea magistrale in Ingegneria Civile

**Analisi sperimentale della riflessione e della trasmissione ondosa
di una barra sommersa**

**Experimental investigation of wave reflection and transmission of
a submerged bar**

Relatore:

Prof. Ing. Sara Corvaro

Candidato:

Luca Belardinelli

Correlatore:

Dott. Ing. Francesco Marini

Dott. Ing. Stefania Rocchi

A.A. 2020/2021

Sommario

Introduzione	5
Articolazione del lavoro di tesi	7
Capitolo 1. Generalità delle onde gravitazionali periodiche su fondali costanti e studi sperimentali dell'interazione onda- struttura	9
1.1 Premessa	9
1.2 Generalità del problema differenziale della propagazione di onde regolari (monocromatiche) su fondale costante	10
1.3 Teoria lineare	14
1.4 Teoria non lineare	19
1.5 Le onde di Stokes	22
1.5.1 Teoria di Stokes al secondo ordine	22
1.5.2 Teoria di Stokes al terzo ordine	24
1.6 Beji e Battjes: indagine sperimentale della propagazione delle onde su una barra	25
1.7 Losada et al.: generazione di componenti armoniche oltre un gradino poroso sommerso	33
Capitolo 2. Riflessione e trasmissione del moto ondoso	42

2.1 Premessa	42
2.2 La riflessione del moto ondoso	43
2.2.1 Il fenomeno della riflessione ondosa parziale e le caratteristiche delle onde stazionarie parziali.....	44
2.3 Letteratura di riferimento analizzata	46
2.3.1 Il metodo di Goda e Suzuki.....	46
2.3.2 Il metodo di Mansard e Funke	52
2.3.3 Il metodo di Lin e Huang	56
2.4 Studio di Van der Meer <i>et al.</i> sulle modificazioni dello spettro ondoso a valle di una barra sommersa	64
Capitolo 3. Configurazione dell'apparato sperimentale.....	69
3.1 Premessa	69
3.2 Il canale coinvolto nell'indagine	69
3.3 Il generatore d'onda.....	72
3.4 Sonde di livello elettro-resistive	74
3.4.1 Calibrazione dello strumento di misura.....	76
3.5 La geometria della barra sommersa	76

3.6 Posizionamento delle sonde e metodo di separazione utilizzato	81
Capitolo 4 Analisi dei dati sperimentali	83
4.1 Premessa	83
4.2 Le onde oggetto di sperimentazione	84
4.3 Determinazione delle altezze d'onda incidente, riflessa e trasmessa per onde regolari	86
4.3.1 Determinazione delle ampiezze delle armoniche superiori	93
4.3.2 Determinazione dei coefficienti di riflessione e trasmissione	98
4.4 Determinazione delle altezze d'onda incidente, riflessa e trasmessa per le onde irregolari	103
4.4.2 Determinazione dei coefficienti di riflessione e trasmissione	107
4.5 Confronto tra lo spettro incidente e lo spettro riflesso nelle onde irregolari	109
4.6 Evoluzione delle forme spettrali al variare delle caratteristiche delle onde	114

4.6.1 Determinazione dell'energia coinvolta nello spettro .	125
Capitolo 5 Risultati	127
5.1 Risultati di K_r per onde regolari ed irregolari	127
5.2 Risultati di K_t per onde regolari e irregolari	132
5.3 Considerazioni sulla trasformazione dello spettro	136
Conclusioni.....	141
Ringraziamenti.....	144
Bibliografia	145

Introduzione

Nel momento in cui si parla di ambiente marino non si può fare a meno di far riferimento a ciò che si può osservare in maniera diretta ovvero gli agenti meteomarini. I fenomeni dinamici presenti in mare possono essere distinti in: vento, variazioni della superficie marina (tra cui le onde) e le correnti. Risulta quindi fondamentale capire gli effetti che tali agenti hanno sulle opere di difesa della costa e sul litorale, in particolar modo l'effetto dovuto al moto ondoso. Lungo le coste adriatiche le opere di difesa più diffuse sono le barriere emerse, con quota di coronamento al di sopra del livello medio marino. La sempre maggiore necessità di tener conto degli aspetti ambientali-paesaggistici ha fatto emergere altre soluzioni applicabili con gli stessi obiettivi ovvero le barriere sommerse, che hanno il vantaggio di avere un minor impatto ambientale poiché in questo caso la quota di coronamento è completamente al di sotto del livello medio marino. L'adozione di tale sistema di protezione garantisce di fatto non solo un buon assorbimento dell'energia trasportata dal moto ondoso ma anche un sufficiente ricircolo idrico atto a garantire la buona qualità dell'acqua presente tra l'elemento di difesa e la costa (zona che generalmente risulta balneabile). L'utilizzo delle barriere sommerse richiede lo studio dell'interazione tra il moto ondoso e l'ostacolo stesso. Le barriere

sommerse provocano infatti la riduzione dell'energia trasferita e modificano notevolmente l'idrodinamica del moto ondoso incidente. Occorre quindi porre particolare attenzione alle azioni che vengono a generarsi per effetto di tale interazione, quali ad esempio la tracimazione, la trasmissione e la riflessione. Tutto questo diventa fondamentale per la progettazione delle opere e per garantire un'adeguata protezione delle zone a tergo delle medesime. Diversi studi teorici e sperimentali hanno evidenziato come l'interazione onda-barriera sommerse sia un processo fortemente non lineare, che induce profonde alterazioni del profilo ondoso incidente e della distribuzione in frequenza dell'energia ondosa trasmessa. In effetti, il passaggio dell'onda sul coronamento della struttura favorisce la generazione di armoniche di frequenza multipla rispetto alla principale. Le onde trasmesse sono costituite da una parte legata in fase alla componente fondamentale e da un'altra libera di propagarsi con celerità indipendente dalla principale. La loro interazione produce una variazione spaziale delle forme d'onda e delle caratteristiche spettrali. Il presente lavoro di tesi promuove l'approfondimento dell'argomento finora descritto, con specifico riferimento ai processi di trasmissione e riflessione ondosa indotti dalle strutture sommerse, che possono provocare pericolosi stati di mare durante la navigazione e possono aggravare eventuali fenomeni erosivi. L'obiettivo è quello di studiare la

trasformazione dell'onda in presenza di un ostacolo attraverso la stima dell'energia riflessa e trasmessa.

Articolazione del lavoro di tesi

Il presente lavoro risulta articolato in quattro principali "aree tematiche". La prima parte, costituita dai primi due capitoli, tratta la letteratura utile a cui si è fatto riferimento per la sperimentazione. Nel primo capitolo si fa riferimento alle generali caratteristiche delle onde gravitazionali, riportando la teoria lineare e quella non lineare con riferimento anche ad onde di Stokes di ordine superiore al primo (solo per completezza della illustrazione). Vengono poi spiegate due pubblicazioni che trattano ed analizzano nel dettaglio la trasformazione del moto ondoso ed il conseguente trasferimento di energia alle armoniche superiori quando un sistema di onde passa al di sopra di un ostacolo sommerso, nello specifico le pubblicazioni di Beji e Battjes (1993) e di Losada et al. (1997). Il secondo capitolo cita ed illustra la letteratura presa in esame al fine di spiegare i due principali fenomeni studiati nel corso della sperimentazione, ovvero la riflessione e la trasmissione delle onde. Sono state quindi considerate le sperimentazioni condotte da Goda e Suzuki (1976), Mansard e Funke (1980) e Lin e Huang (2004). La seconda parte è costituita dal terzo capitolo e contiene la descrizione dell'apparato sperimentale, degli strumenti di misura

adottati, e della geometria della barra. La terza parte costituisce il "corpo centrale" della tesi in quanto sono riportati i metodi utilizzati ed i risultati delle analisi svolte sia per le onde regolari, che per le onde irregolari. Per le onde irregolari è stata studiata anche l'evoluzione dello spettro di energia al di là dell'ostacolo in funzione delle caratteristiche ondose incidenti. L'ultima parte è contenuta nel sesto capitolo, in cui si riportano le discussioni in merito ai risultati ottenuti, cercando di far luce sulle possibili relazioni tra i fenomeni studiati e le caratteristiche delle onde considerate.

Capitolo 1. Generalità delle onde gravitazionali periodiche su fondali costanti e studi sperimentali dell'interazione onda-struttura

1.1 Premessa

Le soluzioni del problema differenziale della propagazione del moto ondoso affrontate in questo capitolo fanno riferimento ad una situazione ideale, dove l'onda si propaga su un fondale piatto. Tale soluzione del moto rappresenta il punto di partenza per affrontare situazioni particolari di maggiore complessità.

Nella realtà non sono rari i casi in cui il contorno del fluido risulti confinato ed il campo di moto presenti delle discontinuità batimetriche e/o ostacoli di vario tipo. Lo studio di casi di questo genere è di fondamentale importanza per giungere alla comprensione di fenomeni molto comuni nell'idraulica marittima. Il presente lavoro di tesi punta alla comprensione ed alla ricostruzione del campo di moto di un'onda che si propaga al di sopra di forti discontinuità batimetriche, quali le barre sommerse, e allo studio della risposta non lineare del moto in presenza di tali strutture.

Dopo aver introdotto la teoria lineare e quella non lineare delle onde, vengono descritti nel dettaglio due studi sperimentali in cui è stato affrontato il problema del trasferimento ondoso al di sopra di un ostacolo sommerso. Il primo lavoro discusso è quello di Beji e Battjes (1993), che propone un'indagine sperimentale sulla propagazione delle onde al di sopra di una barra sommersa di forma trapezoidale. Tale sperimentazione è per molti aspetti simile a quella che è stata condotta per questo lavoro di tesi. Viene poi riproposto il lavoro di Losada et al., pubblicato nel 1997, che analizza uno studio condotto in laboratorio riguardante la generazione di armoniche oltre un gradino poroso sommerso.

1.2 Generalità del problema differenziale della propagazione di onde regolari (monocromatiche) su fondale costante

L'onda regolare monocromatica, cilindrica piana, ha un profilo identicamente rappresentato nello spazio x , nel tempo t e nella fase ϑ . Tale onda si sviluppa su fondale orizzontale e posto a profondità costante e può essere distinta in due principali tipologie: progressiva oppure stazionaria.

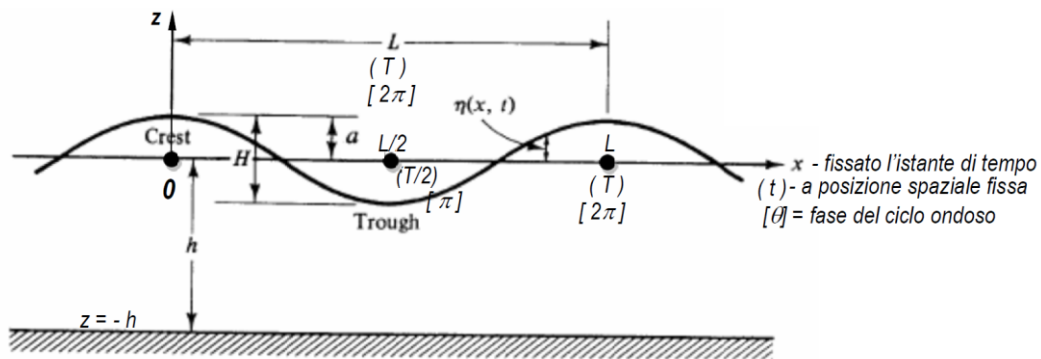


Figura 1. Schematizzazione dell'onda nel piano

La definizione delle onde passa attraverso la determinazione di alcuni fondamentali parametri:

- altezza d'onda "H" (differenza fra cresta e cavo)
- ampiezza d'onda "a" (corrisponde a metà dell'altezza d'onda)
- lunghezza d'onda "L" (distanza "spaziale" orizzontale fra due creste successive)
- periodo ondoso "T" (distanza "temporale" fra due creste successive)
- profondità dell'onda "h" (distanza fra fondo e livello medio mare)
- sollevamento " η " (rappresenta il profilo dell'onda)

-celerità "c" (velocità di traslazione del profilo nello spazio)

-numero d'onda "k" pari al rapporto $\frac{2\pi}{L}$

-frequenza d'onda "f" pari al rapporto $\frac{1}{T}$

-fase ondosa " ϑ " ovvero la frazione di periodo trascorsa rispetto ad un tempo fissato

-ripidità dell'onda "H/L"

-profondità relativa "h/L"

-altezza d'onda relativa "H/h"

Tra le varie classificazioni che possono essere fatte sul moto dei fluidi occorre dare molta importanza alla distinzione tra i moti rotazionali (le particelle liquide elementari ruotano rispetto al proprio asse) ed irrotazionali (le particelle non ruotano rispetto al proprio asse di riferimento). Il vantaggio di un moto fluido irrotazionale è di tipo analitico ovvero le componenti della velocità possono essere rappresentate con un'unica funzione detta "potenziale di velocità" tale che:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} ; v = \frac{\partial \phi}{\partial y} ; w = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad [1.1]$$

In generale il moto delle onde liquide può considerarsi irrotazionale dalla superficie fino in prossimità del fondo dove invece risulta essere rotazionale. Ciò significa che gran parte della massa fluida può essere trattata come caso di moto irrotazionale. In tal caso è possibile definire l'equazione di Bernoulli come:

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{p}{\rho} + gz = C(t) \quad [1.2]$$

La costante $C(t)$ è una funzione generica del tempo.

Per quanto invece riguarda l'equazione di continuità può scriversi come:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = \nabla^2 \phi = 0 \quad [1.3]$$

che costituisce la fondamentale equazione di Laplace alle derivate parziali del secondo ordine risolubile ed integrabile nell'unica incognita della funzione potenziale, che si presenta in forma lineare.

1.3 Teoria lineare

La difficoltà di tale teoria ondosa (lineare) sta nel fatto che, mentre le condizioni al contorno sul fondo ed alle superfici laterali sono relativamente semplici, quelle da prevedere sulla superficie libera creano molti problemi. Anzi, non solo non conosciamo le velocità e quindi l'andamento del potenziale lungo tale superficie di frontiera, ma non sappiamo neanche dove andrebbe applicato tale andamento, essendo incognita la forma della superficie stessa. Le condizioni cinematiche sulla superficie non sono dunque adeguate, però è noto il valore della pressione sulla superficie libera (condizione dinamica), che è naturalmente quello della pressione atmosferica. Questo valore è legato alle velocità nel Teorema di Bernoulli, quindi la questione sembrerebbe chiarirsi. Tuttavia, il legame di Bernoulli non è

lineare, ma quadratico in funzione della velocità V , quindi la non-linearità seppur in maniera molto più debole, persiste. Alla base della teoria ondosa lineare ci sono delle importanti ipotesi:

-moto piano o bidimensionale

-fluido newtoniano incompressibile (omogeneo ed incompressibile, cioè $\rho = \text{costante}$)

-fluido perfetto, ideale o non viscoso ($\nu = 0$)

-moto turbolento ed irrotazionale ($\text{rot } \mathbf{v} = 0$)

-fondo orizzontale, rigido, fisso ed impermeabile

-onde di piccola ampiezza (rispetto alla profondità) ovvero $H \ll h$ (ipotesi introdotta da Airy da cui prende il nome la stessa teoria descritta).

Quest'ultima approssimazione, in condizioni di quiete, consente di confondere il profilo della superficie libera con quello del livello medio mare.

Lo studio parte dall'equazione di Laplace precedentemente descritta, le cui soluzioni sono fornite da d'Alembert tramite il metodo di separazione delle variabili che consente di trasformare

l'equazione differenziale alle derivate parziali in un'equazione differenziale alle derivate totali, in particolare si ottiene una soluzione dall'andamento sinusoidale (armonico) che può essere espressa come prodotto di tre termini come segue:

$$\phi(x,z,t) = X(x)Z(z)T(t) \quad [1.4]$$

Per far questo bisogna fornire, per il dominio di interesse studiato, 5 condizioni al contorno illustrate nella seguente rappresentazione:

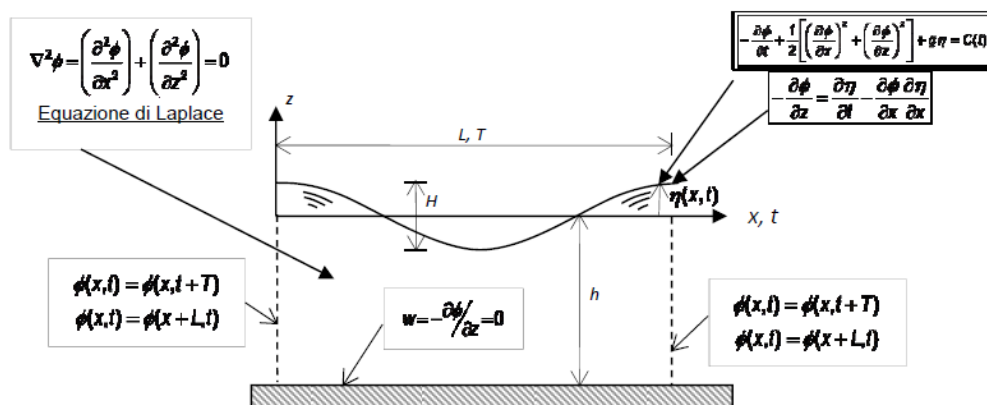


Figura 2 Schema del problema e delle condizioni al contorno

-condizione al contorno su fondale orizzontale in termini di potenziale: $w = -\frac{\partial\phi}{\partial z} = 0$ [1.5] in $z=-h$, da questo si può facilmente assumere che la velocità verticale al fondale sia nulla.

-condizione al contorno cinematica sulla superficie libera:

$$-\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} \text{ in } z = \eta(x, t) \quad [1.6]$$

Partendo dalla componente w e sviluppando in serie di Taylor, trascurando i termini superiori al primo si ottiene la relazione di dispersione $\sigma^2 = gk \tanh(kh)$ [1.7] da cui è possibile ricavare, per differenza tra due onde stazionarie, il potenziale cinetico di un'onda progressiva

$$\phi = -\frac{H g}{2 \sigma} \frac{\cosh(k(h+z))}{\cosh(kh)} \sin(kx - \sigma t) \quad [1.8]$$

Nonché il profilo della superficie libera di un'onda progressiva

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \quad [1.9]$$

-condizione al contorno dinamica sulla superficie libera:

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] + gh = C(t) \text{ in } z = \eta(x, t) \quad [1.10]$$

Partendo dall'equazione di Bernoulli, sviluppando in serie di Taylor e trascurando tutti i termini non lineari, si può definire il potenziale cinetico di un'onda stazionaria:

$$\phi = \frac{H g \cosh(k(h+z))}{2 \sigma \cosh(kh)} \cos(kx) \sin(\sigma t) \quad [1.12]$$

Nonché il profilo della superficie libera di un'onda stazionaria

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx) \cos(\sigma t) \quad [1.13]$$

-condizioni al contorno laterali:

$$\phi(x, z, t) = \phi(x+L, z, t) \quad [1.14]$$

Poichè X e Z sono dipendenti ciascuna da una sola variabile indipendente, nell'equazione di Laplace le derivate parziali possono essere trasformate in derivate totali. Sostituendo l'eq. 1.14 nell'equazione di Laplace e dividendo i membri ottenuti per la funzione potenziale, si ottiene un sistema di due equazioni differenziali che si possono risolvere separatamente in funzione di una costante k detta costante di separazione. Per il sistema di equazioni l'unica soluzione fisicamente accettabile è quella per cui $k^2 > 0$. Il risultato finale dell'applicazione di tale condizione al contorno non è altro che l'individuazione del "numero d'onda" $k = \frac{2\pi}{L}$ ricordando L=lunghezza d'onda;

$$\phi(x, z, t) = \phi(x, z, t+T) \quad [1.15]$$

questa condizione permette di ricavare la "frequenza angolare"

$\sigma = \frac{2\pi}{T}$ ricordando T =periodo ondoso.

1.4 Teoria non lineare

La teoria lineare si fonda sull'ipotesi che i valori delle grandezze dei parametri di ampiezza, lunghezza e velocità delle particelle siano così piccoli, rispetto alla profondità, da poterne trascurare i quadrati e le potenze superiori. Nel caso di valori "grandi" occorre far riferimento alla teoria non lineare o delle onde di ampiezza finita. Mentre, come già visto, la teoria lineare può considerarsi applicabile, pur con le ovvie approssimazioni, a tutte le diverse condizioni di mare e di acque di profondità relative, gli studiosi di idraulica marittima sono concordi nell'affermare che il problema, nel caso delle onde di ampiezza finita, possa essere risolto impiegando generalmente tre differenti teorie come illustrato in Figura 3, ognuna delle quali, in relazione ai parametri propri dell'onda, è applicabile entro determinati limiti del rapporto h/L .

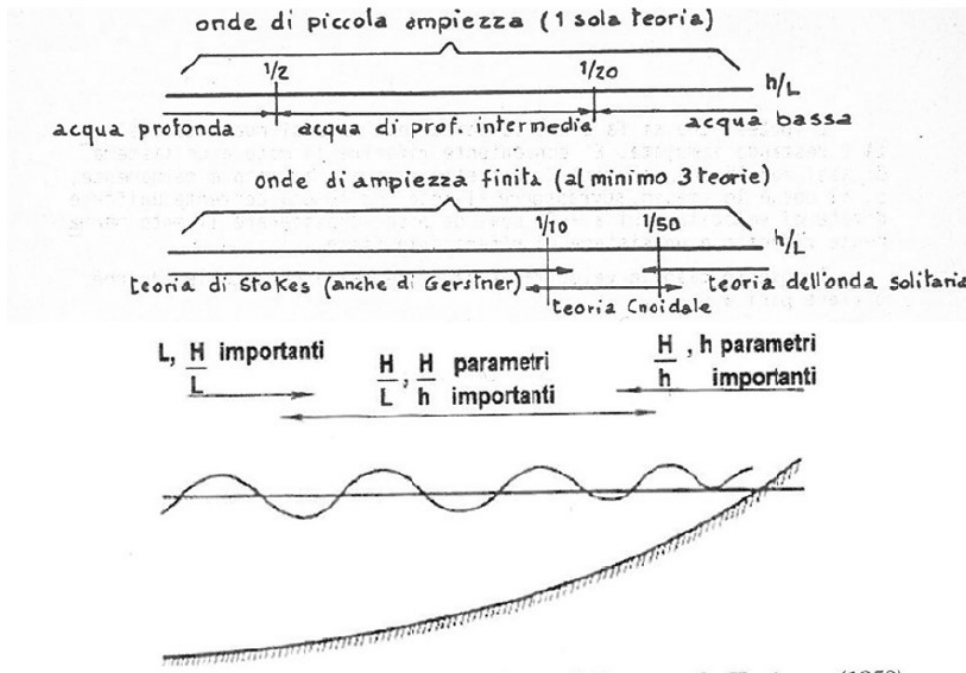


Figura 3 Classifica delle onde di ampiezza finita secondo Keuegan

Tra i metodi di risoluzione più noti, vanno ricordati quelli che utilizzano, nell'espressione della funzione potenziale a base della trattazione analitica, lo sviluppo in serie di potenze (la serie di Taylor) di un parametro caratteristico dell'onda (adimensionale). Generalmente, si fa riferimento al rapporto di ripidità H/L ovvero al rapporto di altezza d'onda relativa H/h . Quando si fa riferimento allo sviluppo in serie del parametro di H/L la formulazione analitica conduce alla "Teoria di Stokes". Arrestando lo sviluppo in serie alla prima potenza, si ottiene la soluzione del problema al primo ordine di approssimazione, coincidente con la teoria lineare. Arrestando lo sviluppo in serie alla potenza ennesima del parametro di ripidità H/L si ottiene la

soluzione del problema, cosiddetto di *Stokes*, all' n -esimo ordine di approssimazione (primo, secondo, terzo, quarto, quinto ecc.). Se viceversa si utilizza nello sviluppo in serie il parametro di H/h , la formulazione analitica del problema conduce alla "Teoria cnoidale". Infine, la "Teoria dell'onda solitaria" costituisce il caso limite della teoria cnoidale. Al fine di poter scegliere al meglio la teoria più opportuna si fa riferimento al "parametro di Ursell" $U = \frac{HL^2}{h^3}$ [1.16], se quest'ultimo risulta inferiore di 25 allora sarà opportuno utilizzare la teoria stokiana, viceversa si dovrà fare riferimento alla teoria cnoidale.

1.5 Le onde di Stokes

Per tener conto dei termini di ordine superiore al primo nella teoria di Stokes si adotta il metodo risolutivo detto di "perturbazione della soluzione", che consiste nell'assumere che la soluzione possa essere rappresentata da una serie di potenze del "parametro perturbativo" ($k \cdot a$), di entità modesta, che rappresenta la ripidità ondosa (essendo, infatti, dato dal numero d'onda per l'ampiezza, che, di fatto, risulta proporzionale al termine H/L). Tale soluzione viene sviluppata per successive approssimazioni, a partire dalla soluzione lineare, in modo tale che la soluzione perturbata converga quanti più termini vengano presi in considerazione nell'espansione in serie. Il potenziale di velocità ed il profilo superficiale possono essere rispettivamente espressi come:

$$\phi(x,z,t) = ka\phi_1 + (ka)^2\phi_2 + \dots + (ka)^n\phi_n \quad [1.17]$$

$$\eta(x,z,t) = ka \eta_1 + (ka)^2 \eta_2 + \dots + (ka)^n \eta_n \quad [1.18]$$

1.5.1 Teoria di Stokes al secondo ordine

Fermando l'espansione in serie al secondo ordine di approssimazione, si ottiene la teoria cosiddetta al secondo ordine

il cui potenziale di velocità ed il profilo superficiale possono essere indicati come:

$$\phi(x,z,t) = ka\phi_1 + (ka)^2\phi_2 \quad [1.18]$$

$$\eta(x,z,t) = ka \eta_1 + (ka)^2 \eta_2 \quad [1.19]$$

Le quattro condizioni rispettate al primo ordine debbono necessariamente essere rispettate anche per il secondo ordine. Il potenziale di velocità ed il profilo dell'onda sono costituiti da due componenti armoniche accoppiate. La prima, fondamentale, coincidente con quella al primo ordine, mentre la seconda, che presenta una frequenza doppia rispetto alla prima, diventa sempre più importante al diminuire della profondità. Nella figura seguente si può osservare il confronto tra un'onda sinusoidale (Stokes al primo ordine) e un'onda al secondo ordine di approssimazione.

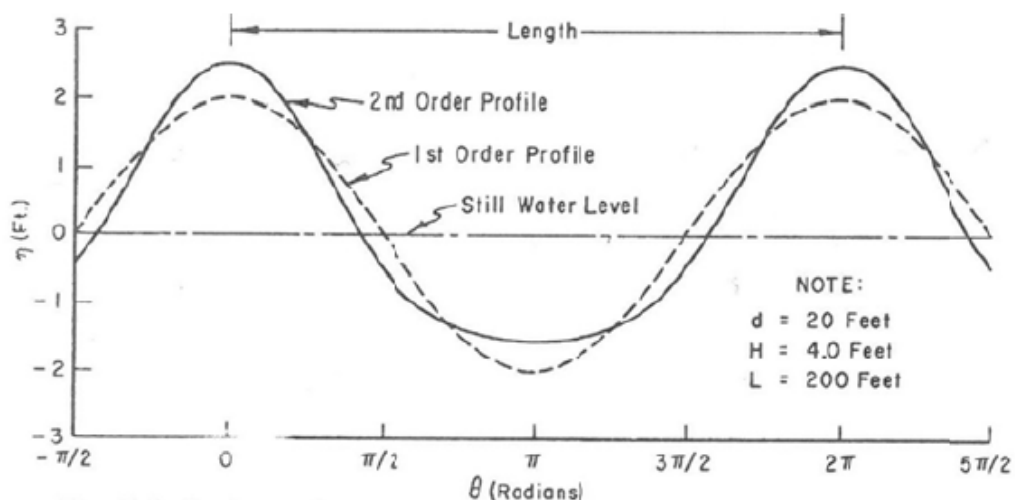


Figura 4 Confronto tra profilo di primo e secondo ordine

Occorre inoltre tener presente che le orbite che descrivono il movimento particellare del fluido non risultano più perfettamente chiuse. Questo significa che, seppur in maniera molto piccola, si verifica un trasporto di massa d'acqua nella direzione di propagazione, differenziato anche in funzione della profondità. Nello specifico, al diminuire del fondale, l'orbita (non chiusa) tende ad allungarsi.

1.5.2 Teoria di Stokes al terzo ordine

Fermandosi ai primi tre termini dello sviluppo in serie, si ottiene la suddetta teoria al terzo ordine il cui potenziale di velocità ed il profilo superficiale possono essere indicati come:

$$\phi(x,z,t) = ka\phi_1 + (ka)^2\phi_2 + (ka)^3\phi_3 \quad [1.20]$$

$$\eta(x,z,t) = ka \eta_1 + (ka)^2 \eta_2 + (ka)^3 \eta_3 \quad [1.21]$$

Le quattro condizioni rispettate al primo ordine debbono necessariamente essere rispettate anche per il secondo e per il terzo ordine. Tale discorso può ovviamente essere esteso fino all'ordine n.

1.6 Beji e Battjes: indagine sperimentale della propagazione delle onde su una barra

Tale articolo tratta una serie di esperimenti eseguiti in laboratorio per studiare il fenomeno della generazione di energia ad alta frequenza osservata negli spettri di onde che viaggiano su barre sommerse. L'accurato studio dell'onda nella zona costiera da sempre risulta essere al centro dell'attenzione dell'ingegneria costiera, infatti, a differenza della condizione di acque profonde ($h/L > 0,5$), nelle zone definite di acque basse ($h/L < 0,05$) l'onda subisce delle forti alterazioni in funzione appunto della topografia del fondo. Riflessione, rifrazione, diffrazione e frangimento sono i principali fenomeni legati alla propagazione del moto ondoso. Nello studio di Beji e Battjes, vengono analizzate sia onde frangenti che onde non frangenti. In generale il fenomeno del frangimento può essere studiato in una duplice manifestazione: la pre-rottura dell'onda caratterizzata da una sequenza di moti ordinati con conseguente irripidimento dell'onda (si ricorda che superati i valori limite in acqua alte, medie e basse della ripidità dell'onda indicata come H/L , quest'ultima tende a frangere) e una seconda fase caratterizzata da un moto caotico e turbolento responsabile della dissipazione energetica. Quest'ultima fase conserva una parte di irrotazionalità associata al restante moto ondoso, che non risulta

quindi del tutto disordinato. Una volta avvenuto il frangimento, l'onda può comportarsi in due modi diversi ovvero riprendere la sua natura "laminare", oppure, mantenere la turbolenza e continuare a frangere fino alla completa dissipazione dell'energia posseduta. Cosa nota e degna di approfondimento è il fatto che sopra l'ostacolo l'energia è trasmessa con un sistema di creste multiple (armoniche superiori) caratterizzate da lunghezze più corte delle onde incidenti.

L'indagine sperimentale di Beji e Battjes è stata condotta in un canale della lunghezza di 37,7 m, di larghezza pari a 0,80 m e di altezza pari a 0,75 m. Il tirante idrico alla generazione risultava essere di 0,40 m. L'ostacolo sommerso aveva un'altezza di 0,30 m, una pendenza lato mare 1:20 e una pendenza lato riva 1:10. Il canale terminava con una spiaggia assorbente con pendenza di 1:25. L'onda era generata attraverso un ondogeno meccanico a pistone idraulico, collegato elettronicamente ad un pc dedicato. Sono state condotte prove con onde regolari e onde irregolari caratterizzate da spettri di tipo Jonswap. Durante la prova la superficie libera era misurata attraverso delle sonde resistive posizionate in otto punti equidistanziati (1m). Prima di ogni prova le sonde erano opportunamente calibrate e i segnali registrati sono stati elaborati sia nel dominio del tempo che nel dominio delle frequenze.

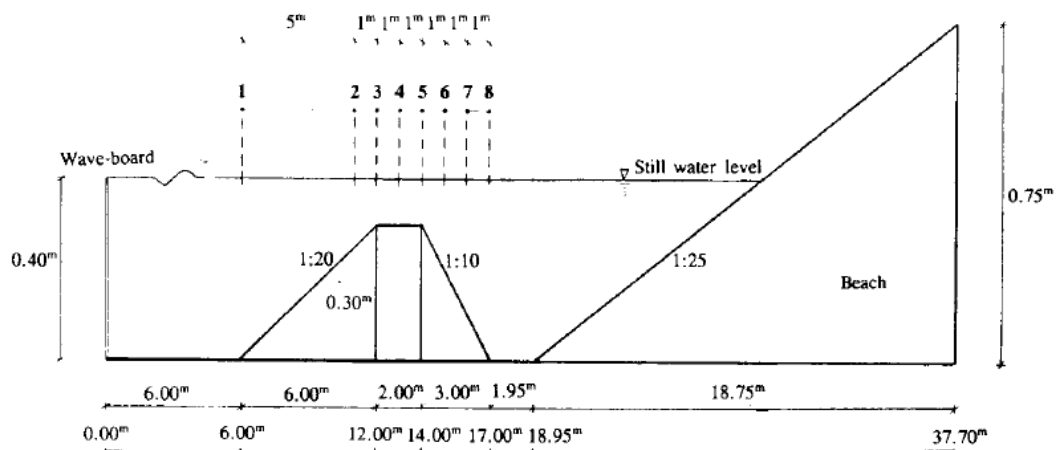


Figura 5 Schema geometrico dello studio sperimentale di Beji e Battjes (1993)

Per distinguere gli effetti dovuti alle interazioni non lineari tra le onde da quelli dovuti al frangimento, Beji e Battjes hanno testato sia onde frangenti che onde non frangenti. Inoltre, per cogliere al meglio gli aspetti nettamente diversi delle onde a bassa ed alta frequenza sono state selezionate due frequenze "limite" ovvero 0,4 Hz e 1,0 Hz; nel primo caso si fa riferimento ad onde lunghe, nel secondo ci si riferisce ad onde corte. In totale sono state realizzate 12 diverse combinazioni: 2 spettri (Jonswap e un altro personalizzato ma a banda molto stretta), 2 frequenze e 3 altezze d'onda. Ogni prova è stata ripetuta per 5 volte per ridurre l'errore statistico delle elaborazioni spettrali, per un totale complessivo di 60 prove per onde irregolari al quale aggiungere 6 prove aggiuntive con onde monocromatiche.

L'analisi dei risultati fa emergere che le onde lunghe sviluppano onde "di coda" che di fatto risultano "libere". Propagandosi verso profondità maggiori, le onde si decompongono in onde di ampiezza più piccola e di frequenza quasi armonica; tale decomposizione, innescata dall'effetto di de-shoaling, sembra avviarsi in maniera brusca e lo spettro, inizialmente a banda stretta, si trasforma in uno spettro a banda larga. Per quanto invece riguarda le onde corte, non si nota uno sviluppo di un'onda "di coda". Le onde crescono in altezza durante la fase di shoaling ma mantengono la simmetria verticale ed appaiono come onde di Stokes di ordine superiore. Il diverso comportamento delle onde lunghe e delle onde corte è evidente nei risultati di Figura 8, che mostra le registrazioni della superficie libera per le due frequenze diverse.

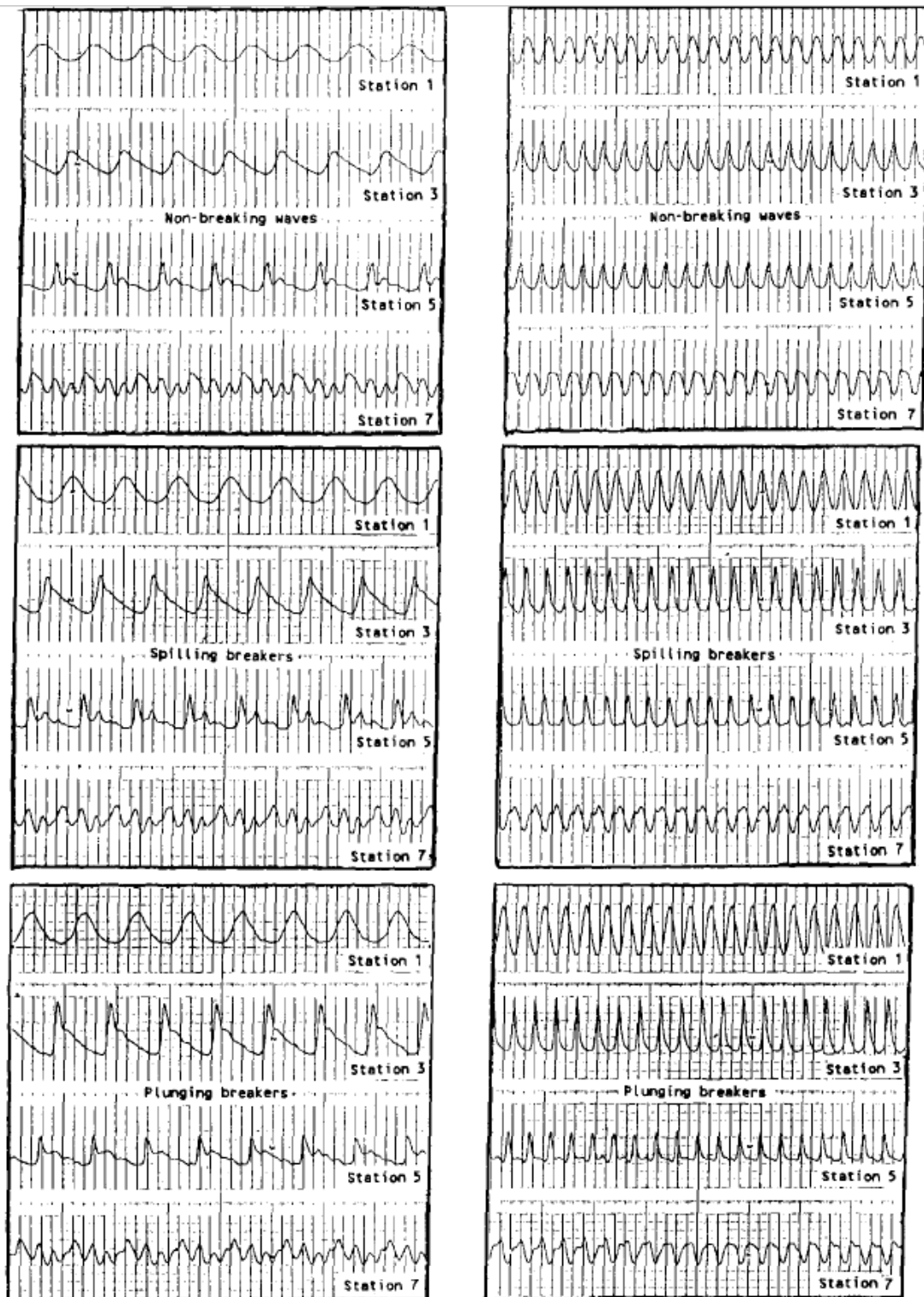


Figura 6 RegISTRAZIONI della superficie dell'onda che mostrano l'evoluzione di (a) onde lunghe ($f=0.4$ Hz) e (b) onde corte

($f= 1.0$ Hz).

Nell'analisi dell'evoluzione spettrale (Figura 9) si nota come le caratteristiche generali dello sviluppo della forma degli spettri non differiscono in modo significativo per le tre condizioni prese in considerazione, ovvero onde che non frangono, onde con frangimento di tipo "spilling" ed onde con frangimento di tipo "plunging". Per poter valutare tale aspetto sono stati confrontati gli spettri di densità di energia normalizzati. La normalizzazione è tale che l'area totale individuabile al di sotto dello spettro, per ogni caso preso in esame, risulta pari all'unità. Confrontando gli spettri normalizzati, Beji e Battjes hanno osservato che l'evoluzione spaziale dello spettro è molto simile nelle tre condizioni.

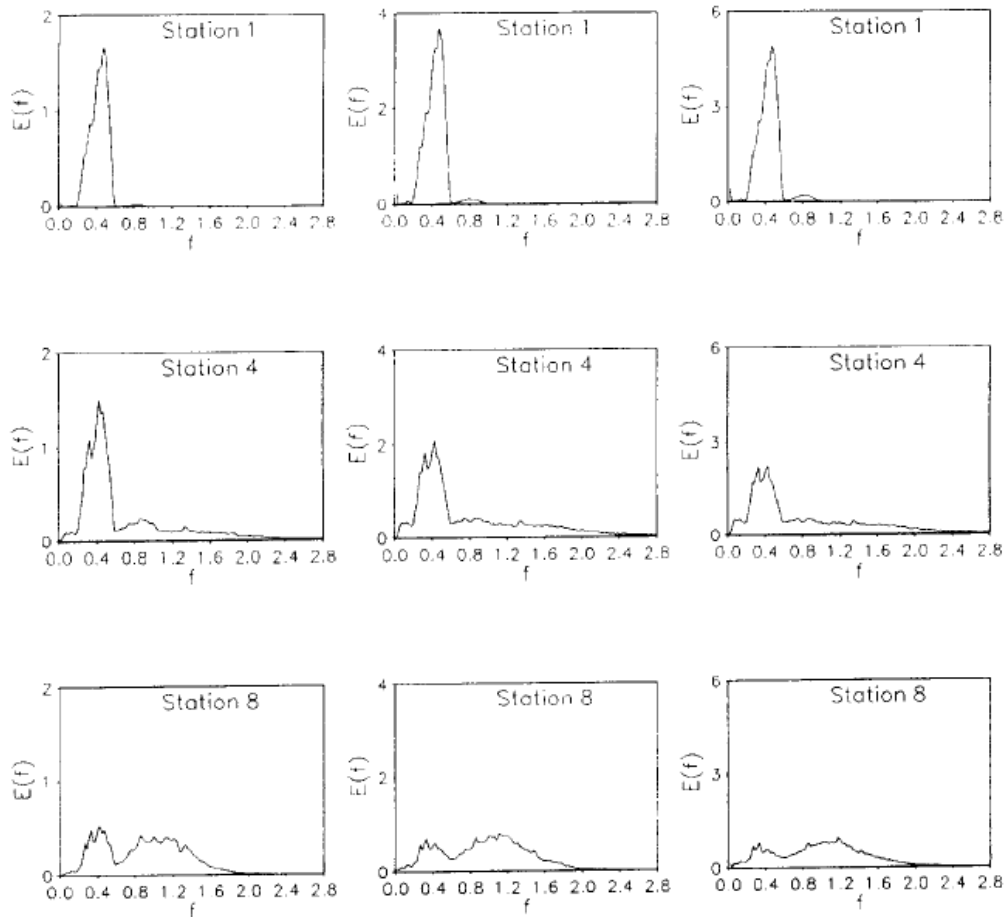


Figura 7 Evoluzione spettrale per onde non frangenti (a sinistra), onde frangenti di tipo spilling (al centro) e onde frangenti di tipo plunging (a destra)

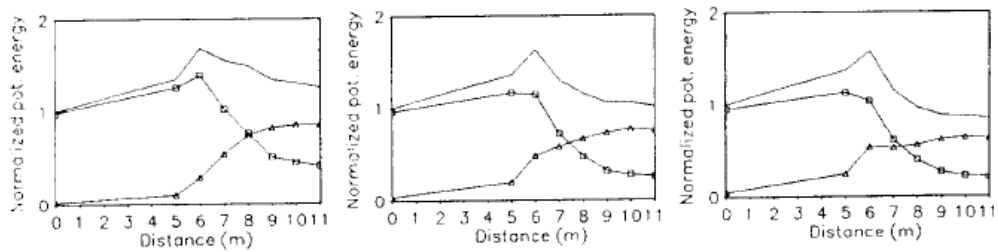


Figura 8 Variazione spaziale dell'energia potenziale normalizzata per le varie onde definite

Beji e Battjes concludono che i risultati ottenuti dal loro studio possono essere considerati validi per barriere leggermente inclinate rispetto al fondo. Inoltre, in assenza della parte di "piano orizzontale" sulla barriera, la quantità di energia trasferita dalla frequenza primaria alle armoniche secondarie sarebbe stata inferiore. Il fenomeno del disaccoppiamento armonico, che avviene quando le onde si propagano nell'acqua più profonda (dopo l'ostacolo), gioca un ruolo molto importante nella decomposizione dell'onda e nella redistribuzione dell'energia totale tra l'onda primaria e le armoniche secondarie, determinando così la forma spettrale finale. Gli Autori sostengono inoltre che il frangimento dell'onda è un effetto secondario rispetto alla generazione di energia ad alta frequenza.

1.7 Losada et al.: generazione di componenti armoniche oltre un gradino poroso sommerso

Gli esperimenti di Losada et al. (1997) sono stati condotti in un canale per onde per studiare l'evoluzione armonica di onde che si propagano ed interagiscono con una barra sommersa. I risultati sono stati utilizzati come analisi preliminare per poter definire alcuni parametri per la progettazione ingegneristica marittima. Gli Autori dimostrano come la variazione della profondità dell'acqua e l'effettivo tirante disponibile sul gradino influenzano significativamente la generazione di armoniche a valle dell'ostacolo. I frangiflutti sommersi rappresentano una grande forma di difesa in mare aperto per le zone costiere presenti. In generale la sommergenza non produce mai una riflessione totale dell'onda incidente; considerando anche il fatto che molte di queste strutture sono porose, una parte dell'onda tende ad attraversare la struttura posta in essere. L'obiettivo finale risulta quindi essere quello di ridurre l'energia dell'onda trasmessa attraverso il fenomeno della riflessione e della dissipazione. Pertanto, gli obiettivi principali di questo documento come analisi iniziale del problema sono:

- migliorare la conoscenza dei progettisti relativamente agli effetti della struttura sulla potenziale generazione di armoniche a seguito dell'interazione onda-struttura

-stabilire il campo di applicazione di un modello lineare quanto più spendibile possibile per analizzare il processo di trasformazione delle onde su frangiflutti sommersi tenendo conto, qualora ci fosse, della porosità della barra in esame.

-definire un parametro utile per determinare in maniera distinta se la generazione di armoniche può verificarsi o meno per le onde che impattano sulle strutture precedentemente definite.

La progettazione di una struttura costiera richiede la considerazione di tre importanti fattori: la geometria della struttura, le caratteristiche delle onde e la permeabilità del materiale. Lo studio analizzato considera b/L variabile tra 0,23 e 0,49, h_1/h_2 pari a 1,23 ed infine A_i/h_1 variabile tra 0,021 e 0,045; dove b è la larghezza della struttura, L è la lunghezza dell'onda, h_1 è l'altezza dell'acqua alla generazione, h_2 è il tirante idrico al di sopra del gradino, infine A_i corrisponde all'ampiezza dell'onda incidente.

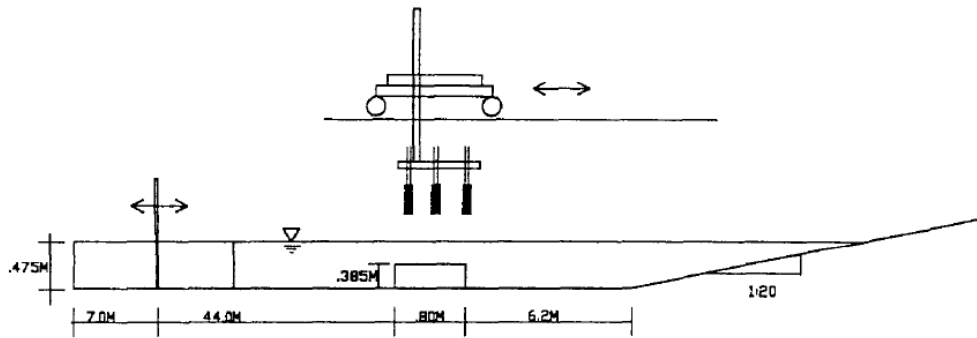
In questo articolo il problema viene inizialmente affrontato assumendo ipoteticamente che le onde riflesse e trasmesse siano

della stessa forma lineare monocromatica dell'onda incidente. Si osserva poi che la generazione armonica avviene sul gradino sommerso nel momento in cui $\delta=A/h$ è grande mentre $\mu=kh$ è piccolo dove A è l'ampiezza dell'onda, h è la profondità dell'acqua ferma e k corrisponde al numero d'onda, con il conseguente fenomeno che l'energia viene trasferita dalla prima frequenza armonica a suoi multipli interi in fase con la prima. In generale, sul bordo anteriore del gradino, gli effetti non lineari sono appena percettibili, tuttavia, nella regione di acqua intermedia sopra il gradino, gli effetti non lineari diventano significativi a causa dell'aumento del rapporto tra altezza dell'onda e profondità dell'acqua. La decomposizione in onde più corte avviene immediatamente dopo il passaggio sulla struttura e l'onda trasmessa si propaga come onde non lineari con componenti a frequenza multipla.

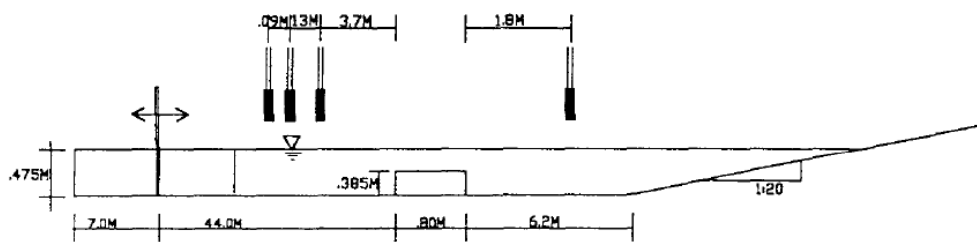
Gli esperimenti sono stati condotti in un canale per onde dalla nota geometria, lungo 69 m, largo 2 m ed alto 2 m, con pareti vetrate. All'estremità del canale è stata realizzata una spiaggia con pietrisco, in grado di attuare un assorbimento dell'energia trasportata dalle onde. La spiaggia ha quindi una geometria ben definita con una pendenza approssimativa di 1:20 e si trova a una distanza pari a 51 m rispetto alla posizione della pala generatrice. Anche i frangiflutti utilizzati per i vari esperimenti

sono a geometria definita, con lunghezza di 0,80 m, altezza di 0,385 m e larghezza pari ad 1 m, poiché il canale è stato diviso in due parti. Durante la fase di sperimentazione il livello idrico alla generazione è stato mantenuto costante e pari a 0,475 m.

Per monitorare la variazione del livello superficiale idrico sono state utilizzate sette sonde resistive. Tali misuratori erano posizionati in due modi separati. Nella prima configurazione, erano stazionari e posti su treppiedi in posizioni specifiche. Nella seconda configurazione sono stati usati altri tre misuratori per registrare i profili della superficie dell'acqua, posizionati questa volta su un carrello mobile azionato meccanicamente ed in grado di operare tra 34,5 m e 58,0 m nel canale. Tutti i test sono stati eseguiti per un periodo di 120 s, scartando i primi 30 s per filtrare ed ottenere dei dati significativi più "puliti". Tale studio è stato condotto per tre diversi tipi di ostacolo a permeabilità differente, e, seppur non risulta essere l'obiettivo ultimo, sono state comunque valutate le condizioni di riflessione e trasmissione del moto ondoso.



MOVING CART RUNS



REFLECTION / TRANSMISSION RUNS

Figura 9 Posizionamento delle sonde per lo studio di Losada et al. (1997)

I dati analizzati sono stati ottenuti elaborando le registrazioni delle sonde e i coefficienti di riflessione e trasmissione sono stati studiati in funzione di kh . Dai risultati si può osservare come la riflessione tende a diminuire con l'aumentare della porosità, ed eccezione di alcuni picchi dovuti all'effetto di risonanza all'interno del canale. La trasmissione mostra invece risultati diversi che possono essere riassunti in due punti:

-per una data geometria, la trasmissione aumenta drasticamente con l'aumento porosità

-per un dato materiale e una data geometria, la trasmissione varia leggermente al variare della profondità relativa.

Tale articolo riporta una serie di risultati grafici che si cerca di riassumere in maniera quanto più completa possibile. La generazione e la crescita delle armoniche sulla struttura e la loro progressione sono ottenute analizzando tutte le registrazioni per tutte le posizioni del carrello mobile. Sono stati calcolati gli spettri di densità di energia ed i parametri spettrali associati. Le serie temporali acquisite mostrano forme d'onda fortemente non lineari in cima alle strutture, che iniziano a dividersi in una serie di onde più piccole dietro alle strutture. Nel caso della struttura impermeabile, dove non ci sono significativi effetti dissipativi dovuti all'attrito, i modi armonici sono variabili, includendo una crescita considerevole della prima armonica sulla prima porzione della struttura, che a sua volta viene trasferita alle componenti di frequenza più alte. L'onda incidente a monte del gradino indica che quasi tutta l'energia viene trasmessa ad una singola frequenza. Sul gradino si osserva un trasferimento di energia alle armoniche superiori ma non si riscontra un effetto evidente sulla forma dell'onda. Progredendo sul gradino si nota un aumento di tutte le ampiezze armoniche e un effetto risultante sulla forma

d'onda. Nel caso di impermeabilità si evidenzia che la seconda armonica è dominante rispetto alle armoniche superiori dietro alla struttura, cosa che invece non accade nel caso di strutture permeabili dove si riduce la differenza di ampiezza tra tutti i modi armonici superiori e l'energia trasmessa è importante anche nella terza e quarta armonica. L'evoluzione dell'ampiezza dimostra come la permeabilità influenza fortemente le caratteristiche dissipative, inoltre, la maggiore componente di attrito coinvolta si traduce in una maggiore riduzione dell'ampiezza della prima armonica.

Per quanto riguarda la modellazione teorica dell'evoluzione dell'altezza d'onda, il principale scopo di questa sezione è quello di trovare un modello di facile utilizzo che possa favorire anche la progettazione ingegneristica fornendo dei dati di ragionevole precisione. Tale articolo riporta come l'altezza d'onda teorica differisce da quella sperimentale poiché quella teorica risulta essere sovrastimata. Ciò sembra dovuto al trasferimento sul gradino dell'energia alle armoniche superiori con conseguente deformazione del profilo ondoso, questo sembra manifestarsi quasi esclusivamente per le strutture impermeabili in quanto in quelle permeabili il modello lineare restituisce un notevole miglioramento sullo sviluppo dell'altezze d'onda.

Passando alle considerazioni conclusive si possono mettere in luce alcuni aspetti emergenti:

- L'effetto della porosità che caratterizza la barra sommersa risulta influenzare in maniera significativa ma non predominante il fenomeno della riflessione che si manifesta nello spazio di mare tra la generazione e l'ostacolo, allo stesso modo la risonanza può verificarsi indistintamente dal tipo di materiale applicato per la costruzione del frangiflutti. Al contrario la trasmissione è fortemente influenzata dalla porosità della struttura e viene fortemente ridotta all'aumentare di essa.

- La generazione di armoniche superiori è legata alla profondità dell'acqua alla generazione, al di sopra della struttura e all'altezza dell'onda sulla barra.

- I casi di strutture impermeabili prevedono un forte aumento dell'energia trasportata alla prima armonica con conseguente forte decomposizione, mentre, per quanto riguarda quelle permeabili parte dell'energia viene assorbita e parte viene trasmessa con formazione di armoniche.

- Per le strutture permeabili il modello lineare dà una migliore risposta dell'evoluzione della superficie libera dell'onda.

- La profondità effettiva dell'acqua sopra un ostacolo risulta un parametro chiave per sviluppare, analizzare e comprendere il fenomeno della generazione armonica per interazione tra moto ondoso ed ostacolo sommerso.

Capitolo 2. Riflessione e trasmissione del moto ondoso

2.1 Premessa

La riflessione ondosa è un fenomeno di fondamentale importanza, sia per gli effetti che determina sull'evoluzione dei fondali antistanti le opere che la provocano, sia per le problematiche che crea alla navigazione, soprattutto per le piccole imbarcazioni, nelle aree antistanti gli sbarramenti e, ancor più, all'interno dei bacini portuali. Può succedere, infatti, che l'interazione tra le onde incidenti e le onde riflesse da una struttura provochi la formazione di onde stazionarie nella zona di mare antistante la struttura stessa, che possono incidere pesantemente sulla morfologia dei fondali nel caso di fondali di natura sabbiosa. Non è raro, infatti, trovare delle vere e proprie fosse di erosione al piede delle strutture, per le quali spesso viene compromessa la stabilità della struttura stessa, a causa dello scivolamento dei massi al piede dell'opera. Il fenomeno spesso è aggravato dalla non ortogonalità della direzione di propagazione del moto ondoso rispetto all'asse longitudinale della struttura, che favorisce la formazione di correnti litoranee per le quali si instaura un consistente trasporto solido. Altrettanto importante risulta essere la trasmissione del moto

ondoso, ovvero il processo con il quale avviene la trasformazione delle principali caratteristiche dell'onda, in particolar modo nelle sue componenti, a seguito del passaggio su di un ostacolo sommerso. È importante quindi valutare il coefficiente caratteristico di trasmissione, generalmente ricavato dal rapporto tra altezza d'onda trasmessa ed altezza d'onda incidente, ma altrettanto importante è l'analisi dell'evoluzione spettrale a monte e a valle dell'ostacolo presente, determinando quando possibile qualche correlazione con le caratteristiche ondose.

2.2 La riflessione del moto ondoso

Le opere a mare, investite da moto ondoso, possono originare sia il fenomeno di frangimento che implica forti sollecitazioni sulle strutture, sia il fenomeno precedentemente citato della riflessione. Occorre quindi essere a conoscenza del modo in cui le strutture tendono ad operare; in generale vale la relazione:

$$H_i^2 = H_r^2 + H_p^2 + H_t^2 \quad [2.1]$$

Ovvero il quadrato dell'onda incidente è pari alla somma dei quadrati delle onde riflessa, dissipata e trasmessa. L'onda riflessa dipende dalle caratteristiche dell'ostacolo e dalla ripidità dell'onda a largo. Per la riflessione del moto ondoso vale la regola che l'angolo di riflessione è pari all'angolo di incidenza,

ovvero la direzione del moto ondoso riflesso forma con la normale all'ostacolo un angolo uguale all'angolo che forma il moto ondoso incidente. In generale, in presenza di elevata pendenza della spiaggia o di opere foranee, con paramento frontale comunque inclinato, si verifica il fenomeno della riflessione e le onde seguono le leggi dell'ottica geometrica (angolo di riflessione uguale a quello d'incidenza) e formano le cosiddette onde stazionarie.

2.2.1 Il fenomeno della riflessione ondosa parziale e le caratteristiche delle onde stazionarie parziali

Nella realtà la riflessione non risulta quasi mai totale o perfetta, ma parziale, nel senso che l'energia dell'onda riflessa è, appunto, minore di quella dell'onda incidente di altezza H_i per cui si può definire anche un "coefficiente di riflessione", K_{rifl} pari al rapporto tra l'altezza dell'onda riflessa e quella dell'onda incidente: H_r/H_i . Parte dell'energia è assorbita/dissipata dall'ostacolo, generalmente scabro, mentre parte è trasmessa attraverso l'ostacolo, facilmente poroso. Per una superficie perfettamente riflettente il coefficiente sarà pari ad 1, mentre per superfici a pendenza molto ridotta lo stesso coefficiente sarà molto minore. K_{rifl} può essere assegnato con formule empiriche in funzione di valori misurati a distanza di qualche lunghezza d'onda dalla parete riflettente. Come si ripete, nelle vicinanze della parete si

verifica un fenomeno di interferenza tra onde incidente e riflessa, con la generazione di un'onda stazionaria con contenuto energetico più elevato di quello della singola onda incidente. Per i casi di onde puramente stazionarie, costituiti dalla sovrapposizione di coppie di onde progressive di uguali altezza, periodo e direzione, ma propaganti in versi opposti, si tratta del fenomeno di riflessione perfetta, come quello di un'onda incidente un muro verticale perfettamente riflettente. Invece, per esaminare il caso di riflessione parziale, si assume che l'onda incidente abbia altezza H_i , mentre l'onda riflessa abbia un'altezza H_r (minore) ed, in generale, può avere anche una fase un poco differente da quella dell'onda incidente, mentre i periodi ondosi sono gli stessi. Il profilo dell'onda totale di fronte all'ostacolo è dato dalla relazione:

$$\eta(x,t) = \frac{H_i}{2} \cos(kx - \sigma t) + \frac{H_r}{2} \cos(kx + \sigma t + \varepsilon) \quad [2.2]$$

dove ε è lo sfasamento indotto dal processo di riflessione.

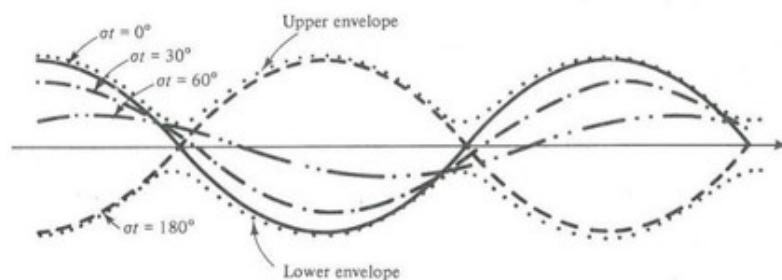


Figura 10 Superficie libera dell'onda risultante

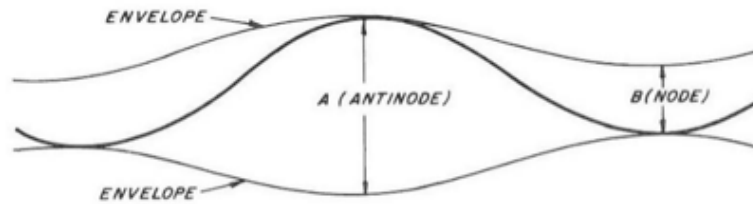


Figura 11 Movimento oscillatorio all'interno delle linee di inviluppo

2.3 Letteratura di riferimento analizzata

In generale occorre premettere che l'analisi delle componenti incidenti e soprattutto di quelle riflesse può essere condotta e quindi studiata nel corso di sperimentazioni in laboratorio, facendo riferimento a diversi metodi proposti in letteratura. In particolare, tali metodi fanno riferimento ad una strumentazione di misura più o meno articolata. In questo lavoro di tesi si prendono in considerazione i metodi a due, tre e quattro sonde di misura, opportunamente spaziate.

2.3.1 Il metodo di Goda e Suzuki

Goda e Suzuki (1976) hanno sviluppato un metodo che consente di calcolare le altezze d'onda e le fasi delle componenti incidenti e riflesse attraverso la registrazione simultanea del profilo d'onda in due punti di misura adiacenti, posizionati all'interno del canale. L'utilizzo della tecnica Fast Fourier Transform (FFT)

permette di separare in modo semplice e versatile le componenti di moto in tutte le diverse frequenze. Si consideri un sistema riflettente di onde regolari che si propagano in un canale, i profili d'onda della componente incidente e riflessa possono essere descritti nella forma:

$$\eta_i = a_i \cos(kx - \sigma t + \varepsilon_i) \quad [2.3]$$

$$\eta_r = a_r \cos(kx + \sigma t + \varepsilon_r) \quad [2.4]$$

dove a sono le ampiezze (i incidente ed r riflessa), k il numero d'onda ovvero $\frac{2\pi}{L}$, σ è la frequenza angolare ovvero $\frac{2\pi}{T}$ e ε la rispettiva fase angolare. Detto ciò, applicando la trigonometria è possibile ottenere i profili d'onda rilevati in due punti di misura adiacenti x_1 e $x_1 + \Delta l$, posti ad una distanza Δl che saranno:

$$\eta_1 = A_1 \cos(\sigma t) + B_1 \sin(\sigma t) \quad [2.5]$$

$$\eta_2 = A_2 \cos(\sigma t) + B_2 \sin(\sigma t) \quad [2.6]$$

Ipotizzando la relazione di dispersione $\sigma^2 = gk \tanh(kh)$ [2.7] si ottiene un sistema di equazioni che può essere risolto in funzione delle ampiezze della componente incidente e riflessa.

$$A_1 = a_i \cos \phi_i + a_R \cos \phi_R \quad [2.9]$$

$$A_2 = a_i \sin \phi_i - a_R \sin \phi_R \quad [2.10]$$

$$B_1 = a_i \cos(k\Delta l + \phi_i) + a_R \cos(k\Delta l + \phi_R) \quad [2.11]$$

$$B_2 = a_i \sin(k\Delta l + \phi_i) + a_R \sin(k\Delta l + \phi_R) \quad [2.12]$$

Con

$$\phi_i = kx_1 + \varepsilon_i \quad [2.13]$$

$$\phi_R = kx_1 + \varepsilon_R \quad [2.14]$$

Il sistema sopracitato può essere risolto stimando le ampiezze incidenti e riflesse in funzioni delle componenti A_1, A_2, B_1, B_2 ovvero

$$a_i = \frac{1}{2|\sin k\Delta l|} [(A_2 - A_1 \cos k\Delta l - B_1 \sin k\Delta l)^2 + (B_2 + A_1 \sin k\Delta l - B_1 \cos k\Delta l)^2]^{1/2} \quad [2.15]$$

$$a_R = \frac{1}{2|\sin k\Delta l|} [(A_2 - A_1 \cos k\Delta l + B_1 \sin k\Delta l)^2 + (B_2 - A_1 \sin k\Delta l - B_1 \cos k\Delta l)^2]^{1/2} \quad [2.16]$$

Attraverso l'analisi di Fourier si possono stimare i quattro coefficienti A_1, A_2, B_1, B_2 in tutte le frequenze in cui si può

scomporre lo stato di mare, fatto questo si può risalire all'ampiezza dell'onda riflessa e incidente su tutto il campo di frequenze. Queste quantità non sono però determinabili quando il divisore delle equazioni per il calcolo delle ampiezze della componente incidente e riflessa si annulla, il che significa che tale metodo non risulta significativo quando Δl (spazio tra le sonde) risulta multiplo intero di una semi lunghezza d'onda. Occorre innanzitutto ricordare che tale procedura nel caso di studio di onde irregolari non considera lo studio delle ampiezze delle componenti armoniche superiori libere e legate come invece avviene nel caso di utilizzo per le onde regolari. Il metodo propone una procedura da seguire:

- Le frequenze variano all'interno di un range, si prevede quindi una frequenza minima ed una massima come indicato: $f_{min} = \Delta l / L_{max} = 0,05$; $f_{max} = \Delta l / L_{min} = 0,45$; tale spaziatura può essere presa anche in maniera leggermente più larga ovvero da 0,03 a 0,5.
- Il secondo "step" è quello di valutare l'energia caratteristica dell'onda incidente e riflessa misurabile come l'area sottesa allo spettro ricavato e contenuta dal range precedentemente citato. Si avrà infatti:

$$E_I = \int_{f_{min}}^{f_{max}} S_I(f) df = (\sum_{f_{min}}^{f_{max}} I_I) \frac{\Delta t}{2t_0} = \sum_{f_{min}}^{f_{max}} N a_I^2 \frac{\Delta t}{2N\Delta t} = \frac{1}{2} \sum_{f_{min}}^{f_{max}} a_{Ifi}^2 [2.17]$$

$$E_I = \int_{f_{min}}^{f_{max}} S_R(f) df = \left(\sum_{f_{min}}^{f_{max}} I_R \right) \frac{\Delta t}{2t_0} = \sum_{f_{min}}^{f_{max}} N a_R^2 \frac{\Delta t}{2N\Delta t} = \frac{1}{2} \sum_{f_{min}}^{f_{max}} a_{Rfi}^2 \quad [2.18]$$

Le integrazioni sono eseguite sugli spettri senza alcun tipo di approssimazione per evitare tutti i possibili effetti di divergenza delle ampiezze risolte in prossimità di $\Delta f = \Delta/L = n/2$.

- Il terzo passaggio permette di stimare nel complesso il coefficiente di riflessione a partire dalla conoscenza delle energie di riferimento, questo può essere fatto con:

$$K_R = (E_r/E_i)^{1/2} \quad [2.19]$$

- A tal punto l'equazione utilizzabile si basa sulla relazione tra l'altezza delle onde irregolari e la radice quadrata dell'energia dell'onda stessa, si può quindi ricavare:

$$H_I = \frac{1}{\sqrt{1+K_R^2}} H_S \quad [2.20]$$

$$H_R = \frac{K_R}{\sqrt{1+K_R}} H_S \quad [2.21]$$

Con H_S che corrisponde all'altezza d'onda rappresentativa tra le due sonde di misura considerate (media) che è possibile ricavare come:

$$H_S = ((\eta_s)_{rms}/(\eta_I)_{rms}) H_I \quad [2.22]$$

$$\eta_{\text{srms}} = \int_0^{\infty} (1 + 2K_R \cos 2Kx_1 + K_R^2) S_I(f) df \quad [2.23]$$

x_1 = distanza del misuratore dalla barra

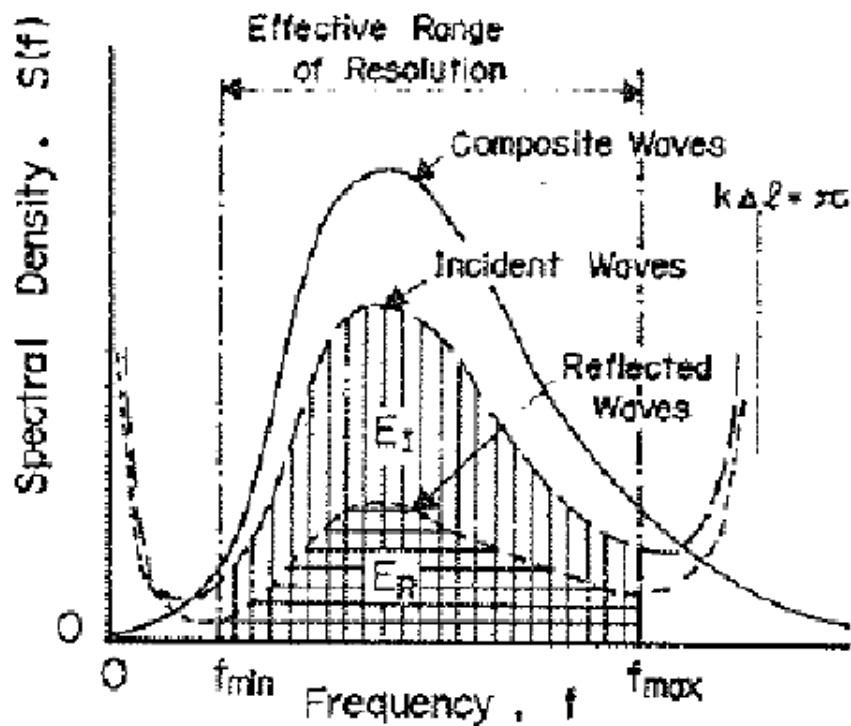


Figura 12 Illustrazione della risoluzione spettrale

Per quanto riguarda l'accuratezza del metodo, occorre sottolineare che ci sono diverse fonti di imprecisione nella presente tecnica di risoluzione:

- deviazione della relazione di dispersione dovuta agli effetti non lineari
- esistenza di termini armonici non lineari nelle onde progressive

-generazione di termini di interazione non lineare in onde stazionarie

-comparsa di onde trasversali e altri disturbi nel canale

-rumori del segnale.

Per concludere su tale metodologia si ricorda che:

-la risoluzione non è adatta quando $\Delta l/L = n/2$ con $n=0,1,2,3..$

mentre risulta più affidabile quando $0,05 < \Delta l/L < 0,45$

-le sonde debbono essere poste a più di una lunghezza d'onda rispetto la struttura e rispetto al generatore

-rimane il problema dell'interazione con le non linearità sviluppate

-la tecnica è efficace nel rilevare l'aumento delle armoniche dispari nella riflessione dell'onda da una struttura.

2.3.2 Il metodo di Mansard e Funke

Un'evoluzione del metodo a due punti descritto nel paragrafo precedente e sviluppato da Goda e Suzuki è il cosiddetto metodo a tre punti elaborato da Mansard e Funke (1980), permette l'individuazione del coefficiente di riflessione nonché lo studio

dell'evoluzione del profilo d'onda, come si intuisce tale metodologia necessita dell'uso di tre sonde, opportunamente distanziate con la tecnica di minimizzazione ai minimi quadrati degli errori nelle elevazioni registrate, questo permette di dividere lo spettro incidente da quello riflesso e determinarne le altezze d'onda associate. Si assume che le onde generate si propagano in direzione longitudinale e quelle riflesse in direzione opposta e che lo spettro venga misurato in tre punti diversi non concomitanti con nodi ed antinodi. Fissato il verso di propagazione dell'onda incidente, l'equazione generica di un'onda progressiva vale:

$$\eta_k(t) = \sum C_k \sin\left(-\frac{2\pi kt}{T} + \frac{2\pi x}{L} + \vartheta_k\right) \quad [2.24]$$

dove ϑ_k è la fase iniziale, L_k è la lunghezza d'onda alla frequenza k/T , k il solito numero d'onda e C_k è l'ampiezza d'onda.

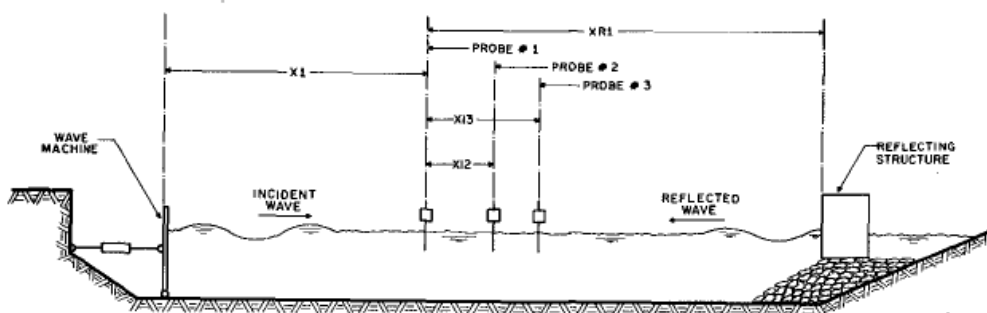


Figura 13 Schema di posizionamento degli strumenti di misura

Preso un qualsiasi punto all'interno dell'area di sperimentazione, l'onda può essere rappresentata attraverso un comportamento incidente, riflesso ed un segnale di rumore che esprime le interazioni non lineari, di fase e le varie incertezze ($C_{I,k}$, $C_{R,k}$, $\Omega_k(t)$). Definendo la distanza tra le varie sonde e il generatore d'onda e allo stesso modo tra la sonda e la struttura riflettente risulta possibile determinare le equazioni dei profili d'onda registrati dove entra in gioco anche il cambiamento di fase tra onda incidente e riflessa dovuto alla presenza dell'ostacolo ϕ_k e ovviamente il segnale di rumore $\Omega_{1,2,3}$ ovvero relativo alle posizioni 1,2,3.

$$\eta_k(t) = \sum C_{I,k} \sin\left(-\frac{2\pi kt}{T} + \frac{2\pi x}{L} + \vartheta_k\right) + \sum C_{R,k} \sin\left(-\frac{2\pi kt}{T} + \frac{2\pi x}{L} + \vartheta_k + \phi_k\right) + \Omega_k(t) \quad [2.25]$$

Applicando la trasformata di Fourier al segnale composito nell'intervallo $0 < t < T$ si ottiene un'espressione appunto di tale trasformata che può tra l'altro essere scritta evidenziando le differenze di fase tra le registrazioni delle diverse onde:

$$F[\eta_{p=1}(t)] = Z_{I,k} + Z_{R,k} + Z_{N,1,k} \quad [2.26]$$

$$F[\eta_{p=2}(t)] = Z_{I,k} \exp\left(i\frac{2\pi(x_{12})}{L}\right) + Z_{R,k} \exp\left(-i\frac{2\pi(x_{12})}{L}\right) + Z_{N,2,k} \quad [2.27]$$

$$F[\eta_{p=3}(t)] = Z_{IK} \exp(i\frac{2\pi(x_{13})}{L}) + Z_{RK} \exp(-i\frac{2\pi(x_{13})}{L}) + Z_{N,3,k} \quad [2.28]$$

I termini Z_N non risultano misurabili, tuttavia le equazioni scritte possono essere risolte applicando il metodo di minimizzazione ai minimi quadrati degli errori nelle elevazioni d'onda registrate. Occorre andare ad affermare che la sommatoria degli errori raggiunga un valore minimo quando le derivate parziali di $\varepsilon_{p,k} = Z_{N,p,k} + f_e(Z_{IK}, Z_{RK})$ [2.29] rispetto a Z_{IK} e Z_{RK} si annullano.

Sviluppando il tutto si ottiene un sistema di equazioni, dalle quali, applicando le relazioni trigonometriche si ricavano dei parametri chiave per la risoluzione delle stesse equazioni.

In definitiva si evidenzia il fatto che esistono dei valori limite di spaziatura tra l'apparato di misurazione tale per cui l'analisi dei valori ottenuti risultano errati:

- x_{12} = spaziatura tra prima e seconda sonda pari alla metà della lunghezza di una qualsiasi componente di frequenza

- x_{13} = spaziatura tra prima e terza sonda pari ad un multiplo intero della distanza tra la prima e la seconda sonda

Le distanze tra le sonde raccomandate per ottenere la maggiore accuratezza nel metodo sono:

$$x_{12} = \frac{Lp}{10}; \frac{Lp}{6} < x_{13} < \frac{Lp}{3}; x_{13} \neq \frac{Lp}{5}; x_{13} \neq \frac{3Lp}{10}; \text{ inoltre } x_1 > Lp; x_{R3} > Lp;$$

Noti $Z_{Ik}(k\Delta f)$ e $Z_{Rk}(k\Delta f)$ è possibile determinare la densità media di energia che caratterizza gli spettri, facendo il rapporto tra il modulo al quadrato di $Z_k(k\Delta f)$ e due volte Δf , questo permette di ricavare il coefficiente di riflessione attraverso l'uso dei momenti di ordine zero relativi ai due spettri, quindi anche l'altezza d'onda incidente e riflessa.

Il metodo a tre punti descritto, rispetto a quello a due punti precedentemente riportato è sicuramente migliore poiché si ha un range di frequenze risolvibili più ampio, una ridotta sensibilità al rumore e alle differenze rispetto alla teoria lineare nonché si riscontra una minore sensibilità alle distanze critiche tra le sonde.

2.3.3 Il metodo di Lin e Huang

Questa metodologia risulta un'ulteriore evoluzione di quanto visto nel paragrafo precedente, e come tale, permette di ottenere dei risultati più esatti e più raffinati che possono comunque essere confrontati sia con il primo che con il secondo metodo discusso. Si propone una nuova tecnica di separazione delle armoniche superiori incidenti e riflesse che permette di isolare i modi liberi e bloccati legati all'azione dell'onda incidente

e riflessa, basandosi sulla registrazione risultante dalle sonde (quattro o più) opportunamente spaziate lungo il canale di sperimentazione. Le onde complesse sono decomposte in componenti di frequenza attraverso l'uso della trasformata di Fourier, mentre il metodo dei minimi quadrati è usato per minimizzare l'errore dovuto al rumore del segnale e poter ottenere i parametri risolutivi delle equazioni (come visto nel precedente paragrafo). Il confronto con gli altri metodi prevede lo sviluppo esatto della prima armonica incidente e le ampiezze dell'onda riflessa, mentre per quanto riguarda le armoniche superiori possono essere determinate e non si considerano onde libere come nei precedenti metodi. Come già messo in luce, nelle applicazioni reali, le onde incidenti possono risultare casuali oppure regolari, le interazioni con una qualsiasi struttura presente nel campo di mare in cui esse si sviluppano e poi si propagano producono armoniche superiore che vanno a coinvolgere il modo libero (onde *free*) ed i modi bloccati in fase (onde *boundary*).

Per descrivere la superficie libera si propone la seguente espressione generale:

$$\eta(x,t) = a^{(1)}_I \cos(kx_m - \omega t + \phi^{(1)}_I) + a^{(1)}_R \cos(kx_m + \omega t + \phi^{(1)}_R) + \sum_{n>2} 2a^{(n)}_{I,B} \cos[n(kx_m - \omega t) + \phi^{(n)}_{I,B}] + \sum_{n>2} 2a^{(n)}_{R,B} \cos[n(kx_m + \omega t) + \phi^{(n)}_{R,B}] + \sum_{n>2} 2a^{(n)}_{I,F} \cos[(k^{(n)}x_m - n\omega t) + \phi^{(n)}_{I,F}] + \sum_{n>2} 2a^{(n)}_{R,F} \cos[(k^{(n)}x_m + n\omega t + \phi^{(n)}_{R,F})] + e_m(t) \quad [2.30]$$

dove a è l'ampiezza, I ed R sono le incidenti e le riflesse, B ed F sono le legate e le libere, n è l'ordine delle armoniche ω è la frequenza angolare, k e $k^{(n)}$ corrisponde al numero d'onda $\phi^{(n)}$ è la differenza di fase relativa ad una arbitraria origine temporale ed infine e_m è l'errore derivante dall'errore del segnale. Sulla base di questo si ha la possibilità di avere una scomposizione del profilo ondoso per un qualsivoglia ordine di approssimazione considerando la contemporanea presenza di onde libere e legate, sia per l'onda incidente che per quella riflessa. Se ad esempio ci si ferma al secondo ordine di approssimazione sarà possibile descrivere il profilo della superficie libera come:

$$\eta(x,t) = a^{(1)}_I \cos(kx - \omega t + \phi^{(1)}_I) + a^{(1)}_R \cos(kx + \omega t + \phi^{(1)}_R) + a^{(2)}_{I,B} \cos[2(kx - \omega t) + \phi^{(2)}_{I,B}] + a^{(2)}_{R,B} \cos[2(kx + \omega t) + \phi^{(2)}_{R,B}] + a^{(2)}_{I,F} \cos[(k^{(2)}x - 2\omega t) + \phi^{(2)}_{I,F}] + a^{(2)}_{R,F} \cos[(k^{(2)}x + 2\omega t + \phi^{(2)}_{R,F})] + o(k_1 a^3) \quad [2.31]$$

Dal confronto tra le equazioni precedenti si può facilmente ricavare che fra l'espressione teorica del profilo libero e quella

realmente misurata, esiste uno scarto ($e_m(t)$), che può essere dovuto tanto al rumore elettrico associato all'acquisizione mediante sonde di livello, tanto a componenti armoniche di ordine superiore non considerate nella teoria. In ogni caso, come dettagliatamente discusso nel seguito, le grandezze incognite verranno ricavate mediante scomposizione della funzione del profilo libero in serie di Fourier, ed applicando un criterio di minimizzazione della funzione d'errore. La decomposizione dell'onda avviene applicando la trasformata di Fourier alla superficie libera misurata, si ottiene quindi $F_1(x+\Delta x) = C_{I(1)} X_{I(1)} + C_{R(1)} X_{R(1)} + \Omega_m^{(1)}$, dove quest'ultimo termine rappresenta la trasformata di Fourier di $e_m(t)$ mentre i precedenti termini si individuano come:

$$X_{I(1)} = a^{(1)}_I \exp[-i(k_1 x)] ; X_{R(1)} = a^{(1)}_R \exp[i(k_1 x + \epsilon)] \quad [2.32]$$

$$C_{I(1)} = \frac{\exp[-ik_1 x \Delta x_m]}{2} = \frac{1}{2}; C_{R(1)} = \frac{\exp[ik_1 x \Delta x_m]}{2} = \frac{1}{2}; \text{ per } \Delta x_m = 0 \quad [2.33]$$

Con Δx_m distanza tra il generico punto di acquisizione e la prima stazione di misura, che immagineremo corrisponda all'ascissa x . Chiaramente F_1 rappresenta la componente di Fourier associata alla prima armonica. I parametri incogniti $X_{I(1)}$ e $X_{R(1)}$ saranno ricavati imponendo che la sommatoria del quadrato degli errori, effettuata lungo m posizioni di misura, sia minima ovvero

$$\sum[\Omega_m^{(1)}]^2 = \sum[F_{(1)}(x_m) - C_{(1)}^I X_{(1)}^I - C_{(1)}^R X_{(1)}^R]^2 = \min \quad [2.34]$$

In formule si avrà:

$$\frac{\partial}{\partial X_{(1)}^I} \sum[\Omega_m^{(1)}]^2 = 0; \quad \frac{\partial}{\partial X_{(1)}^R} \sum[\Omega_m^{(1)}]^2 = 0 \quad [2.35]$$

Risolvendo il sistema appena scritto si ottiene un sistema lineare di due equazioni e due incognite che può essere espresso anche in forma matriciale:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{(1)}^I \\ X_{(1)}^R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \quad [2.36]$$

Gli elementi A_{ij} della matrice dei coefficienti dipendono dal numero d'onda k_1 e dalla posizione delle sonde. Essi sono espressi in funzione di $C(1)I$ e $C(1)R$ mediante le seguenti relazioni:

$$A_{11} = \sum [C_{(1)}^I]^2; \quad A_{12} = A_{21} = \sum [C_{(1)}^I C_{(1)}^R]; \quad A_{22} = \sum [C_{(1)}^R]^2 \quad [2.37]$$

Gli elementi B_i della colonna dei termini noti, dipendono sia dai coefficienti $C(1)I$ e $C(1)R$ che dalle ampiezze di Fourier F_1 , calcolate a partire dalle fluttuazioni temporali della superficie libera in corrispondenza delle m posizioni all'interno del canale:

$$B_1 = \sum [F_1(x + \Delta x) C_{(1)}^I]; \quad B_2 = \sum [F_1(x + \Delta x) C_{(1)}^R] \quad [2.38]$$

Dalla risoluzione di tale sistema è possibile determinare le ampiezze dell'armonica incidente e riflessa $a^{(1)}$ e $a_R^{(1)}$, essendo esse i moduli delle incognite complesse $X_{(1)}^I$ e $X_{(1)}^R$ ovvero:

$$a_I^{(1)} = |X_{(1)}^I| ; a_R^{(1)} = |X_{(1)}^R| \quad [2.39]$$

Affinché il sistema possa avere una ed una sola soluzione, il determinante della matrice dei coefficienti deve essere diverso da zero. Tale condizione risulta, infatti, vincolante all'applicabilità del metodo. Il verificarsi di tale condizione si ha quando:

$$\sum [C_{(1)}^I]^2 \cdot \sum [C_{(1)}^R]^2 - \sum [C_{(1)}^I C_{(1)}^R]^2 = 0 \quad [2.40]$$

Quest'ultima relazione ci dice in che relazione il numero d'onda e la distanza relativa delle sonde all'interno del canale devono trovarsi affinché il sistema risulti indeterminato. Per ottenere una formula esplicita bisogna specificare il numero di sonde utilizzate e la loro posizione relativa. Nel caso si utilizzino quattro sonde (come fatto nella realizzazione sperimentale $m=4$) si ha:

$$\left[\frac{1}{4} + \frac{\exp[-2ik_1\Delta x_2]}{4} + \frac{\exp[-2ik_1\Delta x_3]}{4} + \frac{\exp[-2ik_1\Delta x_4]}{4} \right] \cdot \left[\frac{1}{4} + \frac{\exp[2ik_1\Delta x_2]}{4} + \frac{\exp[2ik_1\Delta x_3]}{4} + \frac{\exp[2ik_1\Delta x_4]}{4} \right] - 1 = 0 \quad [2.41]$$

che risulta verificata quando:

$$\begin{aligned} &\text{sen}^2(k_1\Delta x_2)+\text{sen}^2(k_1\Delta x_3)+\text{sen}^2(k_1\Delta x_4)+\text{sen}^2[k_1(\Delta x_2-\Delta x_3)]+ \\ &+\text{sen}^2[k_1(\Delta x_3-\Delta x_4)]=0 \quad [2.42] \end{aligned}$$

ovvero debbono verificarsi contemporaneamente le seguenti condizioni:

$$\Delta x_2=n\frac{L}{2}, \Delta x_3=p\Delta x_2; \Delta x_4=q\Delta x_2; \Delta x_4=r\Delta x_3 \text{ con } n,p,q,r=1,2,\dots$$

Questo vale nella determinazione delle componenti di pulsazione ω , ma il discorso può ovviamente essere esteso alle componenti di pulsazione 2ω e così via.

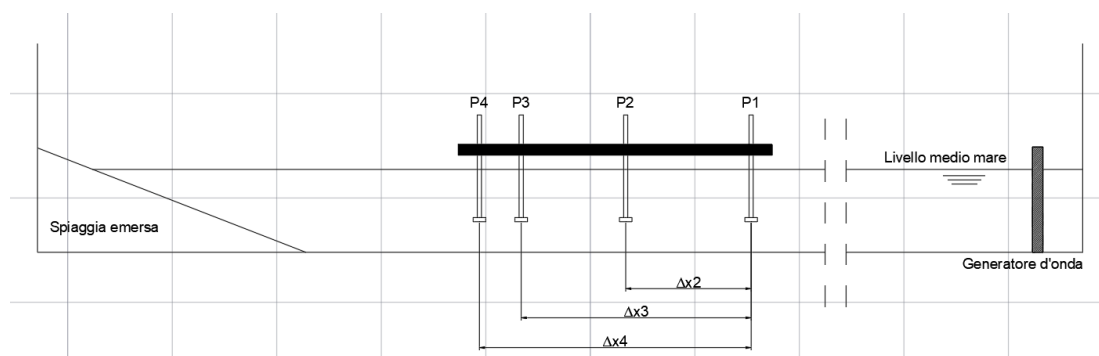


Figura 14 Schematizzazione della disposizione spaziale delle sonde

Secondo tale metodologia il coefficiente di riflessione, meglio noto come K_r può essere determinato quando sono note le ampiezze di ogni armonica e può essere scritto come:

$$K_r = \{[(a_R^{(1)})^2 + \sum[(a_{R,B}^{(n)})^2 + (a_{R,F}^{(n)})^2]] / [(a_I^{(1)})^2 + \sum[(a_{I,B}^{(n)})^2 + (a_{I,F}^{(n)})^2]]\}^{1/2} \quad [2.43]$$

allo stesso modo si può definire il coefficiente di trasmissione K_t come rapporto tra ampiezza d'onda trasmessa e ampiezza d'onda incidente ovvero:

$$K_t = \{[(a_T^{(1)})^2 + \sum[(a_{T,B}^{(n)})^2 + (a_{T,F}^{(n)})^2]] / [(a_I^{(1)})^2 + \sum[(a_{I,B}^{(n)})^2 + (a_{I,F}^{(n)})^2]]\}^{1/2} \quad [2.44]$$

Per concludere e riassumere i punti chiave del metodo appena descritto, sul quale poi la sperimentazione condotta per eseguire tale lavoro di tesi si è in qualche termine basata si può definire:

-questa tecnica risulta essere in grado di definire la decomposizione dei campi d'onda regolari in maniera del tutto completa comprese le onde libere e bloccate nelle armoniche superiori.

-le formulazioni sviluppate e quindi trattate sono consone per l'utilizzo di quattro o più sonde opportunamente spaziate.

-la condizione della spaziatura risulta essere quella che ha portato alla definizione dei vari Δx e diventa meno restrittiva con l'aumento del numero di sonde, garantendo così anche una miglior accuratezza nella determinazione dei parametri risultanti.

-la precisione della tecnica è stata verificata, nonché è stata dimostrata la sua applicabilità.

-per quanto riguarda la sensibilità al rumore, la precisione può essere assicurata applicando dei "filtri" alle onde soggette a tale contaminazione.

2.4 Studio di Van der Meer *et al.* sulle modificazioni dello spettro ondoso a valle di una barra sommersa

Van der Meer *et al.* (2000) hanno studiato mediante prove sperimentali in un canale per onde come si modifica lo spettro ondoso dietro ad una struttura sommersa. Gli Autori hanno adottato un fattore di scala per le lunghezze di 1:15, i risultati sono espressi in grandezze di prototipo. Le prove sono state eseguite per diversi valori del tirante idrico, compresi tra 4.5 m e 7.0 m, per altezza d'onda significativa incidente H_{m0} compresa tra 1.3 m e 2.2 m, e per due diversi valori del periodo di picco T_p , pari a 5.0 s e 7.0 s. Nel corso delle prove, sono state utilizzate varie tipologie di struttura sommersa. Il rapporto tra il tirante al di sopra del coronamento della struttura e l'altezza significativa è stato fatto variare tra 0 (corrispondente al caso di barriera con cresta sul livello medio mare) e 1.0. Il confronto tra

le caratteristiche del moto ondoso a largo e dietro alla struttura mostra una generale riduzione del contenuto energetico dell'onda ed un conseguente cambiamento della forma dello spettro, caratterizzato, per l'onda trasmessa, da una maggiore distribuzione di energia sulle frequenze più elevate rispetto all'onda incidente. Tali considerazioni sono espresse in maniera efficace confrontando i momenti delle distribuzioni spettrali. Se si indica con $E(f)$ la funzione rappresentante la densità spettrale, è possibile definire il momento di ordine n dello spettro:

$$m_n = \int_0^{\infty} E(f) f^n df \quad [2.45]$$

In particolare, l'altezza significativa spettrale è legata al momento di ordine zero dalla relazione:

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \quad [2.46]$$

Mentre per la stima del periodo medio spettrale si fa riferimento alla seguente formulazione:

$$T_m = T_{02} = \left(\frac{m_0}{m_2}\right)^{1/2} \quad [2.47]$$

Infine, si definisce il coefficiente di trasmissione come rapporto tra onda trasmessa ed incidente che deriva dai momenti spettrali:

$$K_t = \left(\frac{m_{0,t}}{m_{0,i}} \right)^{1/2} \quad [2.48]$$

Sono riportati i rapporti tra il periodo di picco dell'onda trasmessa dietro la barriera e dell'onda incidente, in funzione del coefficiente di trasmissione. Si evidenzia che l'interazione onda barriera non comporta un'alterazione del periodo di picco. Il periodo medio spettrale, al contrario, si modifica nell'interazione con la barriera, e, in particolare, tende ad assumere, dietro la struttura, valori minori rispetto a quelli di largo. Per coefficienti di trasmissione superiori a 0.15 il rapporto tra i periodi medi a tergo e a largo della struttura sembra tendere ad un valore costante.

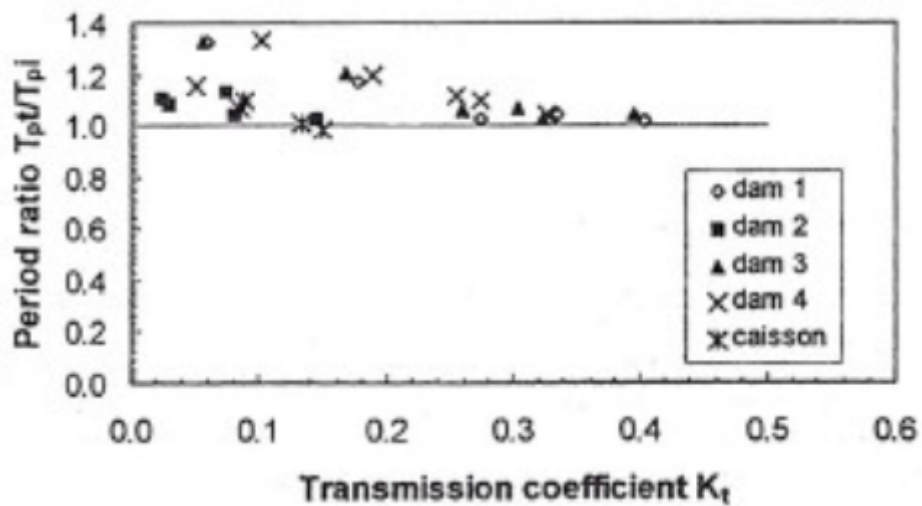


Figura 15 Rapporto periodo di picco onda trasmessa e incidente con K_t

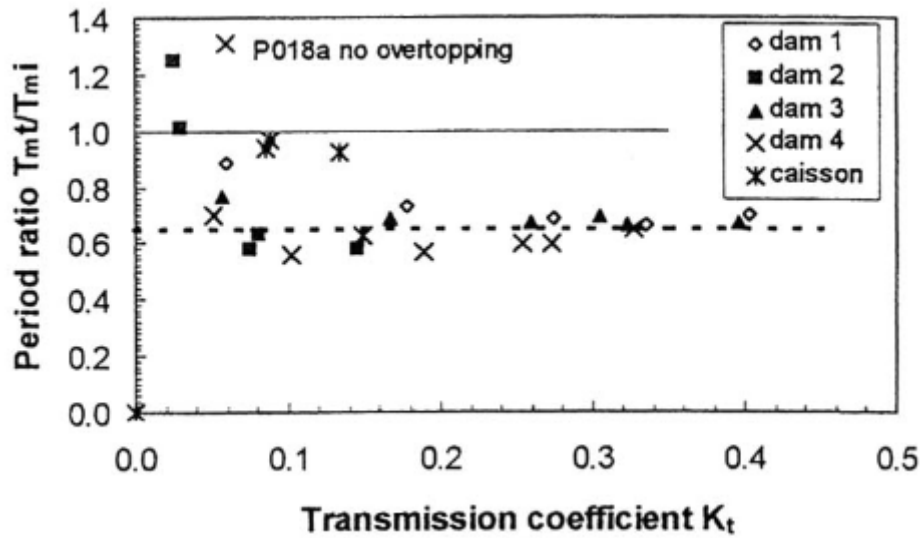


Figura 15bis Rapporto periodo medio onda trasmessa e incidente con K_t

Noto il coefficiente di trasmissione, tale studio si propone di rappresentare lo spettro trasmesso a partire da quello incidente e da K_t , nello specifico indicando con f_p la frequenza di picco, gli spettri a valle si mostrano con un contenuto di energia costante nell'intervallo $1,5f_p$ e $3,5f_p$, in tale intervallo risulta racchiuso circa il 40% dell'energia totale trasmessa. Si assume che $1,5f_p$ sia il limite tra alta e bassa frequenza, si propone quindi uno spettro trasmesso che assume la stessa forma prima del limite $1,5f_p$ imposto, mentre si rappresenta una "soglia" costante dopo tale limite.

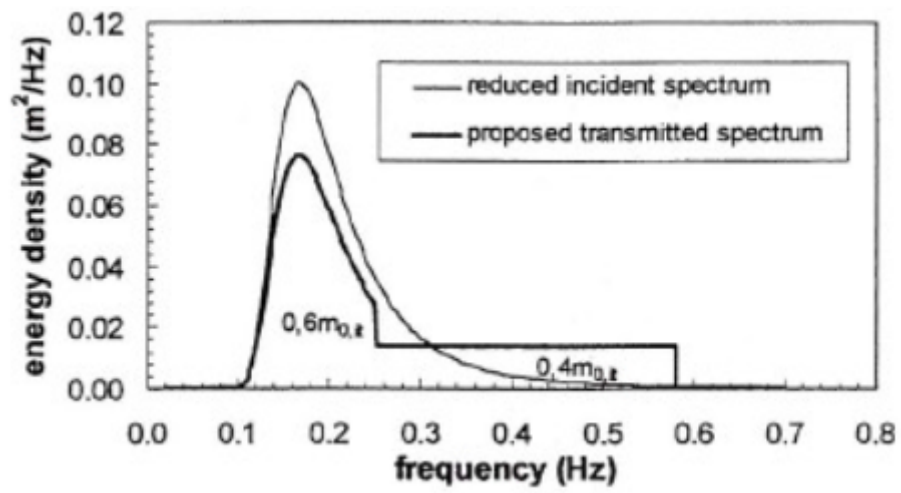


Figura 16 Forma dello spettro incidente e trasmesso

Capitolo 3. Configurazione dell'apparato sperimentale

3.1 Premessa

Nel presente capitolo vengono indicate dettagliatamente le attività sperimentali condotte che costituiscono il punto di riferimento per lo studio dei fenomeni oggetto del presente lavoro di tesi. I test sono stati condotti presso il laboratorio di Idraulica e Costruzioni marittime del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (*DICEA*) dell'Università Politecnica delle Marche. Nel seguito vengono descritti l'apparato sperimentale e strumentale, la geometria della barra sommersa, le condizioni ondose prese in esame e gli strumenti e modalità di acquisizione dei dati.

3.2 Il canale coinvolto nell'indagine

Le attività sperimentali sono state condotte all'interno del canale per onde in piccola scala, che ha una lunghezza utile di circa 50,0 m dal generatore d'onda alla parete terminale opposta all'ondogeno, una larghezza pari ad 1,0 m costante per tutto il suo sviluppo, ed un'altezza, anch'essa uniforme per tutto l'apparato, pari ad 1,3 m. La struttura del canale è costituita da un fondo piano in acciaio zincato dello spessore di 6mm e da

montanti (profilati) anch'essi in acciaio che si sviluppano verticalmente con interasse pari a 2 m. I montanti verticali sono tamponati attraverso pareti in vetro temperato nella parte centrale del canale, per una lunghezza di 36 metri, mentre nella zona in cui è presente l'ondogeno e all'estremità opposta i pannelli sono in acciaio e consentono l'ingresso in canale. Il riempimento del suddetto canale avviene mediante l'uso di un impianto idraulico costituito da un'alimentazione (tre serbatoi di grande capacità) alla quale sono innestate un sistema di condotte in pvc che confluiscono la portata nel canale e che permettono lo svuotamento in caso di necessità. Il sistema può operare in due diverse modalità:

-a gravità (fin tanto che il livello all'interno dei serbatoi non raggiunge, ovviamente, il livello all'interno del canale)

-per pompaggio, mediante l'uso di un'apposita pompa governata elettricamente che permette il trasferimento del fluido dai serbatoi al canale e viceversa, facendo opportuna attenzione al controllo dell'assenza di aria nella pompa prima dell'avvio e durante la fase di lavoro.



Figura 17 Canale per onde utilizzato nella sperimentazione

3.3 Il generatore d'onda

Nella prima parte del canale per onde è posizionato un sistema di generazione, costituito da una pala collegata elettricamente ad una centralina. Il tutto comprende:

- un elaboratore di generazione del segnale, per la gestione del programma HR WaveMaker;

- un impianto che produce le onde per mezzo del movimento di una pala;

- una cabina elettrica di controllo, che gestisce il motore che a sua volta muove la pala e assicura che quest'ultima segua il segnale inviato del computer;

- un'unità di controllo che include l'assorbitore di onda dinamico e ha la funzione di avvio e arresto remoto della cabina di controllo del motore, la scelta dell'assorbitore di onda dinamico ed il monitoraggio del segnale richiesto dal computer, del livello d'acqua di fronte alla pala e degli altri parametri per il set up del sistema di assorbimento delle onde.

Il sistema di movimento avviene per mezzo di un semplice pistone che permette alla pala di avere una corsa massima di 1 m, una velocità massima di 0,8 m/s ed una massima forza pari a

4,8 kN. Il battionde è posizionato verticalmente sotto ad un attuatore di trasmissione elettrica che si muove orizzontalmente. L'attuatore è sorretto da una struttura di sostegno montata sulla canaletta, è composto da un montante che scorre su quattro guide lineari con l'ausilio di cuscinetti ed è spostato grazie al motore elettrico tramite un sistema pignone-cremagliera (in acciaio, che permette di raggiungere le velocità più elevate) ed una scatola di trasformazione, questa ha un elemento eccentrico che permette alla cremagliera e al pignone di ingranare con un trascurabile "passo morto". Il motore sopra citato risulta a bassa inerzia per il funzionamento alle alte frequenze ed ha la sua unità di controllo. La posizione reale della pala è rilevata da un codificatore montato sul motore e la differenza tra questi due segnali è amplificata e usata per controllare il motore elettrico. Il sistema di controllo è alloggiato nella cabina montata esternamente alla canaletta vicino al generatore, mentre il trasformatore, i fusibili e la linea di alimentazione sono alloggiati nell'unità di controllo del motore.



Figura 18 Il generatore d'onda

3.4 Sonde di livello elettro-resistive

Al passaggio dell'onda il modificarsi della superficie libera è stato registrato grazie all'uso di otto sonde elettroresistive situate al centro del canale per onde, con un distanziamento tale da rispettare i criteri di letteratura prima illustrati, come riportato in Figura 23. Questo strumento è formato da due elettrodi posti parallelamente l'uno all'altro con una distanza ovviamente

costante tra i due e allineati in maniera perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda, quindi ortogonale rispetto alle pareti laterali del canale. Quando la sonda è in funzione, una tensione alternata ad alta frequenza attraversa le due barre e viene misurata la relativa conduttanza elettrica. La conduttanza è proporzionale alla lunghezza del conduttore al di sotto della superficie liquida e alla conducibilità elettrica dell'acqua. La variazione del livello al passaggio dell'onda è registrata come variazione della conduttanza.

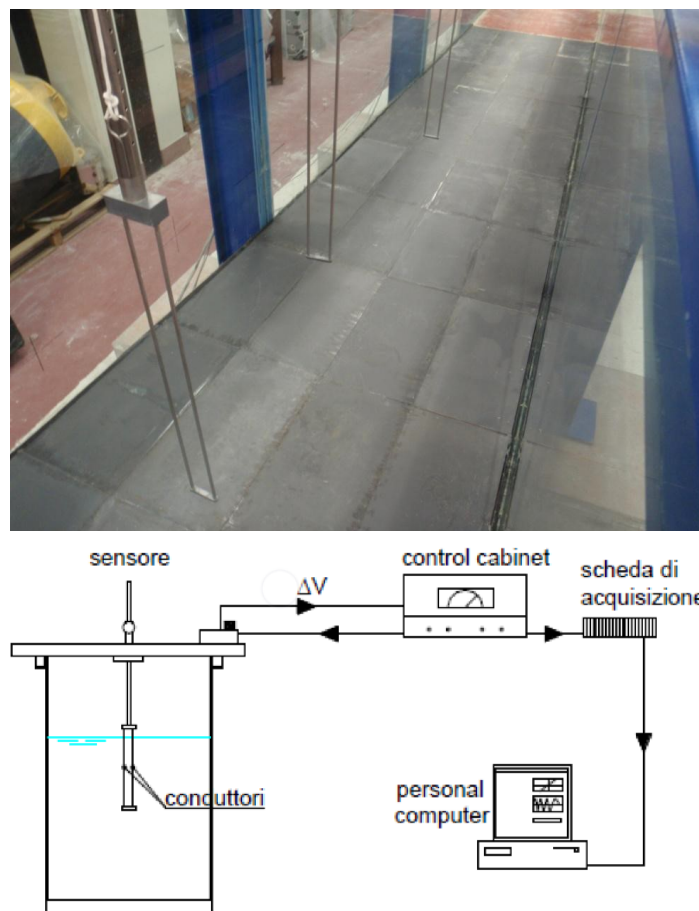


Figura 20 Sonda elettro-resistive

3.4.1 Calibrazione dello strumento di misura

Per ciascun giorno di prova, è stata effettuata la calibrazione delle sonde. Innanzitutto, è stata tarata l'amplificazione, tramite l'apposita apparecchiatura di controllo elettrico, in modo da far corrispondere alla variazione di un volt, un centimetro di variazione del pelo libero. Tale scelta si è basata sulla necessità di cercare di massimizzare la risoluzione e, compatibilmente, di minimizzare il rumore elettrico delle sonde. Ultimata la taratura si è passati a calibrare il software di acquisizione. Sono stati quindi registrati i valori di voltaggio misurati in uno stato di quiete nelle posizioni relative allo zero e poi alzando ed abbassando ogni singola sonda dell'incremento voluto in funzione anche del livello d'acqua corrispondente all'interno del canale.

3.5 La geometria della barra sommersa

Al fine di poter simulare al meglio lo sviluppo di una barra sommersa in mare, all'interno del canale per onde è stata realizzata una struttura costituita da un primo paramento inclinato (lato mare), una "soglia" orizzontale sulla quale si stabilisce un tirante costante e poi un nuovo paramento inclinato con conseguente aumento del tirante (lato spiaggia). I paramenti

hanno pendenza costante pari a 1:10, il tratto centrale è quindi a pendenza nulla e tutti risultano lisci ed impermeabili. Il tratto centrale assume una lunghezza netta di 3 m ed il piano di riferimento ha una quota pari a 0,41 m. I tre tratti, i due laterali e quelli inclinati, sono costituiti da pedane in alluminio aventi una lunghezza di 3 m, opportunamente raccordate tra di loro. Al fine di garantire la pendenza laterale costante di 1:10 sono state aggiunte lateralmente altre due pedane in alluminio della lunghezza di 1m. Tutta la struttura è stata opportunamente appesantita grazie all'uso di piastre e masse metalliche di vario tipo, questo per evitare spostamenti traslativi e di sollevamento dovuti alla spinta ed alla sottospinta sviluppate dal moto ondoso, che avrebbero certamente compromesso le misurazioni e quindi i risultati., Sono state inoltre poste sui bordi delle pedane, a contatto con le pareti laterali del canale, delle guarnizioni sagomate in gomma che non hanno in alcun modo interferito nella sperimentazione ma che hanno contribuito ad eliminare l'effetto di parete dovuto allo spazio tra la pedana e la tamponatura in vetro del canale.





Figura 20 configurazione completa della barra

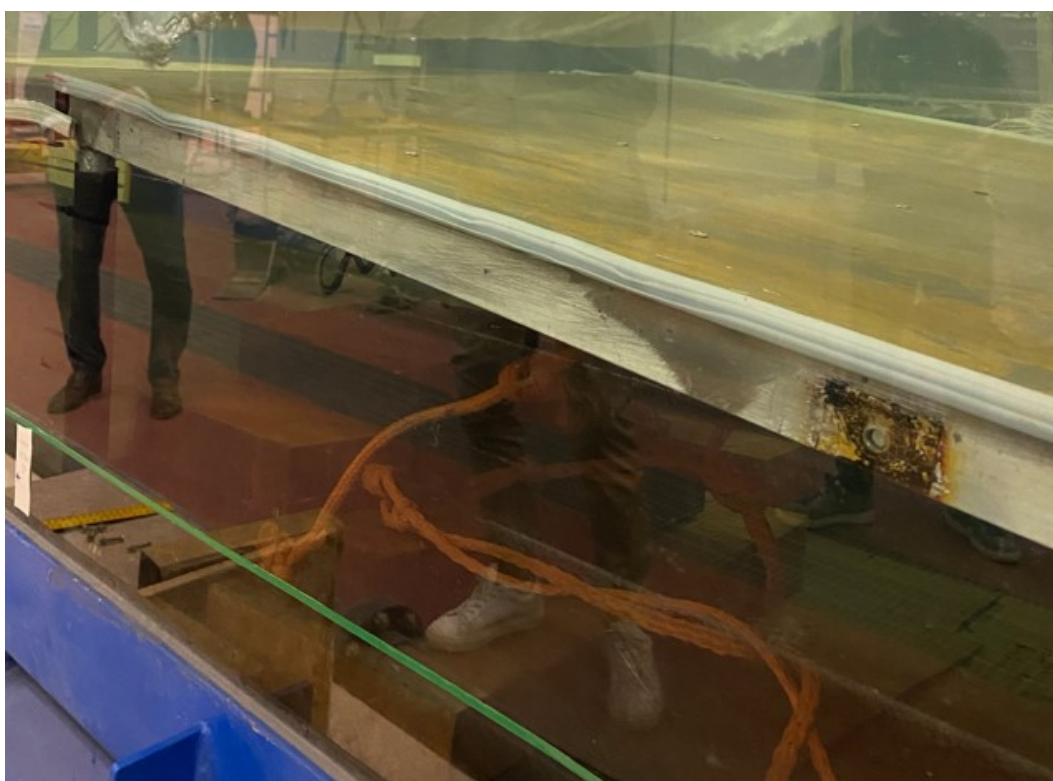


Figura 21 Sistema di appesantimento della pedana

Nella parte opposta al battitore d'onda è stata realizzata una spiaggia attraverso l'uso di pietrisco a granulometria circa costante, che ha il compito di assorbire l'onda trasmessa al di là della barra. La pendenza assegnata a tale spiaggia risulta essere di 1:20.

La scala di riferimento applicata, ovviamente a tutto il modello, è di 1:20.



Figura 22 Spiaggia assorbente all'estremità del canale

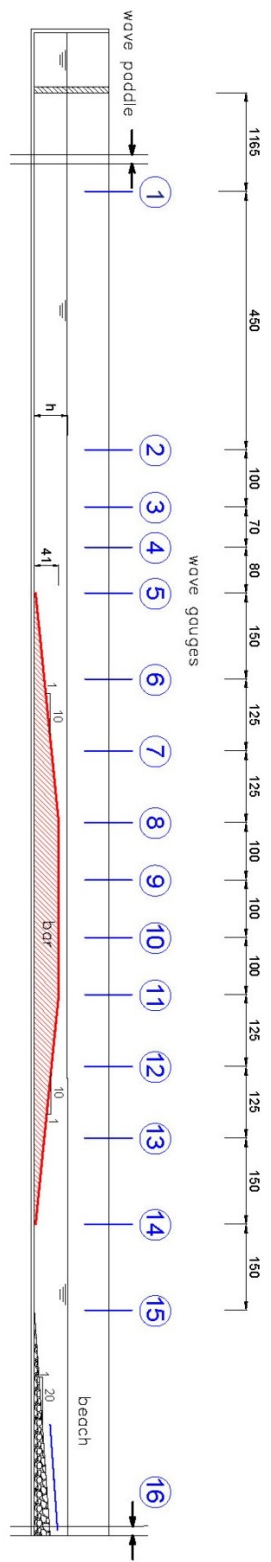


Figura 23 Schema dell'apparato di sperimentazione e del posizionamento delle sonde

3.6 Posizionamento delle sonde e metodo di separazione utilizzato

Al fine di poter applicare i metodi proposti in letteratura per separare le componenti incidente e riflessa del moto ondoso a partire dalle registrazioni delle sonde elettro-resistive, esse devono essere posizionate in maniera opportuna, in funzione del metodo che viene applicato. Nel caso in analisi si è fatto riferimento a due gruppi di sonde, il primo gruppo, costituito da quattro sonde, ha consentito l'analisi delle onde regolari con il metodo proposto da Lin e Huang, mentre il secondo gruppo, costituito da due sonde, ha permesso lo studio delle onde irregolari, applicando quindi il metodo Goda e Suzuki.

Occorre ricordare che, per quanto riguarda il metodo a quattro sonde, al fine di ottenere risultati ottimali debbono verificarsi contemporaneamente le seguenti condizioni:

$$\Delta x_2 = n \frac{L}{2}, \Delta x_3 = p \Delta x_2; \Delta x_4 = q \Delta x_2; \Delta x_4 = r \Delta x_3 \text{ con } n, p, q, r = 1, 2, \dots$$

Tali condizioni di spaziatura risultano essere quelle che hanno portato alla definizione dei vari Δx e diventano meno restrittive con l'aumento del numero di sonde, ciò significa che rispetto al

metodo delle due sonde oltre ad esser più preciso, risulta anche più versatile da applicare.

A dimostrazione di quanto appena descritto si è deciso di posizionare la prima sonda ad una distanza rispetto alla generazione pari a 11,65 m, e le successive 7 sonde a interassi rispettivamente di 4,50 m, 1 m, 0,70 m, 0,80 m, 1,50 m, 1,25 m, 1,25 m e 1,25 m, come riportato in Figura 23 per le sonde dalla 1 alla 8. Le quattro sonde di riferimento per l'applicazione dei metodi di separazione delle componenti sono state quelle dalla seconda alla quinta e con esse è stato possibile fare delle valutazioni relativamente alla riflessione dovuta alla presenza della barra. Ciascuna prova è stata poi ripetuta spostando sette sonde sopra e a valle dell'ostacolo (sonde dalla 9 alla 15 di Figura 25) per studiare anche la propagazione e la trasmissione dell'onda incidente e mantenendo la prima sonda "fissa" come riferimento.

Il metodo a due sonde è stato applicato nell'analisi delle onde irregolari. Occorre tener presente che al fine di ottimizzare per quanto possibile i risultati ottenuti, il metodo impone di collocare le sonde ad una distanza: maggiore di una lunghezza d'onda dalla struttura riflettente e dalla pala generatrice per onde irregolari, maggiore di $0,2L$ per onde regolari.

Capitolo 4 Analisi dei dati sperimentali

4.1 Premessa

Nel presente capitolo sono descritte le analisi dei dati ottenuti dalle attività sperimentali che costituiscono il punto di riferimento per lo studio dei fenomeni oggetto del presente lavoro di tesi. I test sono stati condotti presso il laboratorio di idraulica e costruzioni marittime del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (*DICEA*) dell'Università Politecnica delle Marche.

Nel seguito si riporta una descrizione delle condizioni ondose prese in esame per i vari casi di tirante idrico all'interno del canale (e quindi di sommersa della barra), nonché lo sviluppo di alcune importanti considerazioni relativamente alla riflessione e alla trasmissione rispetto all'onda incidente.

Occorre infatti premettere che la sperimentazione è stata condotta con un livello d'acqua nel canale pari a 0,51 m, al quale corrisponde una sommersa della barra pari a 0,10 m, e con un livello di 0,56 m, al quale corrisponde una sommersa della barra pari a 0,15 m.

Inoltre, sono stati osservati anche i risultati relativamente alla sola riflessione del moto ondoso in condizioni di barra emersa con un livello all'interno del canale costante e pari a 0,30 m.

4.2 Le onde oggetto di sperimentazione

Nel seguito vengono riportate le caratteristiche principali delle onde incidenti generate per mezzo del battionde che sono state protagoniste nello sviluppo di tali sperimentazioni, ovviamente in termini di altezza H , periodo T , lunghezza L , sia per quanto riguarda le onde regolari monocromatiche sia per quanto riguarda le onde irregolari, che come già spiegato sono state testate per le due condizioni di livello idrico, mentre per il caso di barra emersa sono state testate solo le onde regolari.

REGOLARI $h=0,30$ m.			
Nome	H [m]	L [m]	T [s]
H02_T100_h30	0.02	1.37	1.00
H02_T150_h30	0.02	2.34	1.50
H02_T200_h30	0.02	3.26	2.00
H04_T100_h30	0.04	1.37	1.00
H04_T150_h30	0.04	2.34	1.50
H04_T200_h30	0.04	3.26	2.00
H06_T100_h30	0.06	1.37	1.00
H06_T150_h30	0.06	2.34	1.50
H06_T200_h30	0.06	3.26	2.00
H08_T100_h30	0.08	1.37	1.00
H08_T150_h30	0.08	2.34	1.50
H08_T200_h30	0.08	3.26	2.00
H10_T100_h30	0.10	1.37	1.00
H10_T150_h30	0.10	2.34	1.50
H10_T200_h30	0.10	3.26	2.00

Tab.1 Caratteristiche delle onde regolari per barra emersa

REGOLARI $h=0,51$ m.			
Nome	H [m]	L [m]	T [s]
H2_T100	0.02	1.52	1
H2_T150	0.02	2.84	1.5
H2_T200	0.02	4.09	2
H2_T250	0.02	5.28	2.5
H3_T100	0.03	1.52	1
H3_T150	0.03	2.84	1.5
H3_T200	0.03	4.09	2
H3_T250	0.03	5.28	2.5
H4_T100	0.04	1.52	1
H4_T150	0.04	2.84	1.5
H4_T200	0.04	4.09	2
H4_T250	0.04	5.28	2.5
H5_T100	0.05	1.52	1
H5_T150	0.05	2.84	1.5
H5_T200	0.05	4.09	2
H5_T250	0.05	5.28	2.5
H6_T100	0.06	1.52	1
H6_T150	0.06	2.84	1.5
H6_T200	0.06	4.09	2
H6_T250	0.06	5.28	2.5
H8_T100	0.08	1.52	1
H8_T150	0.08	2.84	1.5
H8_T200	0.08	4.09	2
H8_T250	0.08	5.28	2.5
H10_T100	0.1	1.52	1
H10_T150	0.1	2.84	1.5
H10_T200	0.1	4.09	2
H10_T250	0.1	5.28	2.5
H12_T100	0.12	1.52	1
H12_T150	0.12	2.84	1.5
H12_T200	0.12	4.09	2
H12_T250	0.12	5.28	2.5
H15_T100	0.15	1.52	1
H15_T150	0.15	2.84	1.5
H15_T200	0.15	4.09	2
H15_T250	0.15	5.28	2.5

REGOLARI $h=0,56$ m.			
Nome	H [m]	L [m]	T [s]
H02_T100_Rc15	0.02	1.53	1
H02_T150_Rc15	0.02	2.93	1.5
H02_T200_Rc15	0.02	4.25	2
H02_T250_Rc15	0.02	5.51	2.5
H03_T100_Rc15	0.03	1.53	1
H03_T150_Rc15	0.03	2.93	1.5
H03_T200_Rc15	0.03	4.25	2
H03_T250_Rc15	0.03	5.51	2.5
H04_T100_Rc15	0.04	1.53	1
H04_T150_Rc15	0.04	2.93	1.5
H04_T200_Rc15	0.04	4.25	2
H04_T250_Rc15	0.04	5.51	2.5
H05_T100_Rc15	0.05	1.53	1
H05_T150_Rc15	0.05	2.93	1.5
H05_T200_Rc15	0.05	4.25	2
H05_T250_Rc15	0.05	5.51	2.5
H06_T100_Rc15	0.06	1.53	1
H06_T150_Rc15	0.06	2.93	1.5
H06_T200_Rc15	0.06	4.25	2
H06_T250_Rc15	0.06	5.51	2.5
H08_T100_Rc15	0.08	1.53	1
H08_T150_Rc15	0.08	2.93	1.5
H08_T200_Rc15	0.08	4.25	2
H08_T250_Rc15	0.08	5.51	2.5
H10_T100_Rc15	0.10	1.53	1
H10_T150_Rc15	0.10	2.93	1.5
H10_T200_Rc15	0.10	4.25	2
H10_T250_Rc15	0.10	5.51	2.5
H12_T100_Rc15	0.12	1.53	1
H12_T150_Rc15	0.12	2.93	1.5
H12_T200_Rc15	0.12	4.25	2
H12_T250_Rc15	0.12	5.51	2.5
H15_T100_Rc15	0.15	1.53	1
H15_T150_Rc15	0.15	2.93	1.5
H15_T200_Rc15	0.15	4.25	2
H15_T250_Rc15	0.15	5.51	2.5

Tab.2 e 3 Caratteristiche delle onde regolari per barra sommersa

IRREGOLARI $h=0,51$ m.		
H_s [m]	L [m]	T_p [s]
0.05	1.31	1.00
0.08	1.38	1.00
0.12	1.48	1.00
0.04	2.64	1.50
0.06	2.66	1.50
0.10	2.69	1.50
0.03	3.52	2.00
0.05	3.53	2.00
0.08	3.59	2.00
0.03	4.96	2.50
0.05	4.99	2.50
0.08	5.00	2.50

IRREGOLARI $h=0,56$ m.		
H_s [m]	L [m]	T_p [s]
0.05	1.31	1.00
0.08	1.38	1.00
0.12	1.48	1.00
0.04	2.64	1.50
0.06	2.66	1.50
0.10	2.69	1.50
0.03	3.52	2.00
0.05	3.53	2.00
0.08	3.59	2.00
0.03	4.96	2.50
0.05	4.99	2.50
0.08	5.00	2.50

Tab. 4 e 5 Caratteristiche delle onde irregolari per barra sommersa

4.3 Determinazione delle altezze d'onda incidente, riflessa e trasmessa per onde regolari

Come già precedentemente affermato l'analisi delle onde regolari in termini di altezze d'onda incidenti, riflesse e trasmesse sono state eseguite utilizzando l'approccio a quattro sonde illustrato da Lin e Huang nel 2004. I risultati sono stati elaborati attraverso lo sviluppo di un codice di calcolo con l'ausilio del software MatLab. Di seguito sono riportate le tabelle con i valori ottenuti. Il primo passo è quello di definire l'espressione della superficie libera:

$$\begin{aligned} \eta(x,t) = & a^{(1)}_I \cos(kx_m - \omega t + \phi^{(1)}_I) + a^{(1)}_R \cos(kx_m + \omega t + \phi^{(1)}_R) + \sum_{n>2} a^{(n)}_{I,B} \cos[n(kx_m - \\ & \omega t) + \phi^{(n)}_{I,B}] + \sum_{n>2} a^{(n)}_{R,B} \cos[n(kx_m + \omega t) + \phi^{(n)}_{R,B}] + \sum_{n>2} a^{(n)}_{I,F} \cos[(k^{(n)}x_m \\ & - n\omega t) + \phi^{(n)}_{I,F}] + \sum_{n>2} a^{(n)}_{R,F} \cos[(k^{(n)}x_m + n\omega t + \phi^{(n)}_{R,F})] + e_m(t) \quad [4.1] \end{aligned}$$

dopo di che la decomposizione dell'onda nella sua parte incidente e riflessa avviene applicando la trasformata di Fourier che associata alla prima componente armonica risulta:

$$F_1(x+\Delta x) = C^I_{(1)} X^I_{(1)} + C^R_{(1)} X^R_{(1)} + \Omega_m^{(1)} \quad [4.2]$$

dove i termini X sono incogniti ma ricavabili applicando un criterio di minimizzazione della funzione d'errore. Noto il termine incognito si ricavano le ampiezze delle componenti incidenti e riflesse per n ordine delle armoniche:

$$a_I^{(1)} = |X^I_{(1)}| ; a_R^{(1)} = |X^R_{(1)}| \quad [4.3]$$

a tal punto risulta facilmente individuabile l'altezza della componente incidente e riflessa come:

$$H^{(1)}_I = 2 a_I^{(1)} ; H^{(1)}_R = 2 a_R^{(1)} \quad [4.4]$$

L'altezza dell'onda trasmessa può essere individuata per registrazione dello strumento, ma ovviamente, dopo aver

ripetuto le varie prove con le stesse onde di riferimento con i misuratori d'onda situati a valle della barra, sono state prese in considerazione quelle misurate alla sonda 1 e alla 15 (in termini di $H_{1/3}$ e H_{m0}) questo per avere la possibilità di determinare il coefficiente di trasmissione in diversi modi.

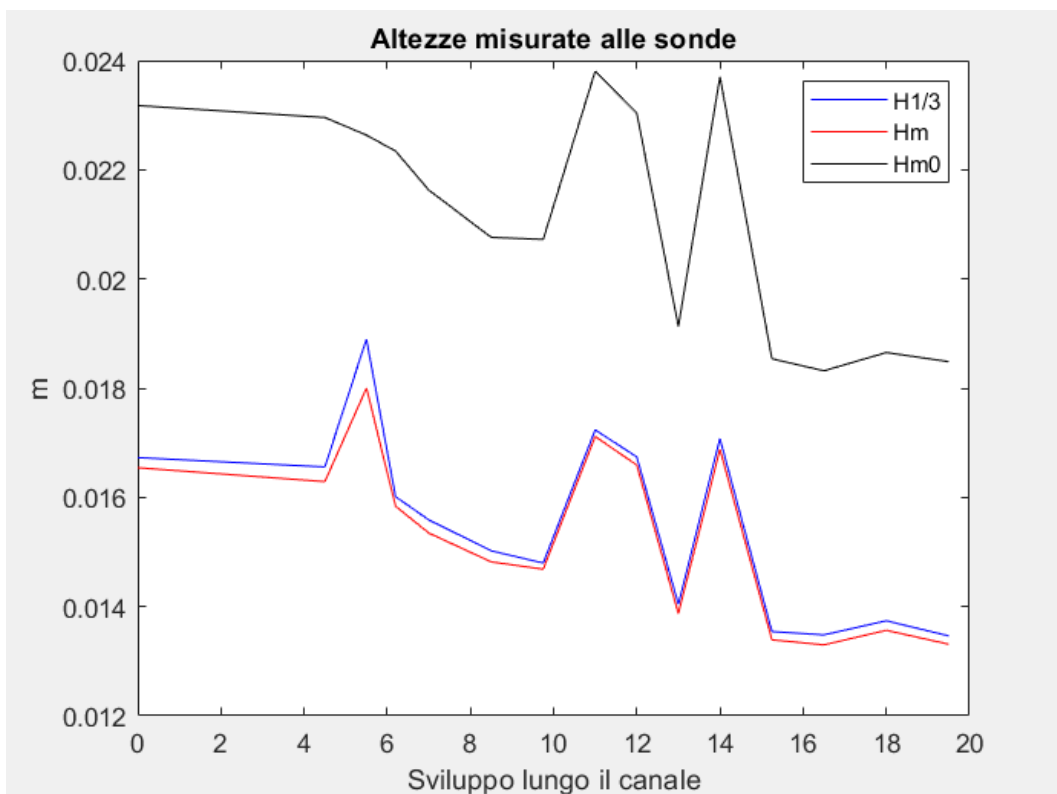


Figura 24 Andamento delle altezze d'onda misurate alle varie sonde (per un'onda regolare con $H=2$ cm $T=1$ s e con profondità alla pala di 0,51 m)

Altezze determinate per onde REGOLARI h=0,51 m.								
Nome	H [m]	T [s]	HI [m]	HR [m]	Hm0(S1) [m]	H1/3(S1) [m]	Hm0(S15) [m]	H1/3(S15) [m]
H2_T100	0.02	1	0.016016	0.000720	0.023175	0.016728	0.018485	0.013462
H2_T150	0.02	1.5	0.018018	0.001738	0.025243	0.018936	0.023805	0.019701
H2_T200	0.02	2	0.016026	0.000625	0.023125	0.017012	0.022297	0.019651
H2_T250	0.02	2.5	0.015754	0.000787	0.023151	0.017237	0.022502	0.022967
H3_T100	0.03	1	0.024594	0.001027	0.035448	0.025070	0.028611	0.020719
H3_T150	0.03	1.5	0.027158	0.002479	0.038390	0.027897	0.035168	0.027907
H3_T200	0.03	2	0.024209	0.000982	0.034615	0.025473	0.035694	0.030834
H3_T250	0.03	2.5	0.024452	0.001142	0.035211	0.025595	0.040018	0.042910
H4_T100	0.04	1	0.032624	0.000652	0.046785	0.033192	0.039487	0.028769
H4_T150	0.04	1.5	0.036193	0.003201	0.051489	0.037953	0.042980	0.038965
H4_T200	0.04	2	0.032367	0.001598	0.046054	0.034587	0.047325	0.039654
H4_T250	0.04	2.5	0.033661	0.001486	0.047208	0.034592	0.035970	0.041097
H5_T100	0.05	1	0.039994	0.001651	0.057183	0.040779	0.049341	0.035459
H5_T150	0.05	1.5	0.045206	0.003922	0.064460	0.047231	0.034931	0.033913
H5_T200	0.05	2	0.041113	0.002490	0.057219	0.041264	0.038155	0.034488
H5_T250	0.05	2.5	0.041551	0.002160	0.059799	0.044438	0.036715	0.040391
H6_T100	0.06	1	0.046755	0.002321	0.068416	0.048773	0.059078	0.041777
H6_T150	0.06	1.5	0.053875	0.004872	0.077003	0.055598	0.033610	0.033552
H6_T200	0.06	2	0.049049	0.004086	0.068671	0.049220	0.036303	0.032310
H6_T250	0.06	2.5	0.050032	0.003692	0.071893	0.053191	0.037019	0.037887
H8_T100	0.08	1	0.062556	0.004963	0.091082	0.065909	0.047143	0.040552
H8_T150	0.08	1.5	0.071109	0.005527	0.102151	0.072449	0.040245	0.041085
H8_T200	0.08	2	0.066852	0.007321	0.094653	0.067716	0.036617	0.030739
H8_T250	0.08	2.5	0.068400	0.008588	0.096285	0.070591	0.040729	0.048839
H10_T100	0.1	1	0.079798	0.009460	0.113870	0.081684	0.042292	0.036945
H10_T150	0.1	1.5	0.090225	0.008710	0.128475	0.093580	0.044905	0.036639
H10_T200	0.1	2	0.083324	0.012055	0.116670	0.083988	0.040812	0.033989
H10_T250	0.1	2.5	0.089599	0.024231	0.125609	0.096269	0.044812	0.051322
H12_T100	0.12	1	0.094227	0.009945	0.135426	0.096556	0.040812	0.034810
H12_T150	0.12	1.5	0.108535	0.013917	0.156720	0.114858	0.042930	0.037235
H12_T200	0.12	2	0.098169	0.016199	0.134048	0.097990	0.037159	0.032394
H12_T250	0.12	2.5	0.107131	0.030703	0.154450	0.116081	0.048388	0.054743
H15_T100	0.15	1	0.118435	0.015616	0.159703	0.119385	0.040101	0.035878
H15_T150	0.15	1.5	0.133249	0.021649	0.195299	0.146257	0.051204	0.043291
H15_T200	0.15	2	0.121813	0.025812	0.159964	0.117768	0.039475	0.034378
H15_T250	0.15	2.5	0.136678	0.061880	0.193502	0.137390	0.053581	0.058974

Tab.6 Altezze d'onda misurate e calcolate per barra sommersa

(h=0,51m)

Altezze determinate per onde REGOLARI h=0,56 m.								
Nome	H [m]	T [s]	HI [m]	HR [m]	Hm0(S1) [m]	H1/3(S1) [m]	Hm0(S15) [m]	H1/3(S15) [m]
H02_T100_Rc15	0.02	1	0.016321	0.000617	0.022898	0.016776	0.020059	0.014505
H02_T150_Rc15	0.02	1.5	0.016855	0.000632	0.024164	0.017371	0.020641	0.014960
H02_T200_Rc15	0.02	2	0.017152	0.003212	0.028520	0.020453	0.020786	0.017942
H02_T250_Rc15	0.02	2.5	0.015029	0.002530	0.024094	0.017577	0.018565	0.015785
H03_T100_Rc15	0.03	1	0.024685	0.000900	0.034748	0.025033	0.030379	0.022095
H03_T150_Rc15	0.03	1.5	0.024895	0.001262	0.036890	0.026427	0.031485	0.022351
H03_T200_Rc15	0.03	2	0.025810	0.004482	0.042126	0.030033	0.033899	0.023782
H03_T250_Rc15	0.03	2.5	0.023003	0.003227	0.036446	0.026362	0.031093	0.029750
H04_T100_Rc15	0.04	1	0.032186	0.001223	0.046192	0.033483	0.040450	0.029928
H04_T150_Rc15	0.04	1.5	0.033382	0.001896	0.049564	0.035595	0.042467	0.029897
H04_T200_Rc15	0.04	2	0.034501	0.005793	0.055609	0.040015	0.048415	0.034508
H04_T250_Rc15	0.04	2.5	0.031078	0.004086	0.049068	0.035588	0.045971	0.046936
H05_T100_Rc15	0.05	1	0.040304	0.001250	0.057260	0.041084	0.050884	0.037605
H05_T150_Rc15	0.05	1.5	0.042852	0.002677	0.062238	0.044717	0.053216	0.037531
H05_T200_Rc15	0.05	2	0.043077	0.007155	0.068360	0.049187	0.062643	0.043074
H05_T250_Rc15	0.05	2.5	0.039409	0.005088	0.061693	0.045361	0.061689	0.066716
H06_T100_Rc15	0.06	1	0.048089	0.003272	0.068934	0.049280	0.061376	0.045660
H06_T150_Rc15	0.06	1.5	0.050169	0.003312	0.074879	0.053846	0.064178	0.046708
H06_T200_Rc15	0.06	2	0.051961	0.008788	0.081014	0.058448	0.076543	0.051484
H06_T250_Rc15	0.06	2.5	0.047757	0.005967	0.074496	0.053511	0.075093	0.085864
H08_T100_Rc15	0.08	1	0.063245	0.003550	0.090508	0.065141	0.083380	0.059891
H08_T150_Rc15	0.08	1.5	0.067477	0.004997	0.100424	0.072657	0.088823	0.082629
H08_T200_Rc15	0.08	2	0.068455	0.011117	0.106243	0.076887	0.055838	0.048237
H08_T250_Rc15	0.08	2.5	0.064468	0.009042	0.100094	0.071607	0.056934	0.062366
H10_T100_Rc15	0.1	1	0.078006	0.006324	0.113036	0.080237	0.099388	0.077238
H10_T150_Rc15	0.1	1.5	0.084578	0.006490	0.124507	0.089292	0.067105	0.057212
H10_T200_Rc15	0.1	2	0.087976	0.018252	0.132304	0.096436	0.057201	0.049326
H10_T250_Rc15	0.1	2.5	0.081969	0.012777	0.124813	0.088837	0.060435	0.066006
H12_T100_Rc15	0.12	1	0.094189	0.013630	0.135983	0.098516	0.078375	0.060362
H12_T150_Rc15	0.12	1.5	0.101384	0.009904	0.149384	0.106532	0.074656	0.058707
H12_T200_Rc15	0.12	2	0.104891	0.021511	0.155501	0.113559	0.061374	0.054712
H12_T250_Rc15	0.12	2.5	0.098678	0.017229	0.150024	0.105324	0.065034	0.071536
H15_T100_Rc15	0.15	1	0.116860	0.017423	0.163426	0.120988	0.070329	0.055888
H15_T150_Rc15	0.15	1.5	0.126132	0.017147	0.187344	0.134914	0.076837	0.069081
H15_T200_Rc15	0.15	2	0.130850	0.026821	0.188125	0.138197	0.064781	0.058410
H15_T250_Rc15	0.15	2.5	0.122380	0.024549	0.188253	0.135437	0.068421	0.078686

Tab.7 Altezze d'onda misurate e calcolate per barra sommersa

(h=0,56 m)

Altezze determinate per onde REGOLARI h=0,30 m.				
Nome	H [m]	T [s]	HI [m]	HR [m]
H02_T100_h30	0.02	1.00	0.017936	0.007486
H02_T150_h30	0.02	1.50	0.014369	0.002177
H02_T200_h30	0.02	2.00	0.018483	0.005277
H04_T100_h30	0.04	1.00	0.038531	0.014890
H04_T150_h30	0.04	1.50	0.031270	0.007166
H04_T200_h30	0.04	2.00	0.032680	0.007633
H06_t100_h30	0.06	1.00	0.056492	0.021040
H06_t150_h30	0.06	1.50	0.046509	0.004873
H06_t200_h30	0.06	2.00	0.050336	0.020289
H08_T100_h30	0.08	1.00	0.075421	0.029415
H08_T150_h30	0.08	1.50	0.061101	0.017229
H08_T200_h30	0.08	2.00	0.072951	0.040709
H10_T100_h30	0.10	1.00	0.092737	0.034949
H10_T150_h30	0.10	1.50	0.077579	0.019524
H10_T200_h30	0.10	2.00	0.102605	0.067365

Tab.8 Altezze d'onda calcolate per barra emersa (h=0,30 m)

Vengono riportati gli andamenti della superficie libera incidente e riflessa di un'onda avente alla generazione un'altezza di 0,02 m, un periodo di 1 s per le profondità alla generazione di 0,51 m, 0,56 m.

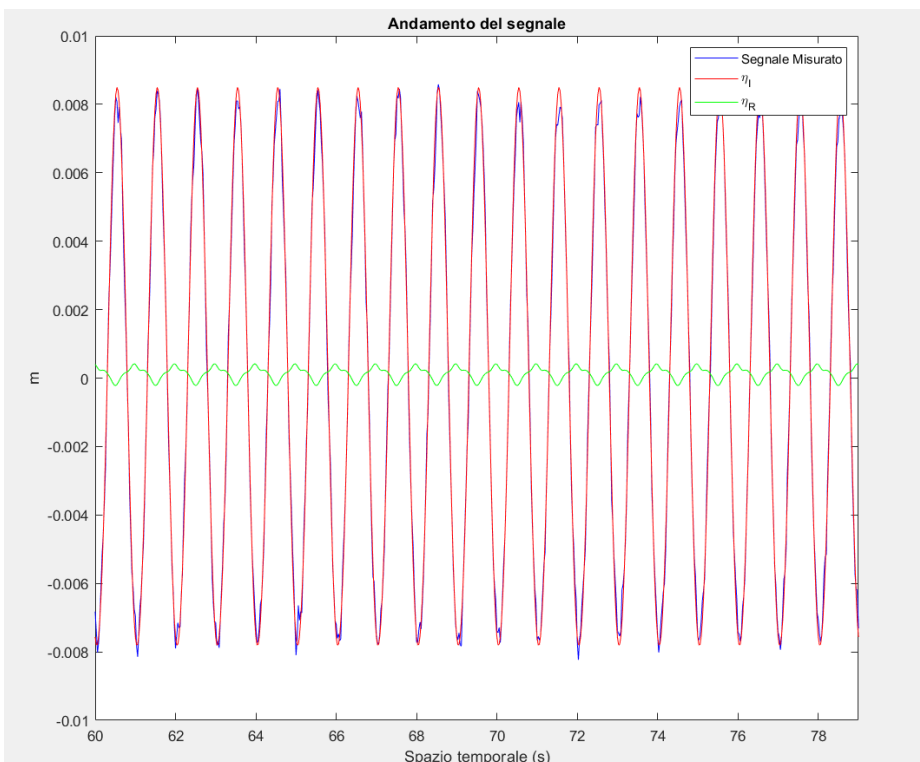
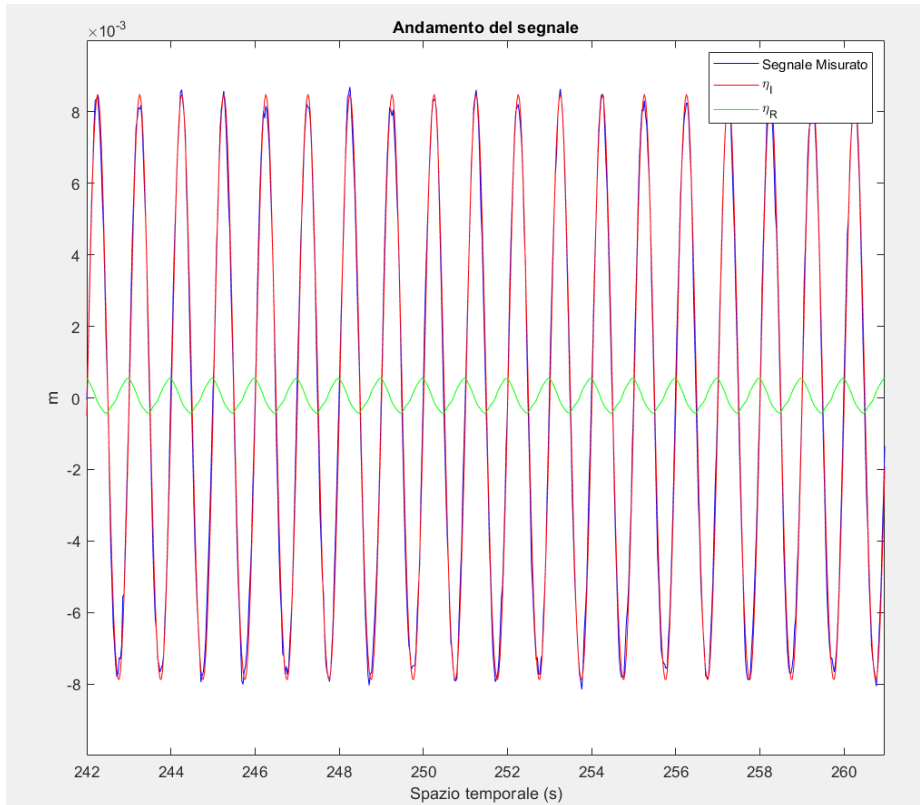


Figura 25 Andamento del profilo incidente e riflesso di un'onda con $H=2$ cm $T=1$ s per le due diverse profondità

4.3.1 Determinazione delle ampiezze delle armoniche superiori

Applicando quanto descritto al precedente paragrafo in maniera estesa, con il metodo di Lin e Huang è possibile ricavare l'ampiezza delle armoniche di ordine superiore, il che significa andare a considerare le equazioni di riferimento non più al primo ordine ma all'ordine n . Nello specifico, per le onde regolari, sono stati osservati i risultati dall'ordine $n=1$ all'ordine $n=5$ con la rispettiva decomposizione che vede la presenza non solo di onde incidenti e riflesse ma anche incidenti legate (I,B) ed incidenti libere (I,F) nonché riflesse legate (R,B) e riflesse libere (R,F), sempre con l'ausilio di un codice di calcolo sviluppato con il software MatLab. I valori ottenuti sono riportati nel seguito mediante delle tabelle illustrative, per le profondità di 0,51 m, 0,56 m e 0,30 m. In Figura 26 per l'onda $H=0,02$ m e $T=1$ s, vengono riportati i valori ricostruiti delle ampiezze incidenti e riflesse, sia libere e che legate, delle varie componenti armoniche.

Componenti delle armoniche per onda regolare barra sommersa (h=0,51 m.)																			
Nome	H [m]	T [s]	a1_j	a1_R	a2_IB	a2_RB	a2_RF	a3_IB	a3_IF	a3_RF	a4_IF	a4_RB	a4_RF	a5_IB	a5_IF	a5_RB	a5_RF		
H2_T100	0.02	1	0.008004	0.000228	0.000148	0.000201	0.000181	0.000199	0.000041	0.000012	0.000045	0.000029	0.000018	0.000009	0.000019	0.000037	0.000021	0.000043	0.000038
H2_T150	0.02	1.5	0.009002	0.000800	0.000179	0.000099	0.000125	0.000217	0.000130	0.000240	0.000129	0.000180	0.000117	0.000014	0.000037	0.000021	0.000011	0.000057	0.000008
H2_T200	0.02	2	0.008004	0.000164	0.000150	0.000123	0.000087	0.000167	0.000092	0.000304	0.000038	0.000154	0.000057	0.000039	0.000068	0.000071	0.000004	0.000053	0.000032
H2_T250	0.02	2.5	0.007862	0.000295	0.000041	0.000377	0.000056	0.000172	0.000078	0.000261	0.000062	0.000147	0.000009	0.000037	0.000021	0.000084	0.000009	0.000143	0.000032
H3_T100	0.03	1	0.012284	0.000215	0.000227	0.000501	0.000298	0.000350	0.000026	0.000023	0.000030	0.000051	0.000020	0.000015	0.000042	0.000013	0.000026	0.000042	0.000036
H3_T150	0.03	1.5	0.013569	0.001143	0.000408	0.000240	0.000297	0.000337	0.000120	0.000190	0.000101	0.000105	0.000017	0.000034	0.000045	0.000052	0.000018	0.000009	0.000036
H3_T200	0.03	2	0.012095	0.000081	0.000335	0.000224	0.000217	0.000334	0.000023	0.000216	0.000111	0.000168	0.000070	0.000034	0.000067	0.000169	0.000018	0.000084	0.000042
H3_T250	0.03	2.5	0.012178	0.000163	0.000072	0.001043	0.000114	0.000436	0.000023	0.000184	0.000145	0.000232	0.000035	0.000079	0.000012	0.000139	0.000009	0.000117	0.000034
H4_T100	0.04	1	0.016301	0.000078	0.000273	0.000529	0.000270	0.000134	0.000055	0.000025	0.000010	0.000059	0.000022	0.000010	0.000048	0.000010	0.000014	0.000014	0.000017
H4_T150	0.04	1.5	0.018075	0.001436	0.000705	0.000371	0.000493	0.000386	0.000162	0.000343	0.000200	0.000250	0.000029	0.000062	0.000038	0.000052	0.000020	0.000005	0.000018
H4_T200	0.04	2	0.016157	0.000027	0.000420	0.000779	0.000706	0.000296	0.000096	0.000096	0.000063	0.000044	0.000021	0.000013	0.000003	0.000053	0.000009	0.000056	0.000036
H4_T250	0.04	2.5	0.016657	0.000345	0.000138	0.002397	0.000227	0.000583	0.000167	0.000114	0.000143	0.000051	0.000047	0.000026	0.000040	0.000049	0.000015	0.000049	0.000073
H5_T100	0.05	1	0.019975	0.000208	0.000410	0.000824	0.000511	0.000595	0.000048	0.000085	0.000072	0.000112	0.000040	0.000039	0.000034	0.000059	0.000019	0.000044	0.000011
H5_T150	0.05	1.5	0.022568	0.001606	0.001016	0.000467	0.000681	0.000710	0.000266	0.000444	0.000302	0.000401	0.000054	0.000224	0.000178	0.000114	0.000013	0.000016	0.000021
H5_T200	0.05	2	0.020506	0.000182	0.000615	0.001300	0.001143	0.000440	0.000064	0.000065	0.000060	0.000094	0.000017	0.000018	0.000017	0.000052	0.000031	0.000011	0.000028
H5_T250	0.05	2.5	0.020483	0.000310	0.000210	0.003428	0.000346	0.000772	0.000298	0.000276	0.000344	0.000334	0.000116	0.000276	0.000095	0.000258	0.000121	0.000146	0.000112
H6_T100	0.06	1	0.023341	0.000685	0.000456	0.001198	0.000574	0.000702	0.000132	0.000194	0.000203	0.000069	0.000086	0.000050	0.000080	0.000027	0.000017	0.000029	0.000027
H6_T150	0.06	1.5	0.026889	0.001655	0.001462	0.000576	0.000976	0.001461	0.000046	0.000209	0.000058	0.000232	0.000060	0.000233	0.000172	0.000086	0.000104	0.000059	0.000065
H6_T200	0.06	2	0.024425	0.000310	0.001272	0.001571	0.001443	0.001193	0.000234	0.000756	0.000103	0.000593	0.000281	0.000219	0.000212	0.000369	0.000051	0.000191	0.000161
H6_T250	0.06	2.5	0.024493	0.000353	0.000299	0.000476	0.000506	0.001082	0.000022	0.000497	0.000958	0.000914	0.000238	0.000203	0.000236	0.000192	0.000057	0.000164	0.000091
H8_T100	0.08	1	0.031182	0.001403	0.001184	0.002089	0.001372	0.001462	0.000328	0.000287	0.000385	0.000116	0.000075	0.000114	0.000067	0.000057	0.000018	0.000021	0.000010
H8_T150	0.08	1.5	0.035473	0.001636	0.002188	0.000445	0.001193	0.001683	0.000373	0.000721	0.000491	0.000639	0.000209	0.000203	0.000077	0.000137	0.000113	0.000075	0.000104
H8_T200	0.08	2	0.033170	0.000328	0.002262	0.0003344	0.003008	0.001967	0.000353	0.000725	0.000161	0.000540	0.000173	0.000216	0.000166	0.000168	0.000034	0.000056	0.000057
H8_T250	0.08	2.5	0.032679	0.000221	0.000570	0.0009648	0.000948	0.001443	0.0002338	0.001592	0.002673	0.002830	0.000313	0.000367	0.000354	0.000308	0.000043	0.000230	0.000116
H10_T100	0.1	1	0.039574	0.001831	0.002455	0.003649	0.004770	0.004074	0.0003101	0.000760	0.000555	0.000806	0.000250	0.000208	0.000178	0.000197	0.000033	0.000073	0.000024
H10_T150	0.1	1.5	0.044912	0.002502	0.004044	0.000783	0.002548	0.002332	0.000439	0.000910	0.000497	0.000654	0.000081	0.000101	0.000164	0.000249	0.000053	0.000147	0.000075
H10_T200	0.1	2	0.041136	0.000525	0.003649	0.004770	0.004074	0.003747	0.000495	0.002591	0.000489	0.002115	0.000517	0.000424	0.000328	0.000678	0.000085	0.000258	0.000361
H10_T250	0.1	2.5	0.041358	0.001723	0.000984	0.0015638	0.001614	0.002950	0.005942	0.003692	0.007442	0.008622	0.000609	0.001121	0.000542	0.001342	0.000562	0.000290	0.000746
H12_T100	0.12	1	0.046804	0.002709	0.002710	0.004552	0.003103	0.002611	0.000690	0.000682	0.000871	0.000348	0.000057	0.000205	0.000045	0.000216	0.000062	0.000131	0.000097
H12_T150	0.12	1.5	0.053807	0.002737	0.006485	0.000043	0.004107	0.004139	0.001079	0.002545	0.001575	0.002085	0.000304	0.000072	0.000132	0.000208	0.000111	0.000055	0.000204
H12_T200	0.12	2	0.048387	0.001605	0.000867	0.000595	0.005295	0.004674	0.000464	0.002775	0.000336	0.000340	0.000392	0.000359	0.000166	0.000344	0.000173	0.0000512	0.000348
H12_T250	0.12	2.5	0.047131	0.0003253	0.001344	0.0020795	0.002036	0.002808	0.011381	0.008955	0.011186	0.008681	0.001492	0.000892	0.000243	0.002474	0.000801	0.000586	0.000680
H15_T100	0.15	1	0.058846	0.001789	0.002426	0.0005927	0.003508	0.006498	0.001581	0.000187	0.001053	0.001359	0.000231	0.000485	0.000232	0.000481	0.000031	0.000093	0.000036
H15_T150	0.15	1.5	0.065285	0.002275	0.011632	0.004864	0.007168	0.006435	0.002427	0.003399	0.001850	0.003899	0.000197	0.000449	0.000436	0.000575	0.000046	0.000212	0.000041
H15_T200	0.15	2	0.059196	0.003247	0.006362	0.012263	0.010566	0.005132	0.000441	0.003656	0.000977	0.000407	0.000748	0.000650	0.000714	0.000371	0.000105	0.000237	0.000255
H15_T250	0.15	2.5	0.054339	0.003939	0.001979	0.031867	0.002776	0.000343	0.020980	0.015634	0.022224	0.020454	0.003014	0.001374	0.003033	0.000348	0.001179	0.001041	0.001306

Tab.9 Componenti armoniche principali e secondarie per onde

regolari

Componenti delle armoniche per onda regolare barra sommersa (h=0,56 m.)																				
Nome	H [m]	T [s]	a1_L	a1_R	a2_IB	a2_IF	a2_RB	a2_RF	a3_IB	a3_IF	a3_RB	a3_RF	a4_IB	a4_IF	a4_RB	a4_RF	a5_IB	a5_IF	a5_RB	a5_RF
H02_T100_Rc15	0.02	1	0.008158	0.000245	0.000087	0.000177	0.000112	0.000141	0.000040	0.000050	0.000049	0.000013	0.000014	0.000021	0.000018	0.000003	0.000005	0.000010	0.000005	0.000008
H02_T150_Rc15	0.02	1.5	0.008426	0.000274	0.000153	0.000020	0.000123	0.000091	0.000007	0.000006	0.000003	0.000022	0.000010	0.000008	0.000002	0.000017	0.000019	0.000012	0.000012	0.000012
H02_T200_Rc15	0.02	2	0.008565	0.001567	0.000054	0.000390	0.000286	0.001579	0.000032	0.000131	0.000044	0.000060	0.000024	0.000038	0.000019	0.000029	0.000027	0.000017	0.000043	0.000022
H02_T250_Rc15	0.02	2.5	0.007470	0.001105	0.000030	0.000480	0.000154	0.000471	0.000048	0.000458	0.000371	0.000059	0.000020	0.000066	0.000036	0.000015	0.000017	0.000030	0.000026	0.000010
H03_T100_Rc15	0.03	1	0.012333	0.000277	0.000195	0.000430	0.000245	0.000045	0.000040	0.000448	0.000050	0.000031	0.000042	0.000035	0.000041	0.000029	0.000009	0.000023	0.000003	0.000001
H03_T150_Rc15	0.03	1.5	0.012440	0.000513	0.000342	0.000158	0.000282	0.000207	0.000081	0.000217	0.000072	0.000069	0.000018	0.000035	0.000014	0.000041	0.000012	0.000008	0.000010	0.000013
H03_T200_Rc15	0.03	2	0.012871	0.002094	0.000172	0.000900	0.000655	0.000416	0.000050	0.000146	0.000063	0.000157	0.000039	0.000066	0.000037	0.000025	0.0000123	0.000044	0.000018	0.000018
H03_T250_Rc15	0.03	2.5	0.011446	0.001548	0.000073	0.001050	0.000114	0.000284	0.000284	0.000262	0.000192	0.000035	0.000040	0.000040	0.000010	0.000022	0.000118	0.000044	0.000042	0.000042
H04_T100_Rc15	0.04	1	0.016082	0.000537	0.000253	0.000535	0.000245	0.000118	0.000033	0.000047	0.000027	0.000092	0.000038	0.000014	0.000042	0.000022	0.000008	0.000023	0.000014	0.000014
H04_T150_Rc15	0.04	1.5	0.016676	0.000698	0.000601	0.000278	0.000461	0.000416	0.000087	0.000216	0.000063	0.000113	0.000025	0.000042	0.000026	0.000055	0.000056	0.000053	0.000045	0.000055
H04_T200_Rc15	0.04	2	0.017158	0.002450	0.000407	0.001726	0.001203	0.000917	0.000081	0.000191	0.000096	0.000298	0.000011	0.000049	0.000015	0.000024	0.000048	0.000037	0.000051	0.000014
H04_T250_Rc15	0.04	2.5	0.015416	0.001970	0.000130	0.001907	0.000209	0.000395	0.000347	0.000114	0.000259	0.000022	0.000063	0.000087	0.000081	0.000120	0.000025	0.000038	0.000039	0.000059
H05_T100_Rc15	0.05	1	0.020145	0.000582	0.000181	0.000473	0.000149	0.000096	0.000077	0.000116	0.000082	0.000092	0.000040	0.000032	0.000059	0.000010	0.000030	0.000058	0.000016	0.000037
H05_T150_Rc15	0.05	1.5	0.021400	0.000975	0.000923	0.000524	0.000726	0.000544	0.000063	0.000040	0.000046	0.000112	0.000013	0.000021	0.000006	0.000050	0.000011	0.000029	0.000027	0.000014
H05_T200_Rc15	0.05	2	0.021363	0.002712	0.000689	0.002652	0.001885	0.001366	0.000076	0.000106	0.000068	0.000104	0.000023	0.000042	0.000013	0.000030	0.000033	0.000112	0.000037	0.000062
H05_T250_Rc15	0.05	2.5	0.019482	0.002439	0.000213	0.002878	0.000336	0.000472	0.000560	0.000192	0.000363	0.000059	0.000140	0.000071	0.000160	0.000060	0.000028	0.000078	0.000028	0.000056
H06_T100_Rc15	0.06	1	0.023957	0.000722	0.000879	0.001831	0.000995	0.001046	0.000181	0.000142	0.000183	0.000102	0.000113	0.000126	0.000116	0.000097	0.000100	0.000062	0.000023	0.000027
H06_T150_Rc15	0.06	1.5	0.025043	0.001147	0.001231	0.000694	0.000982	0.000658	0.000187	0.000138	0.000104	0.000114	0.000033	0.000061	0.000042	0.000012	0.000033	0.000056	0.000027	0.000027
H06_T200_Rc15	0.06	2	0.025666	0.002688	0.001125	0.003862	0.002762	0.002101	0.000110	0.000152	0.000144	0.000084	0.000041	0.000065	0.000033	0.000031	0.000067	0.000148	0.000052	0.000052
H06_T250_Rc15	0.06	2.5	0.023501	0.002812	0.000298	0.004063	0.000479	0.000470	0.000993	0.000495	0.000673	0.000172	0.000110	0.000125	0.000156	0.000153	0.000052	0.000102	0.000062	0.000099
H08_T100_Rc15	0.08	1	0.031589	0.000763	0.000613	0.001312	0.000807	0.001345	0.000021	0.000094	0.000030	0.000312	0.000071	0.000106	0.000057	0.000085	0.000020	0.000037	0.000006	0.000009
H08_T150_Rc15	0.08	1.5	0.033643	0.001602	0.002082	0.001285	0.001586	0.000984	0.000220	0.000597	0.000260	0.000317	0.000045	0.000072	0.000059	0.000116	0.000049	0.000099	0.000077	0.000044
H08_T200_Rc15	0.08	2	0.033746	0.002696	0.001707	0.005447	0.004024	0.002687	0.000181	0.000343	0.000176	0.000420	0.000049	0.000066	0.000044	0.000061	0.000031	0.000086	0.000042	0.000074
H08_T250_Rc15	0.08	2.5	0.031320	0.003752	0.000510	0.007174	0.000837	0.000612	0.001708	0.001811	0.001506	0.001687	0.000334	0.000216	0.000317	0.000206	0.000143	0.000056	0.000058	0.000058
H10_T100_Rc15	0.10	1	0.038884	0.001593	0.001125	0.002789	0.001459	0.002260	0.000311	0.000289	0.000100	0.000444	0.000052	0.000215	0.000057	0.000076	0.000028	0.000136	0.000058	0.000073
H10_T150_Rc15	0.10	1.5	0.042128	0.001452	0.003329	0.001527	0.002310	0.001706	0.000287	0.000264	0.000270	0.000293	0.000075	0.000255	0.000023	0.000100	0.000062	0.000030	0.000052	0.000055
H10_T200_Rc15	0.10	2	0.042857	0.003392	0.002894	0.009399	0.006988	0.004624	0.000388	0.001119	0.000406	0.001145	0.000084	0.000295	0.000130	0.000237	0.000014	0.000055	0.000019	0.000083
H10_T250_Rc15	0.10	2.5	0.039111	0.004211	0.000810	0.011324	0.001313	0.001091	0.002988	0.003456	0.002865	0.003443	0.000364	0.000330	0.000139	0.000267	0.000062	0.000130	0.000073	0.000062
H12_T100_Rc15	0.12	1	0.046407	0.001585	0.003176	0.007156	0.003947	0.005108	0.001199	0.001133	0.001349	0.000382	0.000463	0.000163	0.000430	0.000328	0.000033	0.000095	0.000023	0.000088
H12_T150_Rc15	0.12	1.5	0.050355	0.001422	0.005240	0.002060	0.003784	0.002544	0.000620	0.001359	0.000644	0.001073	0.000155	0.000062	0.000115	0.000297	0.000109	0.000205	0.000155	0.000146
H12_T200_Rc15	0.12	2	0.050988	0.003389	0.003774	0.011455	0.008787	0.004845	0.000760	0.002101	0.000739	0.001669	0.000144	0.000444	0.000189	0.000347	0.000065	0.000288	0.000082	0.000179
H12_T250_Rc15	0.12	2.5	0.046298	0.004757	0.001175	0.015720	0.001900	0.001235	0.003956	0.005406	0.004246	0.005306	0.000959	0.000159	0.000271	0.000119	0.000188	0.000148	0.000054	0.000060
H15_T100_Rc15	0.15	1	0.057533	0.001442	0.004288	0.009076	0.004701	0.006869	0.000257	0.001762	0.001043	0.001611	0.000138	0.000024	0.000210	0.000886	0.000090	0.000148	0.000054	0.000060
H15_T150_Rc15	0.15	1.5	0.062437	0.002726	0.008264	0.001685	0.006374	0.004666	0.000780	0.002646	0.001437	0.001140	0.000271	0.000060	0.000062	0.000337	0.0000239	0.000291	0.0000246	0.0000371
H15_T200_Rc15	0.15	2	0.063415	0.002260	0.005977	0.014538	0.011886	0.005930	0.001403	0.003046	0.001262	0.002426	0.000340	0.000635	0.000501	0.0009560	0.000181	0.000230	0.0000188	0.000273
H15_T250_Rc15	0.15	2.5	0.055460	0.006175	0.001806	0.024811	0.002957	0.003163	0.001971	0.006329	0.005643	0.007803	0.002205	0.000576	0.000770	0.000509	0.000461	0.000226	0.0000394	0.000394

Tab. 10 Componenti armoniche principali e secondarie per onde regolari

Componenti delle armoniche per onda regolare barra emersa (h=0,30 m.)																				
Nome	H [m]	T [s]	a1_I	a1_R	a2_IB	a2_IF	a2_RB	a2_RF	a3_IB	a3_IF	a3_RB	a3_RF	a4_IB	a4_IF	a4_RB	a4_RF	a5_IB	a5_IF	a5_RB	a5_RF
H02_T100_h30	0.02	1.00	0.008963	0.003736	0.000125	0.000271	0.000091	0.000185	0.000047	0.000006	0.000058	0.000041	0.000041	0.000016	0.000042	0.000048	0.000005	0.000028	0.000004	0.000039
H02_T150_h30	0.02	1.50	0.007134	0.000829	0.000324	0.000723	0.000201	0.000567	0.000104	0.000104	0.000119	0.000208	0.000026	0.000088	0.000082	0.000149	0.000187	0.000168	0.000208	0.000072
H02_T200_h30	0.02	2.00	0.009184	0.002310	0.000694	0.000472	0.000398	0.000945	0.000104	0.000382	0.000072	0.000321	0.000278	0.000318	0.000279	0.000557	0.000028	0.000147	0.000054	0.000270
H04_T100_h30	0.04	1.00	0.019240	0.007400	0.000596	0.000784	0.000587	0.000542	0.000076	0.000051	0.000128	0.000052	0.000073	0.000014	0.000078	0.000038	0.000021	0.000042	0.000014	0.000022
H04_T150_h30	0.04	1.50	0.015308	0.002163	0.000765	0.002737	0.000986	0.001739	0.000349	0.000136	0.000936	0.000826	0.010111	0.000868	0.000817	0.001378	0.000059	0.000356	0.000082	0.000188
H04_T200_h30	0.04	2.00	0.015956	0.002133	0.001688	0.002392	0.002015	0.002011	0.000614	0.001554	0.000139	0.000908	0.000400	0.000254	0.000487	0.000059	0.000200	0.000869	0.000231	0.000879
H06_T100_h30	0.06	1.00	0.028223	0.010402	0.000150	0.001093	0.000078	0.001545	0.000198	0.000026	0.000176	0.000187	0.000042	0.000054	0.000043	0.000009	0.000011	0.000023	0.000022	0.000018
H06_T150_h30	0.06	1.50	0.022652	0.001785	0.002285	0.004676	0.001024	0.000863	0.000297	0.000398	0.000234	0.000793	0.000373	0.000375	0.000370	0.000355	0.000103	0.000097	0.000091	0.000047
H06_T200_h30	0.06	2.00	0.023299	0.004248	0.005513	0.007225	0.005522	0.006898	0.000280	0.002351	0.000921	0.002009	0.000941	0.011165	0.000882	0.000499	0.000242	0.000296	0.000142	0.000930
H08_T100_h30	0.08	1.00	0.037691	0.014480	0.000296	0.001066	0.000058	0.002516	0.000385	0.000220	0.000187	0.000499	0.000079	0.000111	0.000077	0.000149	0.000031	0.000045	0.000046	0.000057
H08_T150_h30	0.08	1.50	0.029598	0.004560	0.002264	0.006905	0.003837	0.005671	0.001091	0.001084	0.001132	0.001869	0.001026	0.000985	0.000860	0.000956	0.000325	0.000134	0.000251	0.000212
H08_T200_h30	0.08	2.00	0.030303	0.005309	0.012555	0.014599	0.010143	0.016028	0.000534	0.003572	0.002613	0.004079	0.000741	0.003008	0.001111	0.001208	0.000122	0.000672	0.000147	0.000432
H10_T100_h30	0.10	1.00	0.046173	0.016464	0.000676	0.004007	0.000482	0.005701	0.000996	0.000686	0.000494	0.001125	0.000229	0.000324	0.000145	0.000183	0.000031	0.000089	0.000024	0.000039
H10_T150_h30	0.10	1.50	0.037029	0.005895	0.005590	0.009321	0.003206	0.005806	0.001822	0.002347	0.001750	0.002894	0.001473	0.001989	0.001366	0.001674	0.000571	0.000332	0.000522	0.000438
H10_T200_h30	0.10	2.00	0.037925	0.006528	0.020501	0.025265	0.015697	0.026998	0.002249	0.010430	0.005091	0.009191	0.000704	0.004464	0.001340	0.001397	0.000708	0.000542	0.000208	0.001558

Tab. 11 Componenti armoniche principali e secondarie per onde regolari e barra emersa

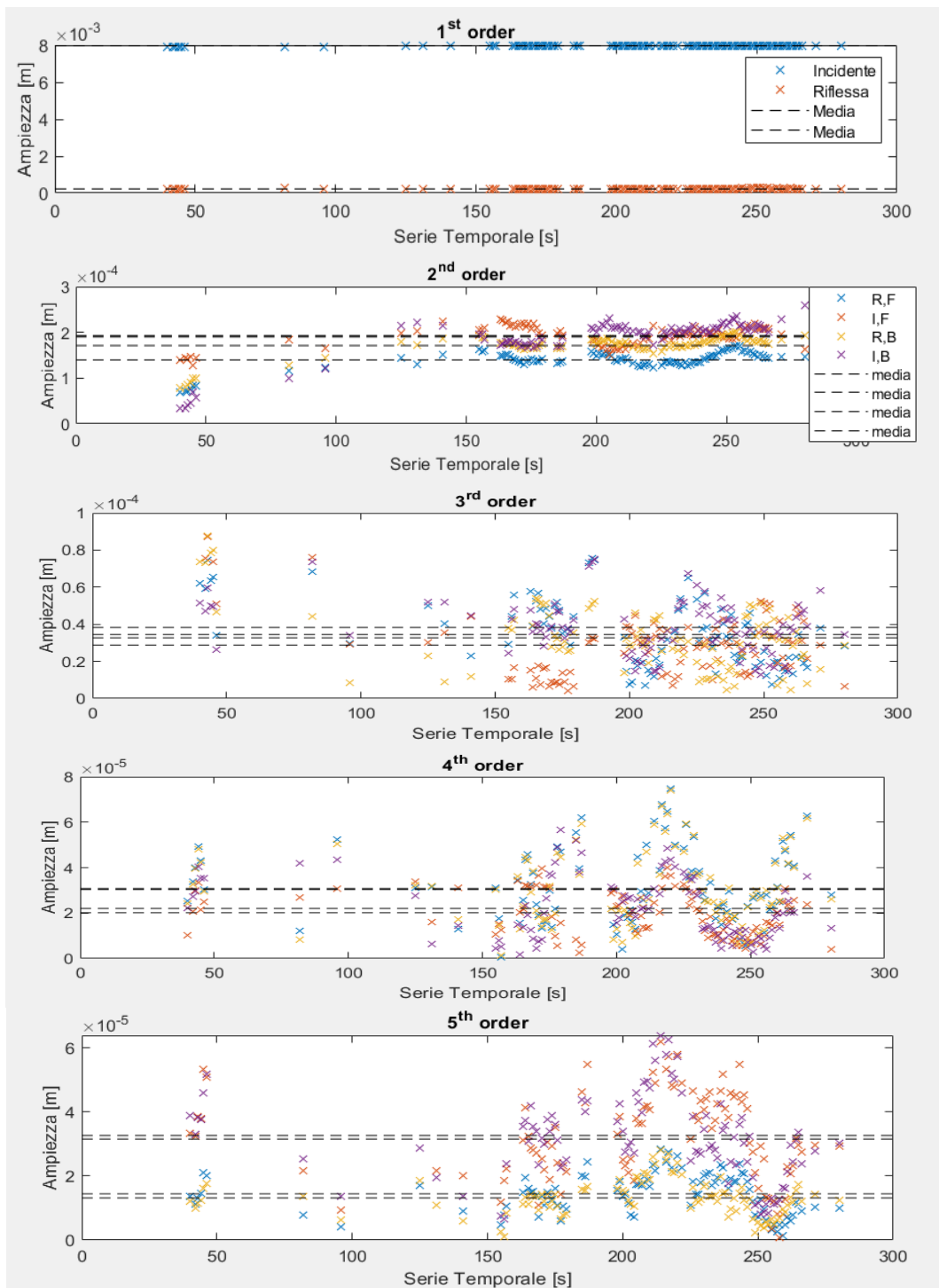


Figura 26 Andamento della componente armonica principale e di ordine superiore fino al quinto per l'onda con $H=2$ cm $T=1$ s ($h=0,51$ m)

4.3.2 Determinazione dei coefficienti di riflessione e trasmissione

Come già accennato precedentemente, il processo di riflessione delle onde per effetto dell'ostacolo ed il processo di trasmissione dell'onda incidente a tergo delle barriere sommerse vengono generalmente studiati mediante un "coefficiente di riflessione" K_R , e un "coefficiente di trasmissione" K_T . Tali coefficienti possono essere individuati in maniera generale come rapporto rispettivamente tra l'altezza d'onda riflessa e quella incidente e tra l'altezza d'onda trasmessa e quella incidente, una volta determinate tali grandezze.

Il coefficiente di riflessione è stato calcolato attraverso l'ausilio dello stesso codice di calcolo in MatLab tramite il criterio fornito da Lin e Huang, in funzione dell'ampiezza dell'onda riflessa con le sue componenti libere e legate e dell'ampiezza dell'onda incidente con le sue componenti libere e legate:

$$K_R = \{[(a_R^{(1)})^2 + \sum [(a_{R,B}^{(n)})^2 + (a_{R,F}^{(n)})^2]] / [(a_I^{(1)})^2 + \sum [(a_{I,B}^{(n)})^2 + (a_{I,F}^{(n)})^2]]\}^{1/2} \quad [4.5]$$

Il coefficiente di trasmissione è stato ricavato come il rapporto tra altezza d'onda trasmessa ed incidente ma con le altezze d'onda valutate in vario modo. Per K_{t1} le altezze d'onda incidente e riflessa, $H_{m0}(S1)$ e $H_{m0}(S15)$, sono state calcolate in funzione

dello spettro di densità di energia rispettivamente alla sonda 1 e alla sonda 15 ($H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$, dove m_0 è il momento di ordine 0 dello spettro). Per K_{t2} , le altezze d'onda incidente e riflessa, $H_{1/3}(S1)$ e $H_{1/3}(S15)$, sono state calcolate come la media di un terzo delle onde più alte registrate rispettivamente alla sonda 1 e alla sonda 15. Il coefficiente di trasmissione K_{t3} è stato invece calcolato in funzione delle aree dello spettro trasmesso m_{0t} (alla sonda 15) e dello spettro incidente m_{0i} . In questo caso m_{0i} è stato calcolato a partire dalle ampiezze delle componenti d'onda incidenti ricavate con il metodo di Lin e Huang.

$$K_{t1} = \frac{H_{m0}(S15)}{H_{m0}(S1)} ; K_{t2} = \frac{H_{1/3}(S15)}{H_{1/3}(S1)} ; K_{t3} = \sqrt{\frac{m_{0t}}{m_{0i}}} \quad [4.6]$$

con:

$$m_{0i} = \frac{1}{2} \sum a_i^2 \quad [4.7]$$

dove a_i è l'ampiezza delle componenti armoniche incidenti.

Nel seguito si riportano i valori dei coefficienti di riflessione e trasmissione ottenuti per tutte le onde analizzate, sia per la profondità di 0,51 m che per la profondità di 0,56 m. Per il caso di profondità pari a 0,30 m il solo coefficiente analizzato è quello di riflessione poiché non si ha trasmissione.

Coefficients per onde regolari $h=0,51$ m.								
Nome	H [m]	T [s]	KR [m]	m_{ot}	m_{oi}	K_{t1}	K_{t2}	K_{t3}
H2_T100	0.02	1	0.044936	0.000021	0.000032	0.797638	0.804778	0.816140
H2_T150	0.02	1.5	0.096437	0.000035	0.000041	0.943057	1.040428	0.934249
H2_T200	0.02	2	0.038990	0.000031	0.000032	0.964200	1.155169	0.983835
H2_T250	0.02	2.5	0.049952	0.000032	0.000031	0.971959	1.332436	1.009969
H3_T100	0.03	1	0.041751	0.000051	0.000076	0.807143	0.826446	0.822620
H3_T150	0.03	1.5	0.091269	0.000077	0.000092	0.916081	1.000348	0.915674
H3_T200	0.03	2	0.040547	0.000080	0.000073	1.031160	1.210465	1.042540
H3_T250	0.03	2.5	0.046688	0.000100	0.000075	1.136517	1.676485	1.157269
H4_T100	0.04	1	0.019998	0.000097	0.000133	0.844009	0.866755	0.855854
H4_T150	0.04	1.5	0.088431	0.000115	0.000164	0.834745	1.026687	0.839705
H4_T200	0.04	2	0.049382	0.000140	0.000131	1.027603	1.146518	1.033899
H4_T250	0.04	2.5	0.044156	0.000081	0.000142	0.761948	1.188050	0.755607
H5_T100	0.05	1	0.041275	0.000152	0.000200	0.862863	0.869538	0.872366
H5_T150	0.05	1.5	0.086752	0.000076	0.000255	0.541900	0.718011	0.546379
H5_T200	0.05	2	0.060574	0.000091	0.000211	0.666821	0.835806	0.656222
H5_T250	0.05	2.5	0.051992	0.000084	0.000216	0.613983	0.908945	0.624815
H6_T100	0.06	1	0.049633	0.000218	0.000273	0.863508	0.856557	0.893477
H6_T150	0.06	1.5	0.090435	0.000071	0.000363	0.436481	0.603465	0.441134
H6_T200	0.06	2	0.083301	0.000082	0.000301	0.528643	0.656444	0.523348
H6_T250	0.06	2.5	0.073785	0.000086	0.000313	0.514913	0.712283	0.523185
H8_T100	0.08	1	0.079331	0.000139	0.000489	0.517595	0.615265	0.532887
H8_T150	0.08	1.5	0.077729	0.000101	0.000632	0.393977	0.567091	0.400198
H8_T200	0.08	2	0.109509	0.000084	0.000559	0.386855	0.453943	0.387308
H8_T250	0.08	2.5	0.125556	0.000104	0.000585	0.423007	0.691866	0.421050
H10_T100	0.1	1	0.118549	0.000112	0.000796	0.371408	0.452293	0.374757
H10_T150	0.1	1.5	0.096539	0.000126	0.001018	0.349523	0.391526	0.351928
H10_T200	0.1	2	0.144679	0.000104	0.000868	0.349813	0.404684	0.346344
H10_T250	0.1	2.5	0.270437	0.000126	0.001004	0.356754	0.533118	0.353648
H12_T100	0.12	1	0.105541	0.000104	0.001110	0.301357	0.360514	0.306263
H12_T150	0.12	1.5	0.128228	0.000115	0.001472	0.273925	0.324185	0.279686
H12_T200	0.12	2	0.165007	0.000086	0.001205	0.277208	0.330588	0.267656
H12_T250	0.12	2.5	0.286596	0.000146	0.001435	0.313293	0.471599	0.319380
H15_T100	0.15	1	0.131855	0.000101	0.001753	0.251099	0.300522	0.239422
H15_T150	0.15	1.5	0.162471	0.000164	0.002219	0.262184	0.295991	0.271725
H15_T200	0.15	2	0.211900	0.000097	0.001855	0.246774	0.291916	0.229147
H15_T250	0.15	2.5	-	-	-	-	-	-

Tab. 12 Coefficienti di riflessione e trasmissione calcolati per onde regolari e barra sommersa ($h=0,51$ m)

Coefficienti per onde regolari $h=0,56$ m.								
Nome	H [m]	T [s]	KR [m]	m_{ot}	m_{oi}	K_{t1}	K_{t2}	K_{t3}
H02_T100_Rc15	0.02	1	0.037819	0.000025	0.000033	0.876026	0.864614	0.869078
H02_T150_Rc15	0.02	1.5	0.037491	0.000027	0.000036	0.854240	0.861214	0.865978
H02_T200_Rc15	0.02	2	0.187294	0.000027	0.000037	0.728831	0.877225	0.856948
H02_T250_Rc15	0.02	2.5	0.168348	0.000022	0.000028	0.770512	0.898048	0.873445
H03_T100_Rc15	0.03	1	0.036440	0.000058	0.000076	0.874271	0.882638	0.870212
H03_T150_Rc15	0.03	1.5	0.050673	0.000062	0.000077	0.853492	0.845768	0.894281
H03_T200_Rc15	0.03	2	0.173640	0.000072	0.000083	0.804702	0.791878	0.928727
H03_T250_Rc15	0.03	2.5	0.140298	0.000060	0.000066	0.853132	1.128505	0.955793
H04_T100_Rc15	0.04	1	0.038010	0.000102	0.000129	0.875689	0.893813	0.888664
H04_T150_Rc15	0.04	1.5	0.056787	0.000113	0.000139	0.856806	0.839940	0.899543
H04_T200_Rc15	0.04	2	0.167914	0.000147	0.000149	0.870627	0.862373	0.992270
H04_T250_Rc15	0.04	2.5	0.131481	0.000132	0.000121	0.936886	1.318850	1.045964
H05_T100_Rc15	0.05	1	0.031020	0.000162	0.000203	0.888662	0.915321	0.892724
H05_T150_Rc15	0.05	1.5	0.062460	0.000177	0.000230	0.855041	0.839304	0.878127
H05_T200_Rc15	0.05	2	0.166089	0.000245	0.000232	0.916373	0.875710	1.028277
H05_T250_Rc15	0.05	2.5	0.129111	0.000238	0.000194	0.999937	1.470759	1.106876
H06_T100_Rc15	0.06	1	0.068032	0.000235	0.000289	0.890366	0.926542	0.902488
H06_T150_Rc15	0.06	1.5	0.066020	0.000257	0.000315	0.857083	0.867442	0.904557
H06_T200_Rc15	0.06	2	0.169124	0.000366	0.000337	0.944803	0.880852	1.041627
H06_T250_Rc15	0.06	2.5	0.124947	0.000352	0.000285	1.008014	1.604621	1.111845
H08_T100_Rc15	0.08	1	0.056124	0.000435	0.000500	0.921235	0.919397	0.932222
H08_T150_Rc15	0.08	1.5	0.074062	0.000493	0.000569	0.884474	1.137256	0.930797
H08_T200_Rc15	0.08	2	0.162402	0.000195	0.000586	0.525571	0.627369	0.576778
H08_T250_Rc15	0.08	2.5	0.140249	0.000203	0.000520	0.568805	0.870954	0.624464
H10_T100_Rc15	0.10	1	0.081068	0.000617	0.000761	0.879257	0.962624	0.900933
H10_T150_Rc15	0.10	1.5	0.076738	0.000281	0.000894	0.538970	0.640735	0.561026
H10_T200_Rc15	0.10	2	0.207463	0.000204	0.000967	0.432346	0.511494	0.459753
H10_T250_Rc15	0.10	2.5	0.155877	0.000228	0.000840	0.484207	0.743000	0.521348
H12_T100_Rc15	0.12	1	0.144705	0.000384	0.001109	0.576360	0.612708	0.588387
H12_T150_Rc15	0.12	1.5	0.097687	0.000348	0.001285	0.499757	0.551078	0.520690
H12_T200_Rc15	0.12	2	0.205084	0.000235	0.001375	0.394687	0.481794	0.413744
H12_T250_Rc15	0.12	2.5	0.174594	0.000264	0.001217	0.433492	0.679196	0.466022
H15_T100_Rc15	0.15	1	0.149089	0.000309	0.001707	0.430341	0.461930	0.425554
H15_T150_Rc15	0.15	1.5	0.135943	0.000369	0.001989	0.410141	0.512035	0.430755
H15_T200_Rc15	0.15	2	0.204976	0.000262	0.002140	0.344351	0.422659	0.350073
H15_T250_Rc15	0.15	2.5	0.200599	0.000293	0.001872	0.363449	0.580983	0.395330

Tab. 13 Coefficienti di riflessione e trasmissione calcolati per onde regolari e barra sommersa ($h=0,56$ m)

Coefficienti per onde regolari $h=0,30$ m.			
Nome	H [m]	T [s]	KR
H02_T100_h30	0.02	1.00	0.417367
H02_T150_h30	0.02	1.50	0.151517
H02_T200_h30	0.02	2.00	0.285477
H04_T100_h30	0.04	1.00	0.386428
H04_T150_h30	0.04	1.50	0.229175
H04_T200_h30	0.04	2.00	0.233573
H06_T100_h30	0.06	1.00	0.372452
H06_T150_h30	0.06	1.50	0.104787
H06_T200_h30	0.06	2.00	0.403067
H08_T100_h30	0.08	1.00	0.390013
H08_T150_h30	0.08	1.50	0.281970
H08_T200_h30	0.08	2.00	0.558035
H10_T100_h30	0.10	1.00	0.376864
H10_T150_h30	0.10	1.50	0.251671
H10_T200_h30	0.10	2.00	0.656550

Tab. 14 Coefficienti di riflessione calcolati per onde regolari e barra emersa ($h=0,30$ m)

4.4 Determinazione delle altezze d'onda incidente, riflessa e trasmessa per le onde irregolari

Per le onde irregolari, la separazione delle componenti incidente, riflessa e trasmessa è stata effettuata utilizzando l'approccio a due sonde proposto da Goda e Suzuki 1976. I risultati sono stati elaborati attraverso lo sviluppo di un codice di calcolo con l'ausilio del software MatLab. Tale metodo può essere applicato quando lo spazio tra le due sonde considerate non risulta un multiplo intero di una semi lunghezza d'onda.

Le frequenze variano all'interno di un range che va da $f_{min} = \Delta l / L_{max}$ a $f_{max} = \Delta l / L_{min}$ dove Δl è la distanza tra le due sonde prese in considerazione.

Le energie incidenti e riflesse si determinano come:

$$E_I = \int_{f_{min}}^{f_{max}} S_I(f) df = (\sum_{f_{min}}^{f_{max}} I_I) \frac{\Delta t}{2t_0} = \sum_{f_{min}}^{f_{max}} N a_I^2 \frac{\Delta t}{2N\Delta t} = \frac{1}{2} \sum_{f_{min}}^{f_{max}} a_{I fi}^2 [4.8]$$

$$E_R = \int_{f_{min}}^{f_{max}} S_R(f) df = (\sum_{f_{min}}^{f_{max}} I_R) \frac{\Delta t}{2t_0} = \sum_{f_{min}}^{f_{max}} N a_R^2 \frac{\Delta t}{2N\Delta t} = \frac{1}{2} \sum_{f_{min}}^{f_{max}} a_{R fi}^2 [4.9]$$

L'altezza d'onda incidente e riflessa:

$$H_i = \frac{1}{\sqrt{1+K_R^2}} H_s \quad [4.10]$$

$$H_r = \frac{K_R}{\sqrt{1+K_R}} H_s \quad [4.11]$$

Con H_s che corrisponde all'altezza d'onda rappresentativa tra le due sonde di misura considerate (sonda 3 e 4) (media) che è possibile ricavare come:

$$H_s = ((\eta_s)_{rms}/(\eta_1)_{rms}) H_I \quad [4.12]$$

$$\eta_{rms} = \int_0^{\infty} (1 + 2K_R \cos 2Kx_1 + K_R^2) S_I(f) df \quad [4.13]$$

x_1 = distanza tra la sonda 4 e la barra

Le altezze d'onda incidente e trasmessa sono state valutate anche come H_{m0} e come $H_{1/3}$, in corrispondenza della sonda 1 per l'onda incidente e della sonda 15 per l'onda trasmessa. In seguito, sono riportati i valori ottenuti in forma tabulare.

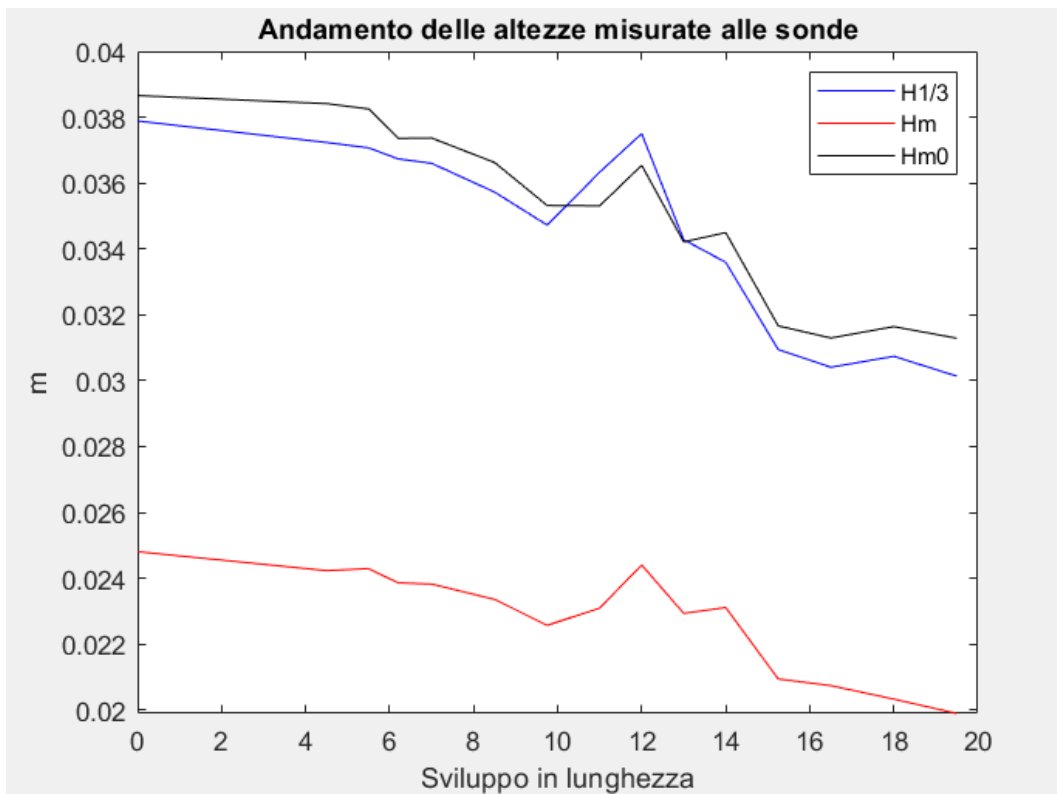


Figura 27 Andamento delle altezze misurate alle varie sonde (per un'onda irregolare con $H_s=5$ cm $T_p=1$ s)

Altezze per onde irregolari h=0,51 m.									
H_s [m]	T_p [s]	H_{1/3(S15)} [m]	H_{1/3(S1)} [m]	H_{m0(S15)} [m]	H_{m0(S1)} [m]	f_{min} [Hz]	f_{max} [Hz]	H_i [m]	H_r [m]
0.05	1.00	0.030136	0.037884	0.020539	0.038656	0.160000	0.990000	0.019958	0.002705
0.08	1.00	0.037928	0.060150	0.025596	0.060440	0.160000	0.990000	0.032367	0.004321
0.12	1.00	0.041040	0.086020	0.027856	0.085400	0.160000	0.990000	0.050536	0.005783
0.04	1.50	0.027212	0.029365	0.019586	0.030246	0.160000	0.990000	0.024756	0.002291
0.06	1.50	0.034698	0.044356	0.023223	0.045483	0.160000	0.990000	0.037271	0.003292
0.10	1.50	0.041511	0.075004	0.025185	0.076581	0.160000	0.990000	0.063126	0.006037
0.03	2.00	0.025006	0.023242	0.016779	0.023774	0.160000	0.990000	0.020363	0.002235
0.05	2.00	0.034946	0.039070	0.021897	0.039958	0.160000	0.990000	0.034308	0.002943
0.08	2.00	0.042165	0.063682	0.023416	0.064734	0.160000	0.990000	0.055342	0.004844
0.03	2.50	0.028144	0.023011	0.015261	0.022910	0.160000	0.990000	0.019963	0.002519
0.05	2.50	0.039897	0.038963	0.020009	0.038705	0.160000	0.990000	0.033902	0.003811
0.08	2.50	0.046800	0.064298	0.023073	0.063104	0.160000	0.990000	0.055281	0.005738

Tab. 15 Definizione delle altezze misurate e calcolate per onde irregolari e barra sommersa (h=0,51 m)

Altezze per onde irregolari h=0,56 m.									
H_s [m]	T_p [s]	H_{1/3(S15)} [m]	H_{1/3(S1)} [m]	H_{m0(S15)} [m]	H_{m0(S1)} [m]	f_{min} [Hz]	f_{max} [Hz]	H_i [m]	H [m]_r
0.05	1.00	0.032433	0.038669	0.021888	0.024333	0.170000	1.000000	0.021215	0.002626
0.08	1.00	0.048080	0.060650	0.034842	0.039123	0.170000	1.000000	0.034495	0.004759
0.12	1.00	0.057799	0.086546	0.045447	0.059459	0.170000	1.000000	0.052758	0.006295
0.04	1.50	0.026441	0.030135	0.023892	0.029250	0.170000	1.000000	0.025492	0.002355
0.06	1.50	0.039833	0.045448	0.034569	0.044167	0.170000	1.000000	0.038323	0.003548
0.10	1.50	0.056103	0.075922	0.045050	0.073747	0.170000	1.000000	0.064526	0.005524
0.03	2.00	0.021578	0.023973	0.018483	0.023866	0.170000	1.000000	0.020903	0.002841
0.05	2.00	0.038272	0.040181	0.031287	0.040160	0.170000	1.000000	0.035260	0.004283
0.08	2.00	0.053144	0.064894	0.042276	0.064643	0.170000	1.000000	0.057256	0.006624
0.03	2.50	0.023081	0.023707	0.018446	0.023491	0.170000	1.000000	0.020565	0.003391
0.05	2.50	0.043076	0.040220	0.030431	0.039798	0.170000	1.000000	0.034965	0.005388
0.08	2.50	0.057691	0.065325	0.039514	0.064352	0.170000	1.000000	0.056957	0.007626

Tab. 16 Definizione delle altezze misurate e calcolate per onde irregolari e barra sommersa (h=0,56 m)

4.4.2 Determinazione dei coefficienti di riflessione e trasmissione

Anche in questo caso il processo di riflessione e trasmissione dell'onda può essere studiato mediante un "coefficiente di riflessione" K_R e un "coefficiente di trasmissione" K_T . Tali coefficienti possono essere individuati in maniera generale come rapporto, rispettivamente, tra l'altezza d'onda riflessa e quella incidente e tra l'altezza d'onda trasmessa e quella incidente, una volta determinate tali grandezze.

Il coefficiente di riflessione è stato determinato con metodo di Goda e Suzuki:

$$K_R = \sqrt{(E_r/E_i)} \quad [4.14]$$

Mentre per quanto riguarda il coefficiente di trasmissione, anche in questo caso si sono affrontati diversi modi in particolare:

$$K_{t1} = \frac{H_{1/3}(S_{15})}{H_{1/3}(S_1)} ; K_{t2} = \frac{H_{m0}(S_{15})}{H_{m0}(S_1)} ; K_{t3} = \frac{H_{m0}(S_{15})}{H_i} \quad [4.15]$$

Di seguito si riportano i valori tabulati relativi ai coefficienti determinati per onde irregolari con profondità alla pala di 0,51 m e 0,56 m.

Coefficients per onde irregolari h=0,51 m.					
H [m]	T [s]	K _r	K _{t1}	K _{t2}	K _{t3}
0.05	1.00	0.136120	0.795474	0.531337	-
0.08	1.00	0.134160	0.63056	0.423486	-
0.12	1.00	0.115140	0.477101	0.326185	-
0.04	1.50	0.093616	0.926691	0.647553	0.791163
0.06	1.50	0.089742	0.782262	0.510576	0.623078
0.10	1.50	0.097524	0.553443	0.328867	0.398962
0.03	2.00	0.111230	1.075888	0.705788	0.824004
0.05	2.00	0.087097	0.89445	0.547998	0.638248
0.08	2.00	0.089611	0.662112	0.361725	0.423111
0.03	2.50	0.126680	1.223068	0.666125	0.764449
0.05	2.50	0.112890	1.023952	0.516975	0.590212
0.08	2.50	0.104540	0.727855	0.365644	0.417385

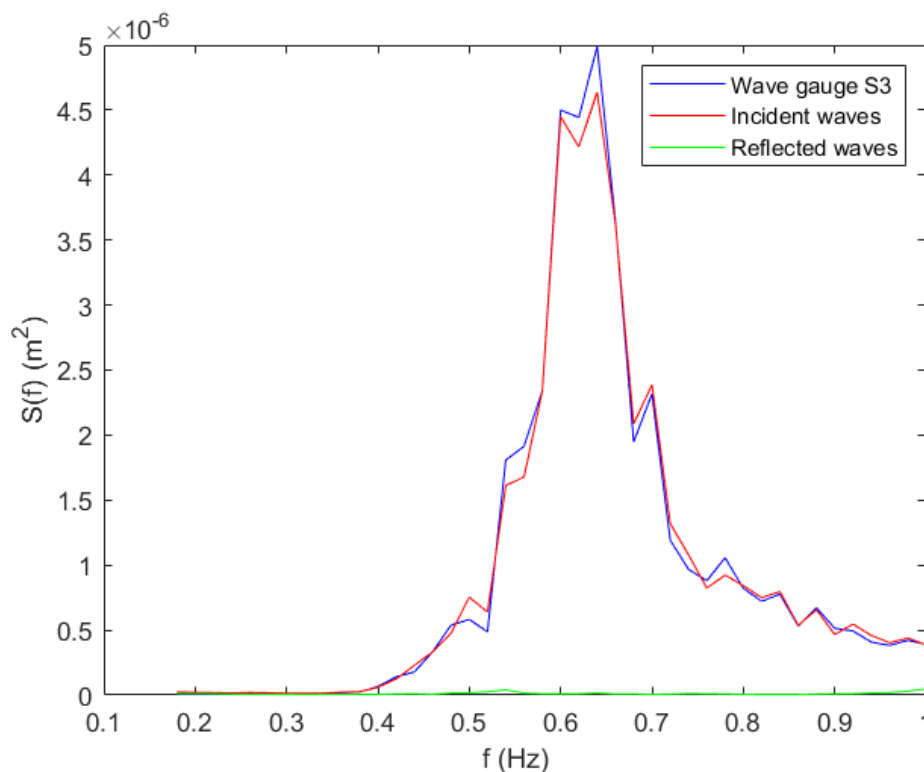
Tab. 17 Definizione dei coefficienti di riflessione e trasmissione per onde irregolari e barra sommersa (h=0,51 m)

Coefficients per onde irregolari h=0,56 m.					
H _s [m]	T _p [s]	K _r	K _{t1}	K _{t2}	K _{t3}
0.05	1.00	0.124750	0.838751	0.899512	-
0.08	1.00	0.139790	0.792738	0.890565	-
0.12	1.00	0.123430	0.667839	0.764333	-
0.04	1.50	0.093195	0.877427	0.816841	0.937247
0.06	1.50	0.094011	0.876445	0.782675	0.902034
0.10	1.50	0.087165	0.738956	0.610869	0.698167
0.03	2.00	0.136400	0.900094	0.774455	0.884219
0.05	2.00	0.122580	0.952492	0.779046	0.887319
0.08	2.00	0.117660	0.818931	0.653992	0.738368
0.03	2.50	0.165500	0.973592	0.785234	0.896962
0.05	2.50	0.154970	1.071014	0.764635	0.870322
0.08	2.50	0.134780	0.883131	0.614022	0.693746

Tab. 18 Definizione dei coefficienti di riflessione e trasmissione per onde irregolari e barra sommersa (h=0,56 m)

4.5 Confronto tra lo spettro incidente e lo spettro riflesso nelle onde irregolari

Nelle seguenti figure si può osservare il confronto tra lo spettro dell'onda incidente e quello dell'onda riflessa per le varie tipologie di onde irregolari che sono state testate. Il metodo utilizzato per ricostruire gli spettri incidente e trasmesso è quello di Goda e Suzuki. Per il periodo pari ad 1 s il metodo non può essere applicato poiché il range di frequenze all'interno del quale può essere ricostruito lo spettro va da $f_{min}=0,16$ a $f_{max}=0,99$ ma per $T_p=1$ s gran parte dell'energia spettrale ricade oltre il valore di f_{max} .



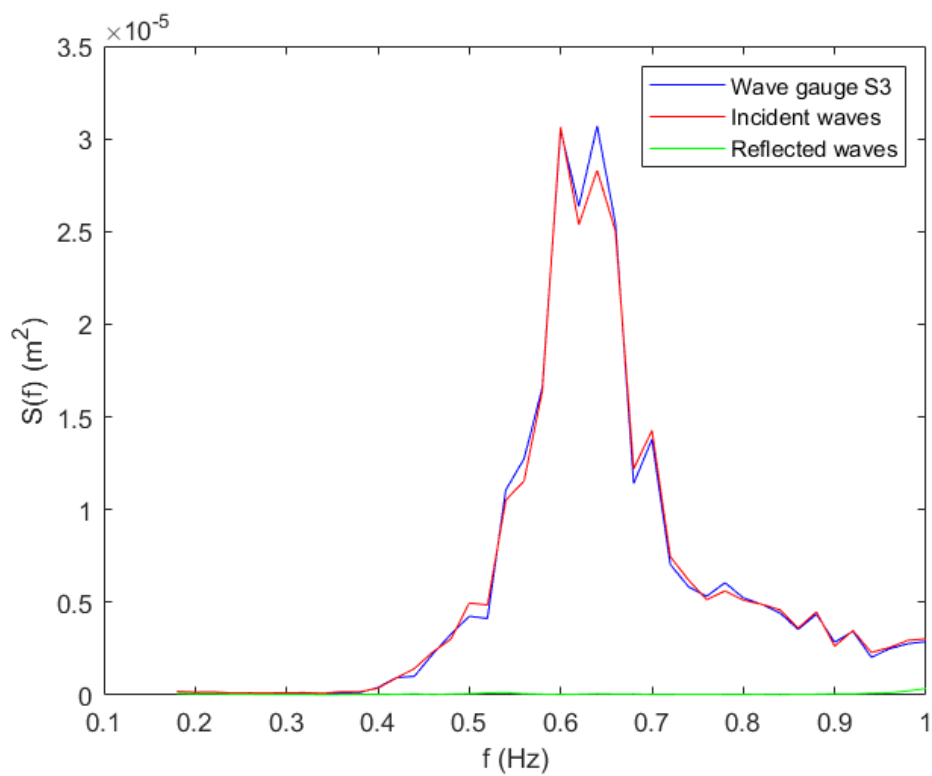
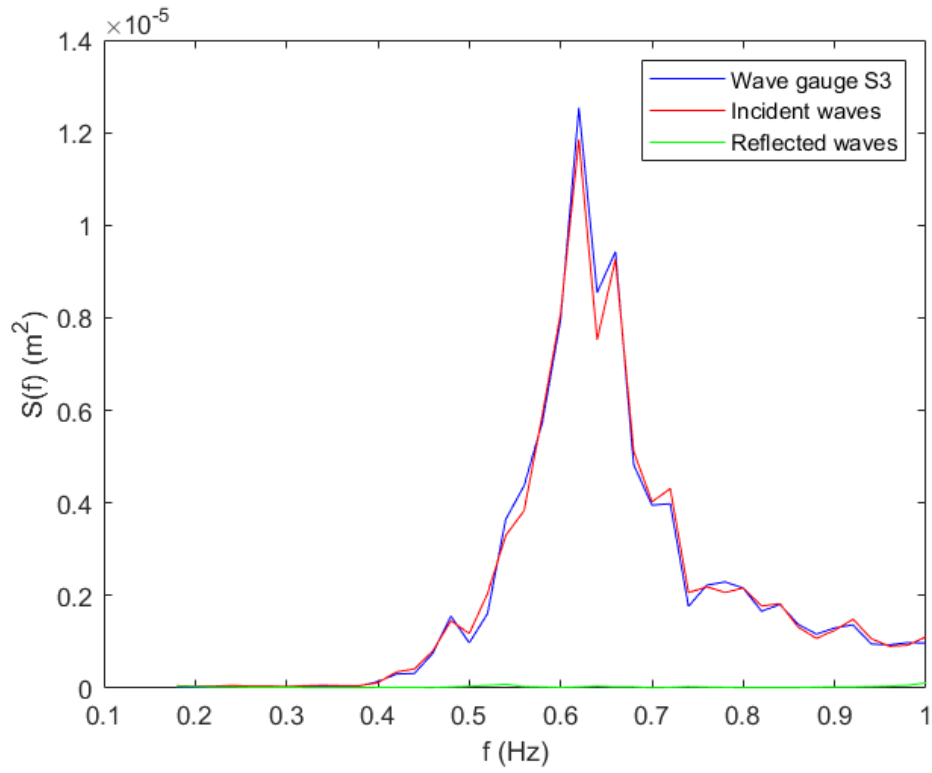
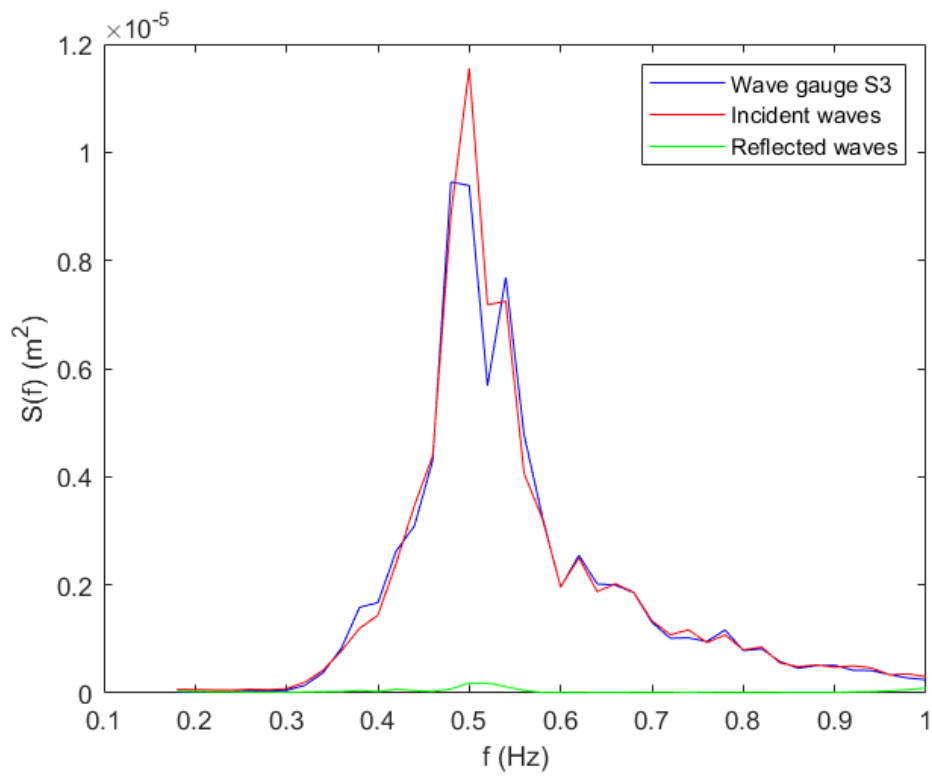
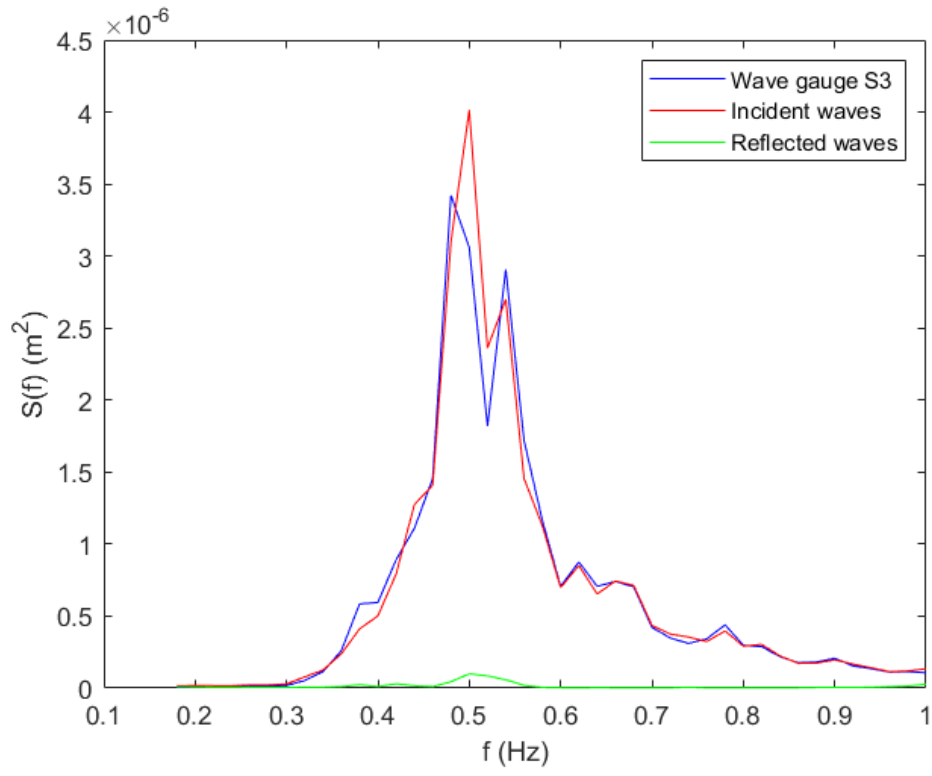


Figura 28 Confronto per $T_p=1,5$ s e $H_s=4$ cm, $H_s=6$ cm, $H_s=10$

cm



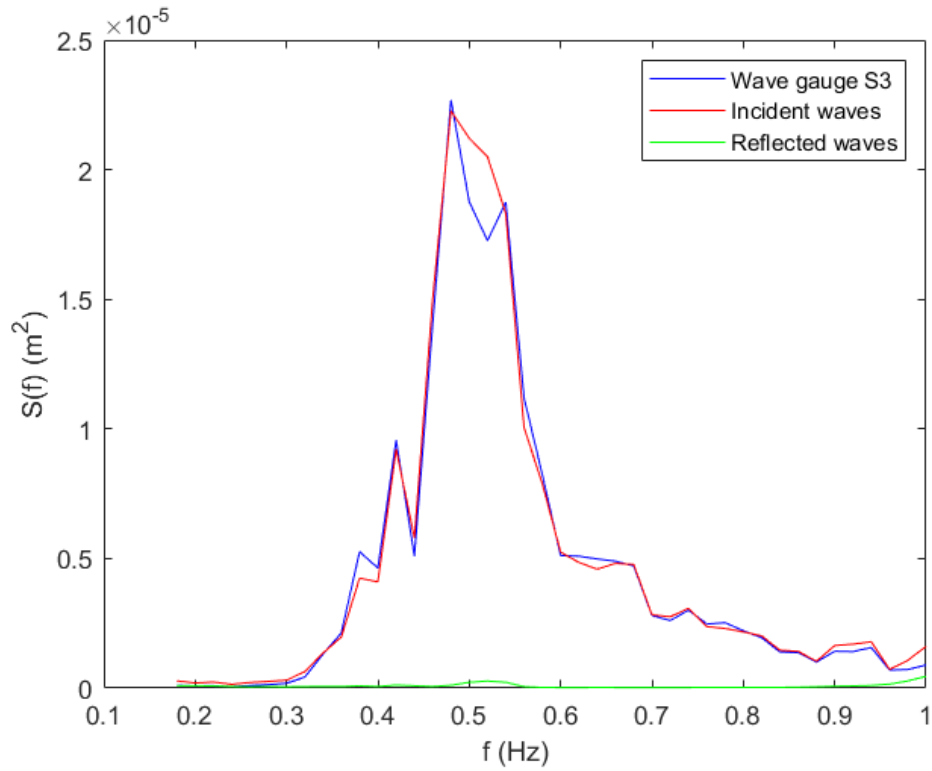
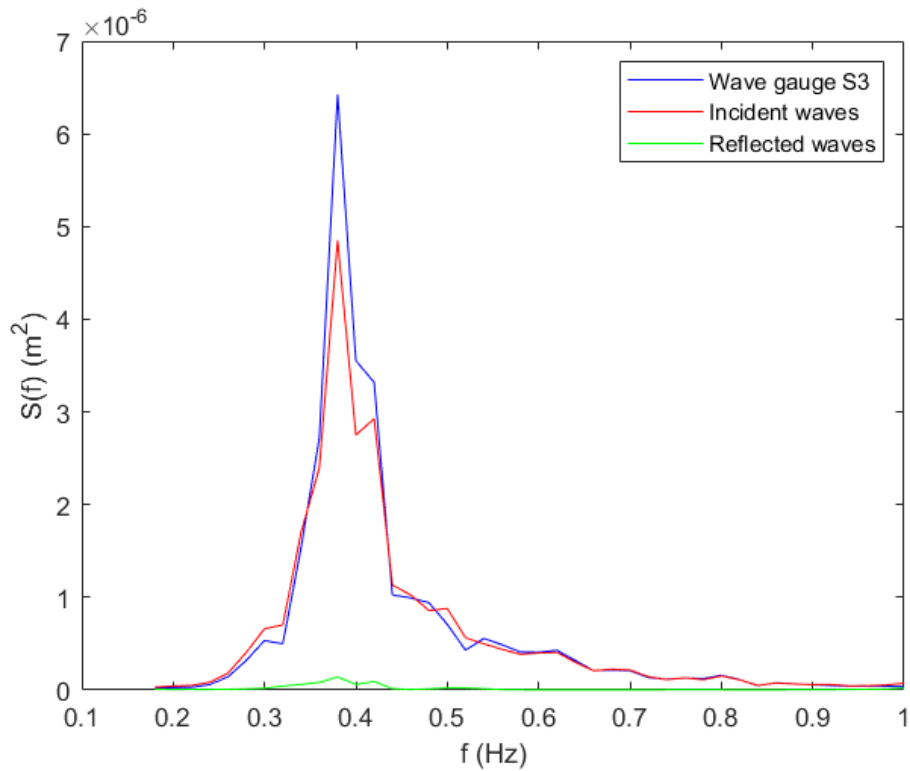


Figura 29 Confronto per $T_p=2$ s e $H_s=3$ cm, $H_s=5$ cm, $H_s=8$ cm



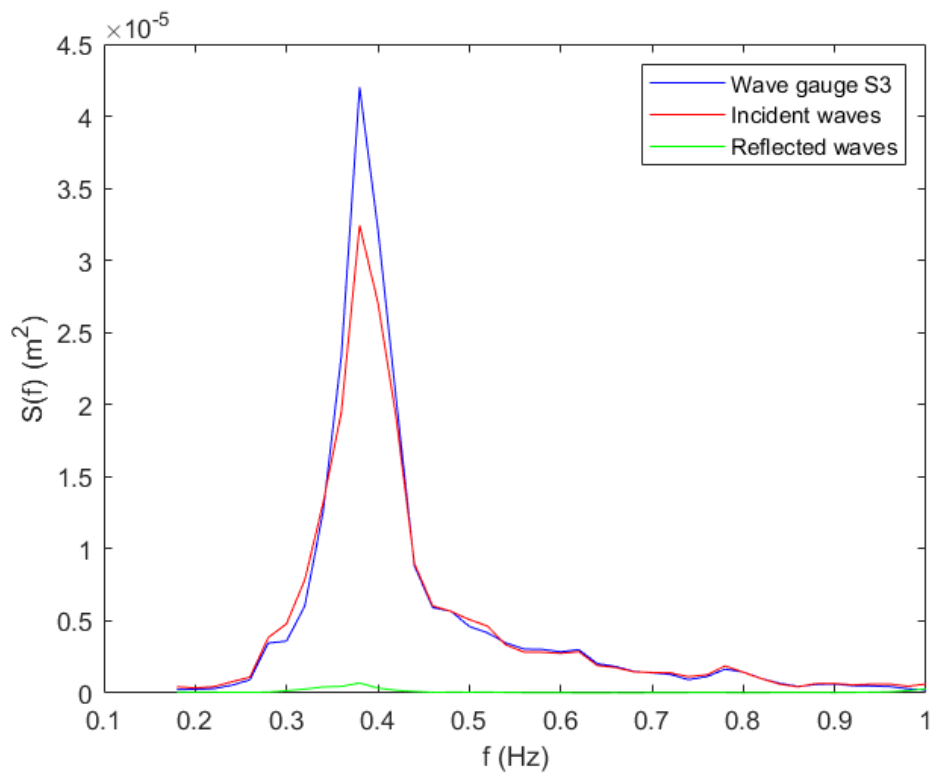
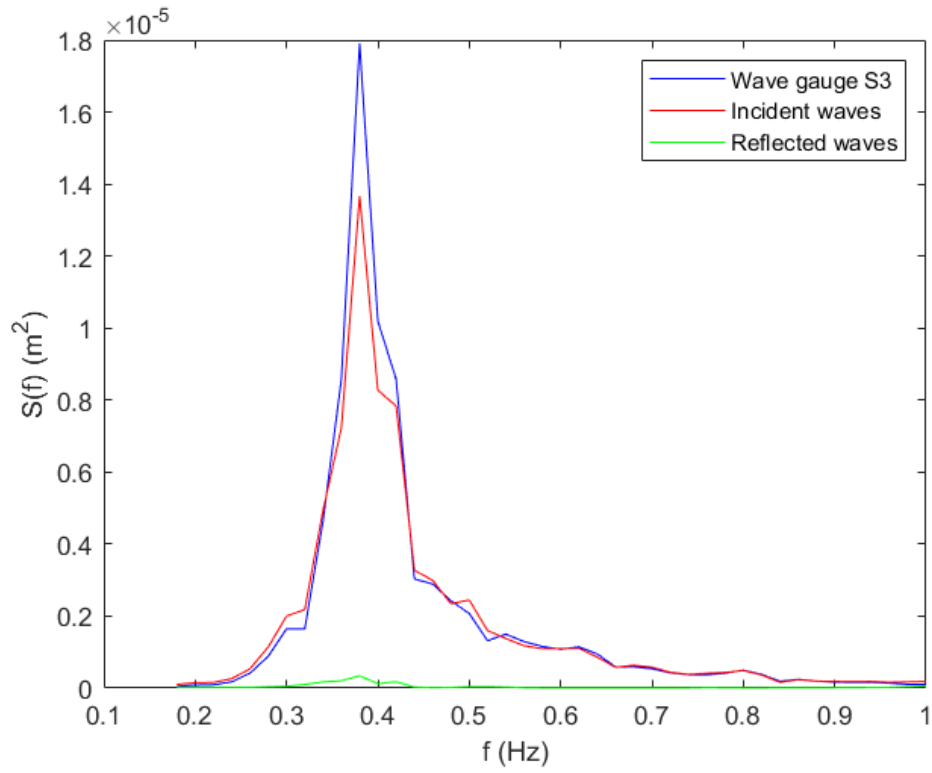


Figura 30 Confronto per $T_p=2,5$ s e $H_s=3$ cm, $H_s=5$ cm $H_s=8$ cm

4.6 Evoluzione delle forme spettrali al variare delle caratteristiche delle onde

In questo paragrafo è stata studiata l'evoluzione dello spettro di densità di energia delle onde irregolari durante il passaggio al di sopra di un ostacolo, in questo caso rappresentato dalla barra sommersa. In seguito, sono riportati gli spettri misurati all'ultima sonda di registrazione, ovvero la numero 15, per le diverse onde irregolari testate. Vengono quindi confrontati gli spettri normalizzati alla sonda 15 sia al variare dell'altezza incidente mantenendo costante il periodo di picco, sia al variare del periodo ma per lo stesso valore di $\varepsilon = \frac{a}{h}$ al di sopra della barra sommersa. Questo secondo confronto, come si mostra in seguito, è particolarmente significativo e seppur le onde confrontate non hanno la stessa altezza significativa, hanno lo stesso valore del parametro $\varepsilon = \frac{a}{h}$ dove a rappresenta l'ampiezza d'onda sulla cresta della struttura valutata secondo la teoria lineare, moltiplicando l'altezza significativa dello spettro per il coefficiente di shoaling al di sopra della barra; h risulta invece la profondità sempre al di sopra della cresta della struttura. Tale parametro risulta in qualche modo funzione del fenomeno di frangimento per cui, come detto è possibile relazionare altezze diverse che assumono però lo stesso comportamento.

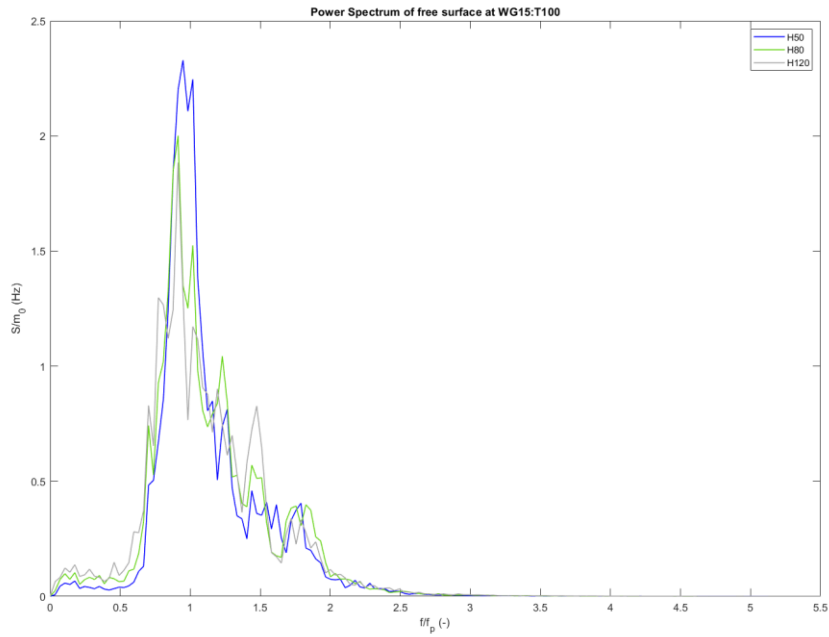


Figura 31 Spettri di densità di energia normalizzati alla sonda 15 per $T_p=1$ s, $H_s=5$ cm, $H_s=8$ cm, $H_s=12$ cm e $h=0,51$ m.

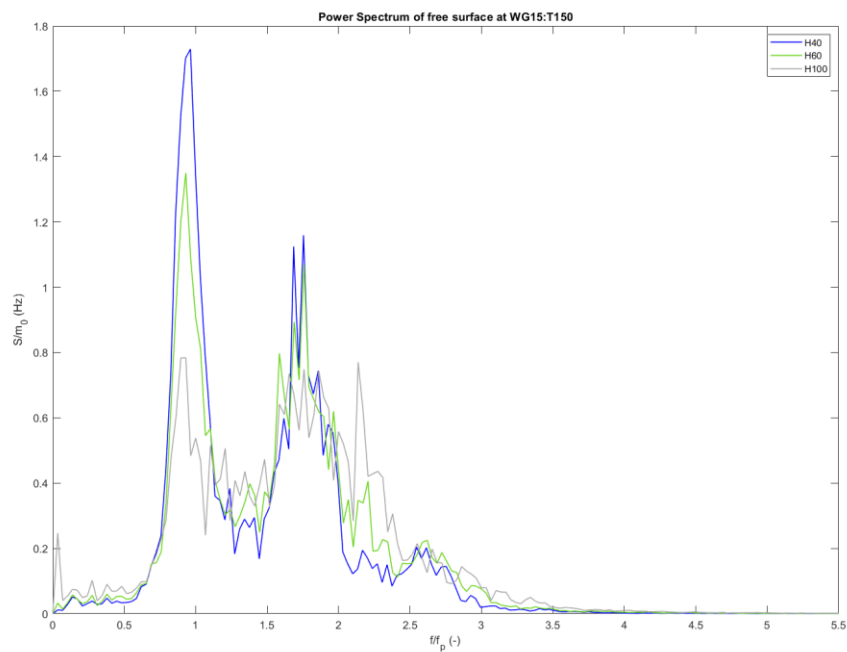


Figura 32 Spettri di densità di energia normalizzati alla sonda 15 per $T_p=1,5$ s, $H_s=4$ cm; $H_s=6$ cm; $H_s=10$ cm e $h=0,51$ m.

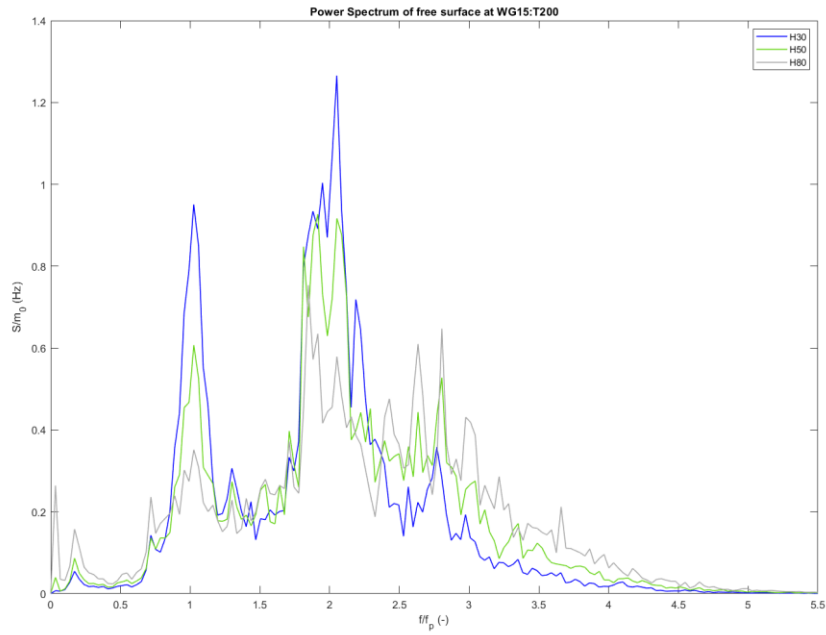


Figura 33 Spettri di densità di energia normalizzati alla sonda 15 per $T_p = 2$ s, $H_s = 3$ cm; $H_s = 5$ cm; $H_s = 8$ cm e $h = 0,51$ m.

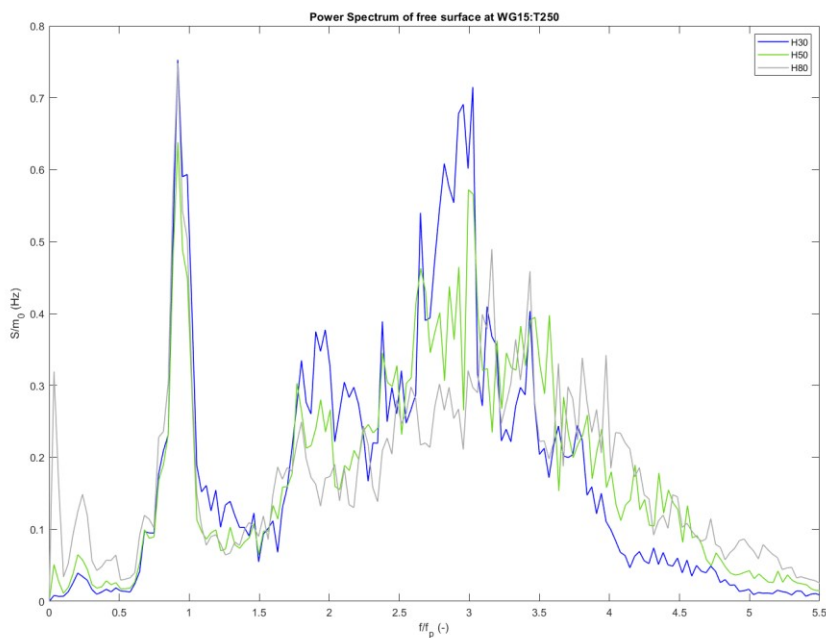


Figura 34 Spettri di densità di energia normalizzati alla sonda 15 per $T_p = 2,5$ s, $H_s = 3$ cm, $H_s = 5$ cm, $H_s = 8$ cm e $h = 0,51$ m.

Per la profondità alla generazione di 0,51 m si nota che:

-Per il periodo pari ad 1,0 s (Figura 31), passando dall'altezza d'onda più bassa a quella più elevata, lo spettro non subisce particolari variazioni di forma;

-Per il periodo di 1,5 s (Figura 32), allo stesso modo non si evidenziano particolari differenze nella forma spettrale al variare dell'altezza significativa.

-Passando al periodo di riferimento pari a 2,0 s (Figura 33), tale effetto risulta più marcato, costituendo di fatto un picco di energia a f/f_p pari a 2, la componente principale diventa secondaria;

-Per quanto invece riguarda il periodo di riferimento più alto, ovvero di 2,5 s (Figura 34), tale per cui le onde al di sopra dell'ostacolo viaggiano in condizioni di acque basse ($h/L \approx 0,02$), si osserva il generarsi di un ulteriore picco, per cui si denotano 3 picchi di energia a f/f_p pari a 1,0 Hz, 1,2 Hz e 3,0 Hz, quest'ultimo ospita l'aliquota di energia maggiore.

Le Figure 31, 32, 33 e 34 fanno riferimento alla profondità alla generazione di 0,51 m; si mostrano ora gli stessi confronti relativamente al secondo livello analizzato ovvero di 0,56 m.

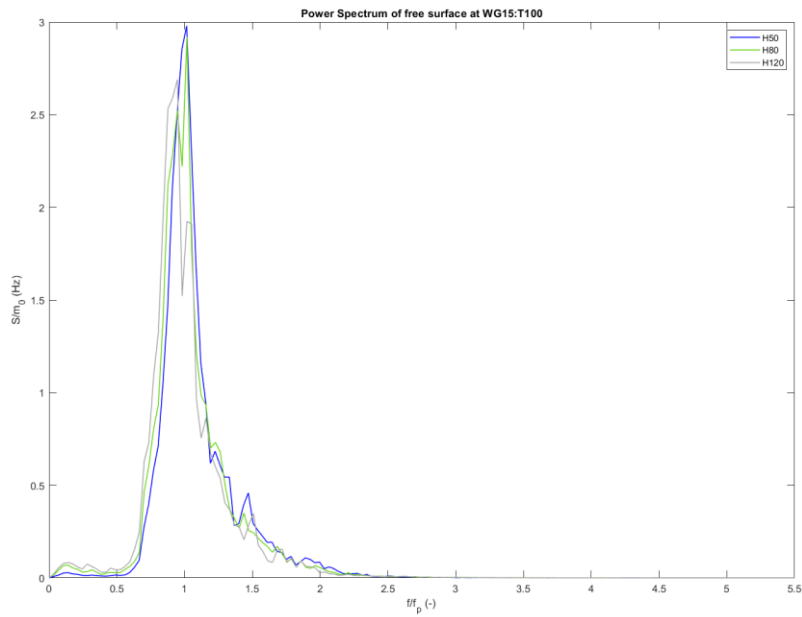


Figura 35 Spettri di densità di energia normalizzati alla sonda 15 per $T_p=1$ s, $H_s=5$ cm, $H_s=8$ cm, $H_s=12$ cm e $h=0,56$ m.

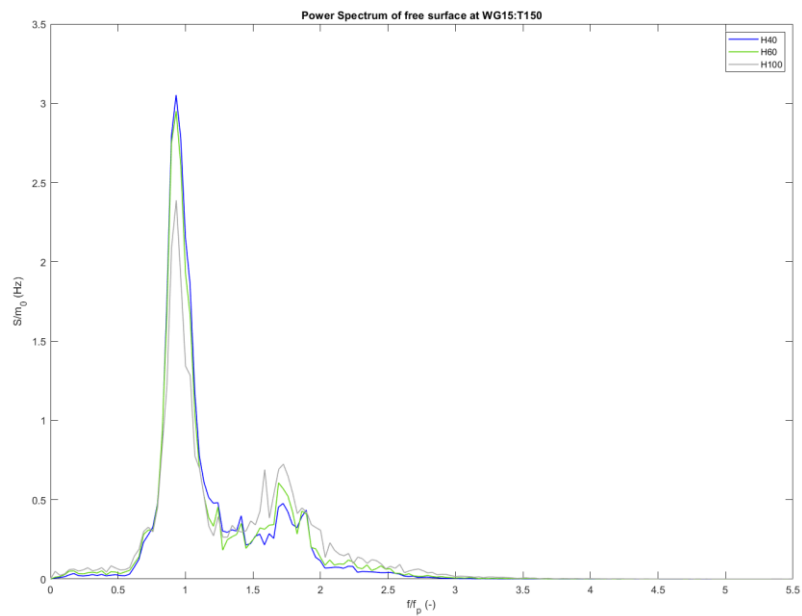


Figura 36 Spettri di densità di energia normalizzati alla sonda 15 per $T_p=1,5$ s, $H_s=4$ cm, $H_s=6$ cm, $H_s=10$ cm e $h=0,56$ m.

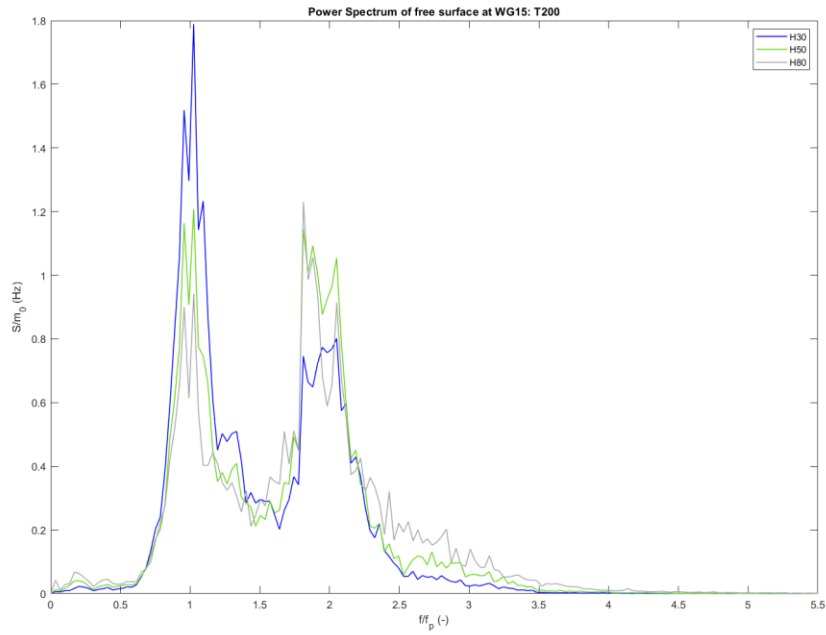


Figura 37 Spettri di densità di energia normalizzati alla sonda 15 per $T_p=2$ s, $H_s=3$ cm, $H_s=5$ cm, $H_s=8$ cm e $h=0,56$ m.

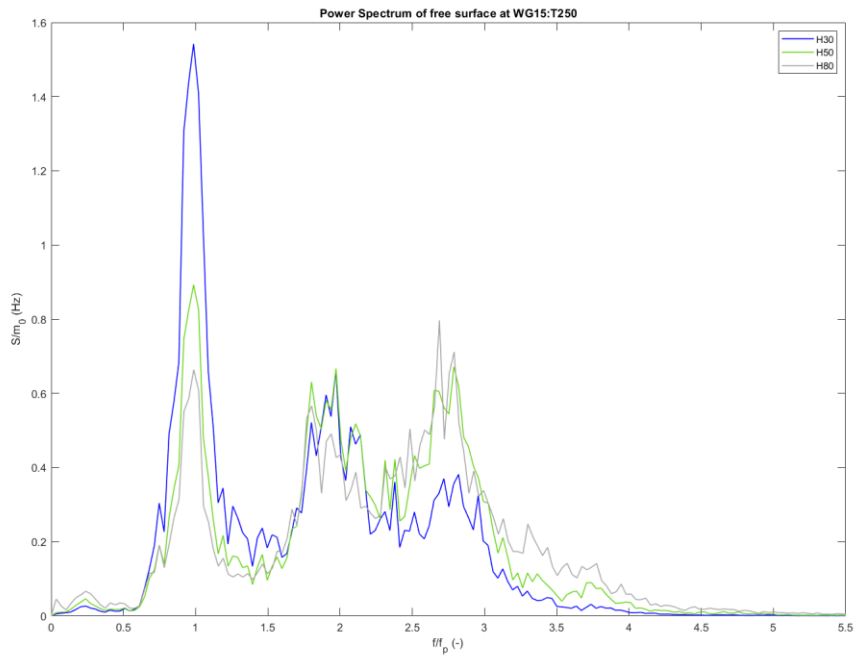


Figura 38 Spettri di densità di energia normalizzati alla sonda 15 per $T_p=2,5$ s, $H_s=3$ cm, $H_s=5$ cm, $H_s=8$ cm e $h=0,56$ m.

Per $h=0,56$ m, il comportamento è simile al caso precedente con $h=0,51$ m: a parità di periodo di picco e al variare delle altezze significative, le forme spettrali sono molto simili tra loro. L'aumento del livello, tende a ridurre l'effetto prodotto dalle interazioni non lineari che dunque risultano meno intense.

Un confronto più significativo è quello fatto variando il periodo di picco a parità del parametro $\varepsilon = \frac{a}{h}$ calcolato dove la profondità è minore (sopra la parte orizzontale della barra sommersa). Per il caso con $h=0,51$ m, il valore di ε per le onde irregolari non frangenti analizzate è pari a circa 0,22, 0,35 per le onde con frangimento di tipo spilling e pari a 0,56 per onde frangenti di tipo plunging. Per la profondità $h=0,56$ m, il parametro ε risulta pari a 0,14 per le onde non frangenti, 0,22 per le onde frangenti di tipo spilling e 0,35 per le onde di tipo plunging.

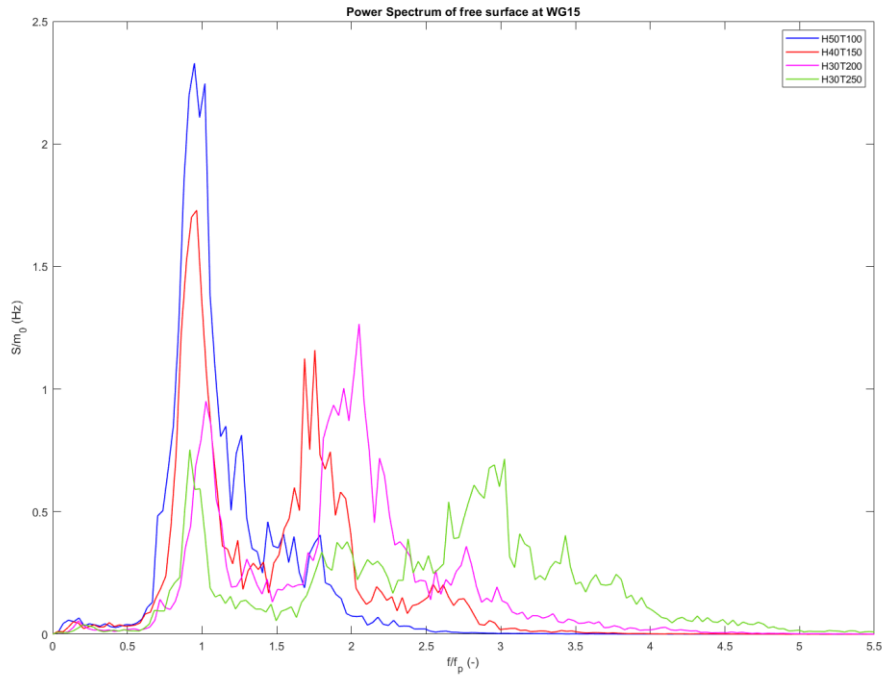


Figura 39 Spettri di densità di energia normalizzati alla sonda 15 per $\epsilon=0,22$, $T_p=1$ s, $T_p=1,5$ s; $T_p=2$ s; $T_p=2,5$ s e $h=0,51$ m.

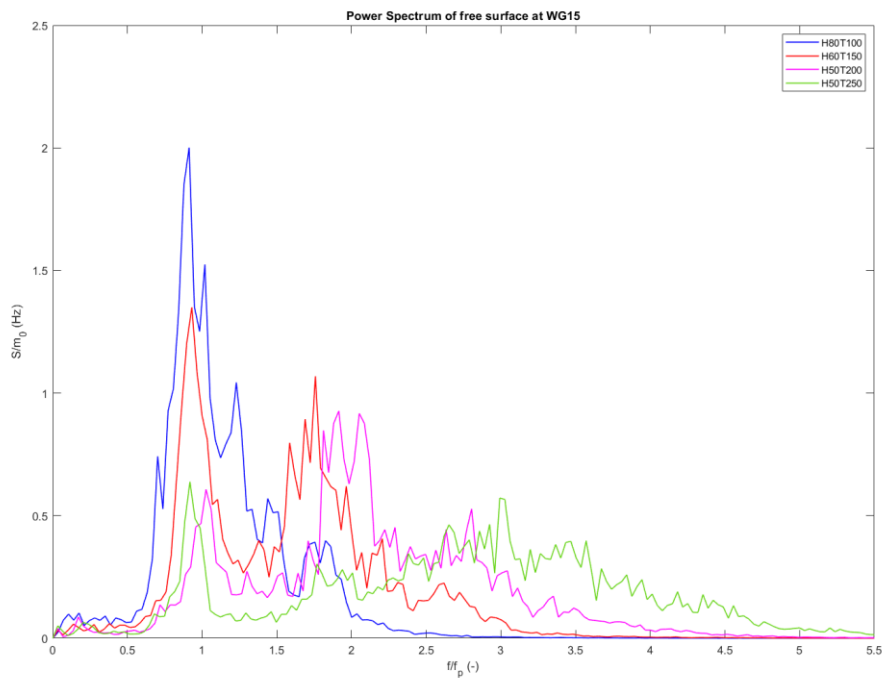


Figura 40 Spettri di densità di energia normalizzati alla sonda 15 per $\epsilon=0,35$, $T_p=1$ s, $T_p=1,5$ s, $T_p=2$ s, $T_p=2,5$ s e $h=0,51$ m.

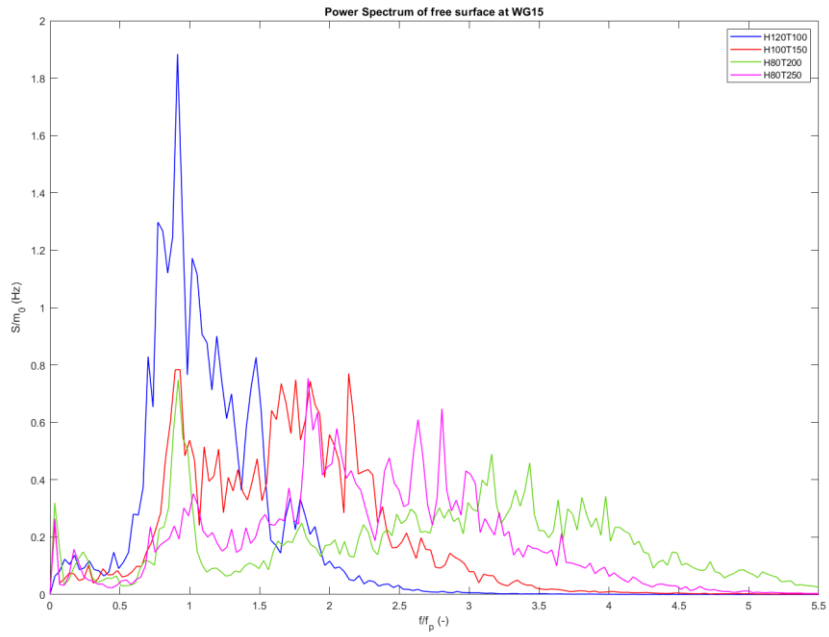


Figura 41 Spettri di densità di energia normalizzati alla sonda 15 per $\epsilon=0,56$, T_1 s; $T_1,5$ s; T_2 s; $T_2,5$ s $h=0,51$ m.

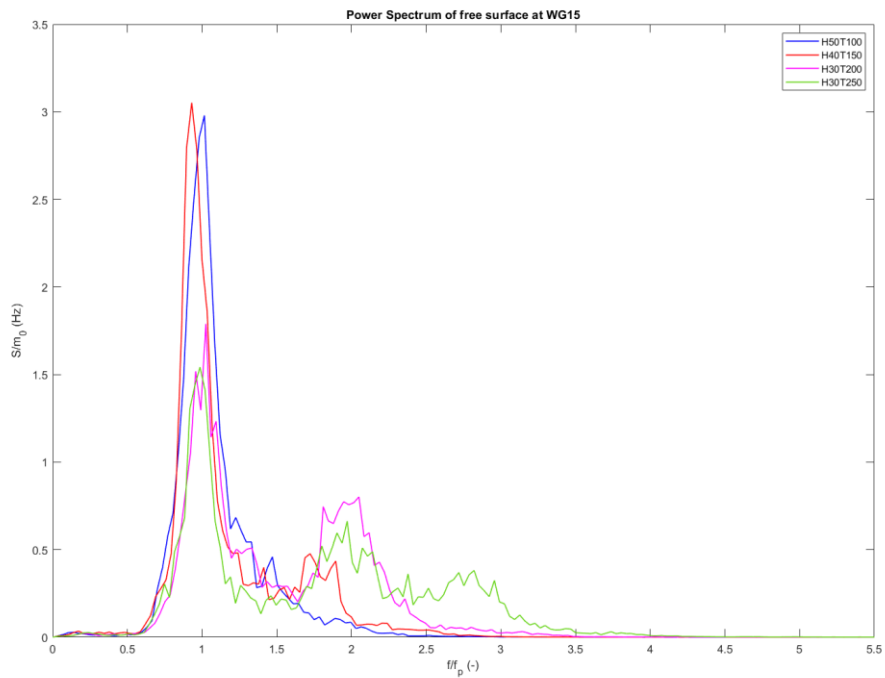


Figura 42 Spettri di densità di energia normalizzati alla sonda 15 per $\epsilon=0,14$, $T_p=1$ s, $T_p=1,5$ s, $T_p=2$ s, $T_p=2,5$ s e $h=0,56$ m.

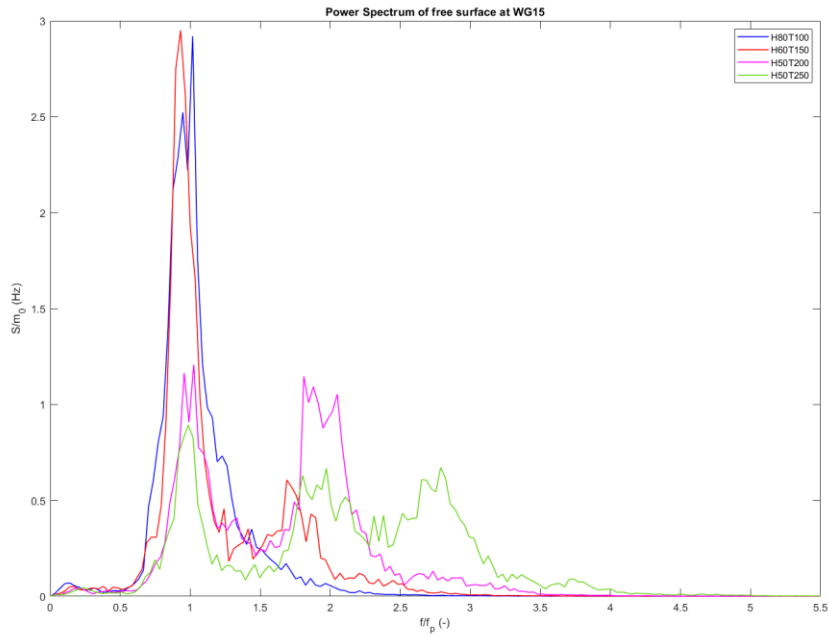


Figura 43 Spettri di densità di energia normalizzati alla sonda 15 per $\epsilon=0,22$, $T_p=1$ s, $T_p=1,5$ s, $T_p=2$ s, $T_p=2,5$ s e $h=0,56$ m.

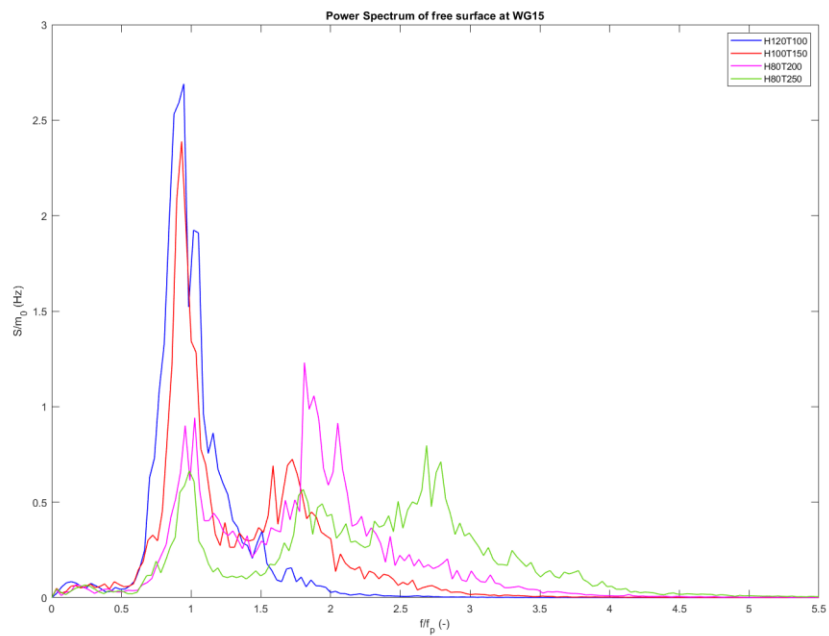


Figura 44 Spettri di densità di energia normalizzati alla sonda 15 per $\epsilon=0,35$, $T_p=1$ s, $T_p=1,5$ s, $T_p=2$ s, $T_p=2,5$ s e $h=0,56$ m.

Osservando le Figure 42, 43 e 44, si nota chiaramente che la variazione di periodo svolge un ruolo fondamentale nell'evoluzione delle forme spettrali trasmesse. Si riscontra infatti che, sia per le profondità alla pala di 0,51 m che per quella di 0,56 m, a parità del parametro ε , l'aumento del periodo comporta un maggiore trasferimento dell'energia alle frequenze più alte. Nello specifico, per il periodo più basso ($T_p=1s$) lo spettro trasmesso ha pressoché la stessa forma dello spettro incidente e l'energia rimane concentrata intorno alla prima componente. Per i periodi di 1,5 e 2 s, l'energia trasmessa è in parte ancora concentrata intorno alla frequenza principale ma in questi due casi si evidenzia anche un secondo picco di energia ad una frequenza quasi doppia rispetto alla principale. Per l'onda con $T_p=2s$, il picco alla frequenza doppia della principale diventa maggiore rispetto a quello della frequenza fondamentale, per l'aumento delle interazioni non lineari al di sopra dell'ostacolo. Per il periodo più alto tra quelli studiati ($T_p=2,5s$) la generazione di superarmoniche di ordine superiore porta alla formazione di un ulteriore picco per frequenze intorno a $3f_p$, a cui è associata una densità spettrale superiore rispetto a quella delle altre componenti. . Ad ogni modo l'energia tende a ridistribuirsi su un range di frequenze più basso con l'aumentare del livello idrico.

4.6.1 Determinazione dell'energia coinvolta nello spettro

Come visto ai precedenti paragrafi gli spettri di energia tendono a subire delle importanti modifiche per effetto dell'interazione non lineare onda-struttura che tende a spostare il contenuto energetico a frequenze superiori rispetto a quella principale. Attraverso l'ausilio di un codice Matlab, per gli spettri trasmessi è stato calcolato il contenuto energetico, in termini di area dello spettro m_0 , presente a diversi range di frequenza: $(1,5-2,5)f_p$, $(2,5-3,5)f_p$ e per frequenze superiori di $3,5f_p$. Nelle tabelle che seguono sono riportati i valori di m_0 per i vari intervalli di frequenze e i loro rapporti con l'energia totale dello spettro trasmesso.

energie spettrali trasmesse per IRREGOLARI h=0,51 m.							
H [m]	T [s]	m_{0_tot} [m ²]	$m_0 (>1.5f_p)$ [m ²]	$m_{01.5}/m_0$	$m_{0(1.5-2.5)}/m_0$	$m_{0(2.5-3.5)}/m_0$	$m_{0>3.5}/m_0$
0.05	1.00	0.000059	0.000009	0.158285	0.151221	0.004636	0.002428
0.08	1.00	0.000094	0.000016	0.172693	0.164929	0.006166	0.001598
0.12	1.00	0.000111	0.000017	0.156828	0.148029	0.006938	0.001862
0.04	1.50	0.000045	0.000021	0.459269	0.392464	0.062390	0.004415
0.06	1.50	0.000075	0.000040	0.530360	0.440721	0.082083	0.007556
0.10	1.50	0.000107	0.000063	0.594759	0.489928	0.091057	0.013774
0.03	2.00	0.000034	0.000024	0.709980	0.542956	0.139806	0.027217
0.05	2.00	0.000069	0.000053	0.772668	0.486956	0.233521	0.052191
0.08	2.00	0.000096	0.000075	0.783235	0.393228	0.297915	0.092092
0.03	2.50	0.000034	0.000027	0.799376	0.245912	0.399874	0.153590
0.05	2.50	0.000070	0.000058	0.827442	0.215944	0.363779	0.247719
0.08	2.50	0.000095	0.000073	0.771581	0.179201	0.294954	0.297425

Tab. 18 Energie spettrali trasmesse

energie spettrali trasmesse per IRREGOLARI h=0,56 m.							
H [m]	T [s]	m0_tot	m0 (>1.5fp)	m01.5/m0	m0(1.5-2.5)/m0	m0(2.5-3.5)/m0	m0>3.5/m0
0.05	1.00	0.000069	0.000006	0.089250	0.084301	0.002858	0.002091
0.08	1.00	0.000148	0.000011	0.074689	0.069607	0.003299	0.001783
0.12	1.00	0.000216	0.000014	0.065308	0.060912	0.003195	0.001200
0.04	1.50	0.000044	0.000009	0.194241	0.183607	0.008270	0.002363
0.06	1.50	0.000098	0.000024	0.239037	0.222889	0.013088	0.003060
0.10	1.50	0.000199	0.000068	0.343729	0.310348	0.028802	0.004579
0.03	2.00	0.000027	0.000012	0.446411	0.410955	0.031650	0.003806
0.05	2.00	0.000086	0.000050	0.583002	0.511804	0.064767	0.006431
0.08	2.00	0.000174	0.000112	0.645036	0.516588	0.109894	0.018555
0.03	2.50	0.000027	0.000014	0.539309	0.341836	0.180646	0.016827
0.05	2.50	0.000090	0.000066	0.726347	0.376410	0.306446	0.043490
0.08	2.50	0.000178	0.000139	0.776919	0.349747	0.344324	0.082848

Tab. 19 Energie spettrali trasmesse

Capitolo 5 Risultati

5.1 Risultati di K_r per onde regolari ed irregolari

Questo lavoro di tesi ha permesso di analizzare alcuni aspetti fondamentali riguardanti la riflessione del moto ondoso, quando un ostacolo presente sul fondale (in questo caso una barra di forma trapezia) interagisce con un sistema di onde, regolari oppure irregolari. Per quanto riguarda le onde regolari, se si considera il caso di livello idrico all'interno del canale pari a 0,51 m, è possibile osservare dei valori del coefficiente di riflessione che variano dal 2% al 30%. In generale è possibile affermare che sul valore effettivo del coefficiente di riflessione incide in maniera più significativa l'aumento dell'altezza d'onda piuttosto che l'aumento del periodo; infatti, mantenendo la stessa altezza ed incrementando di 5 secondi il periodo non si riscontra la stessa entità di crescita del K_r che invece si ottiene mantenendo lo stesso periodo ma aumentando l'altezza dell'onda incidente dell'ordine di qualche centimetro (1 o 2 cm). Il coefficiente di riflessione è stato messo in relazione al rapporto di ripidità dell'onda (H/L) espresso in percentuale, come riportato in Figura 45. Dal grafico è stato escluso il dato relativo a $H=15\text{cm}$ e $T=2,5$ s, in quanto non plausibile e sicuramente affetto da errore d'analisi.

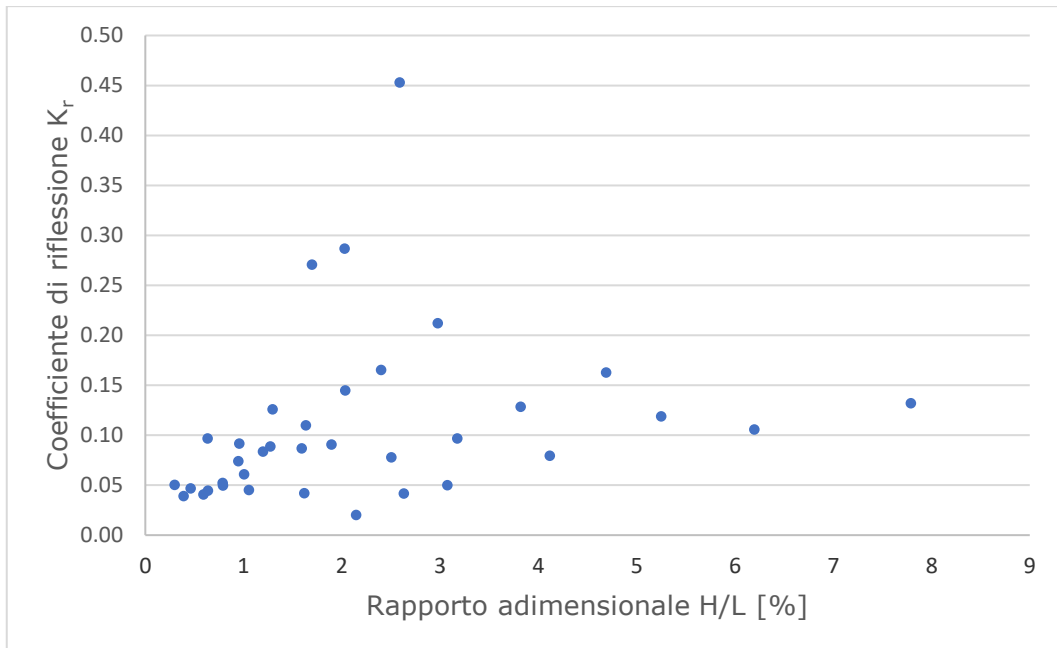


Figura 45 Valutazione del K_r per onde regolari $h=0,51$ m

Sempre per le onde regolari, si è proceduto ad effettuare le stesse operazioni con un livello all'interno del canale maggiore ovvero di 0,56 m, che corrisponde ad una sommergenza della barra pari a 0,15 m. Anche in questo caso, seppur con valori più bassi in quanto vi è l'influenza del livello idrico più alto, si manifesta il comportamento precedentemente descritto, ed anche in questo caso si riporta come il K_r tende a variare in funzione del rapporto adimensionale H/L.

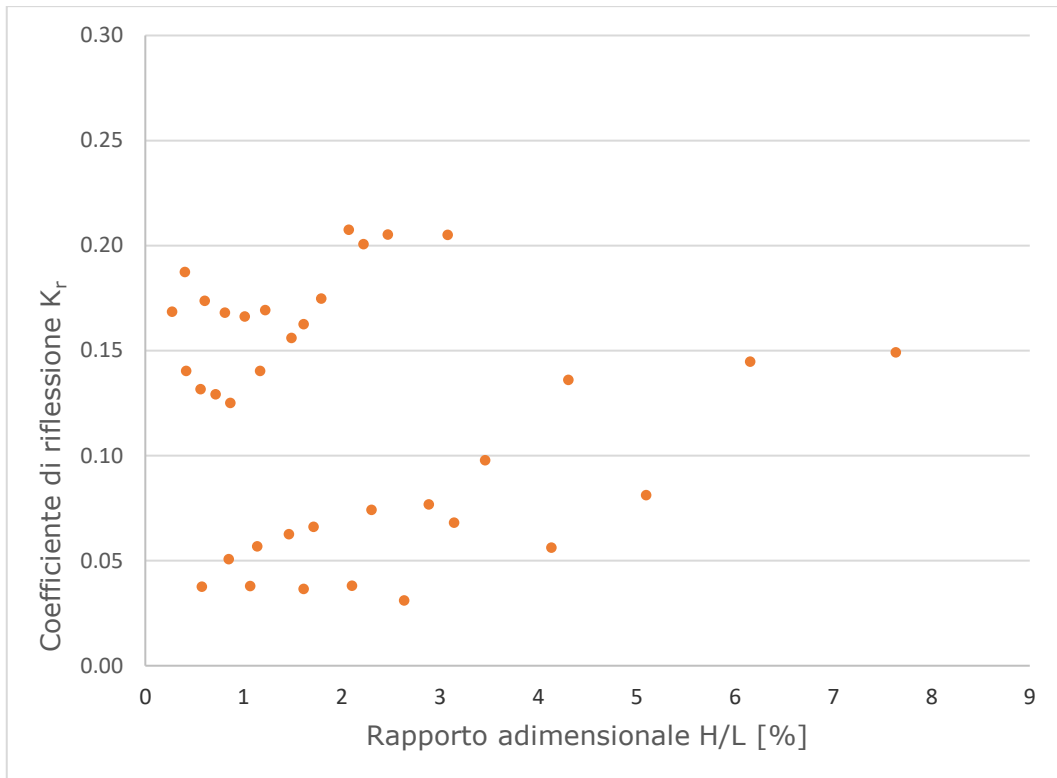


Figura 46 Valutazione del K_r per onde regolari $h=0,56$ m

Come descritto nei precedenti capitoli, il fenomeno della riflessione è stato studiato anche per il caso di barra emersa con la profondità idrica alla pala di 0,30 m. Per effetto del basso livello idrico non c'è praticamente tracimazione e quindi trasmissione del moto ondoso. La pendenza della struttura non comporta una riflessione del 100%, come potrebbe verificarsi nel caso di strutture a parete verticali. Rispetto al caso di barra sommersa i coefficienti di riflessione sono più elevati (non c'è energia trasmessa), come visibile dal grafico di Figura 47 in cui K_r è sempre rappresentato in funzione del parametro adimensionale H/L. Anche in questo caso dal grafico vengono esclusi i valori

relativi ad $H=10\text{cm}$, $T=2\text{s}$ e $H=8\text{cm}$ $T=2\text{s}$ in quanto affetti da errore, poiché completamente dissonanti con gli altri valori emersi.

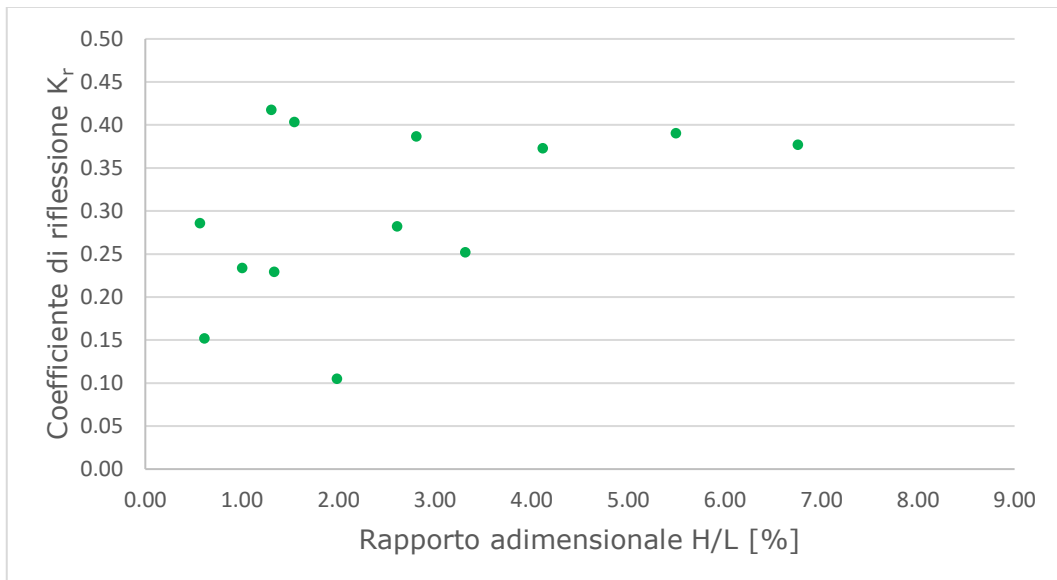


Figura 47 Valutazione del K_r per onde regolari $h=0,30$

Per quanto riguarda lo studio delle onde irregolari, allo stesso modo delle regolari, è stato calcolato per ogni condizione di moto ondoso il coefficiente di riflessione con il metodo a due sonde Goda e Suzuki. In generale si riscontra che, per le variazioni di periodo studiate (da 1 a 2,5 secondi) e per le variazioni di altezza (da 3 a 12 cm) non vi è una sostanziale variazione del coefficiente di riflessione che si concentra nel range tra il 9 % e il 13,5 % per il caso con profondità alla pala pari a $h=0,51$ m. Anche in questo caso è stato graficato il K_r con il parametro non dimensionale H/L (Figura 48).

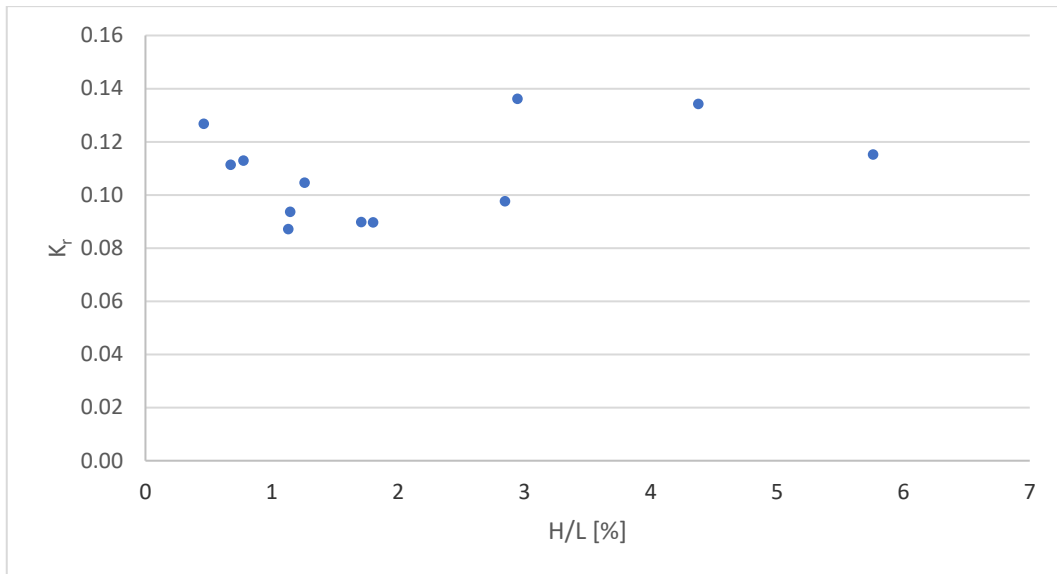


Figura 48 Valutazione del K_r per onde irregolari $h=0,51$ m

Rispetto alla valutazione fatta per la profondità alla pala di 0,51 m, non vi sono sostanziali differenze per la profondità di 0,56 m ma in questo caso si riscontrano coefficienti di riflessione intorno ad un range leggermente più ampio rispetto al precedente, nello specifico dal 8,5 % al 16,5 %. Il grafico relativo in funzione di H/L è riportato in Figura 49.

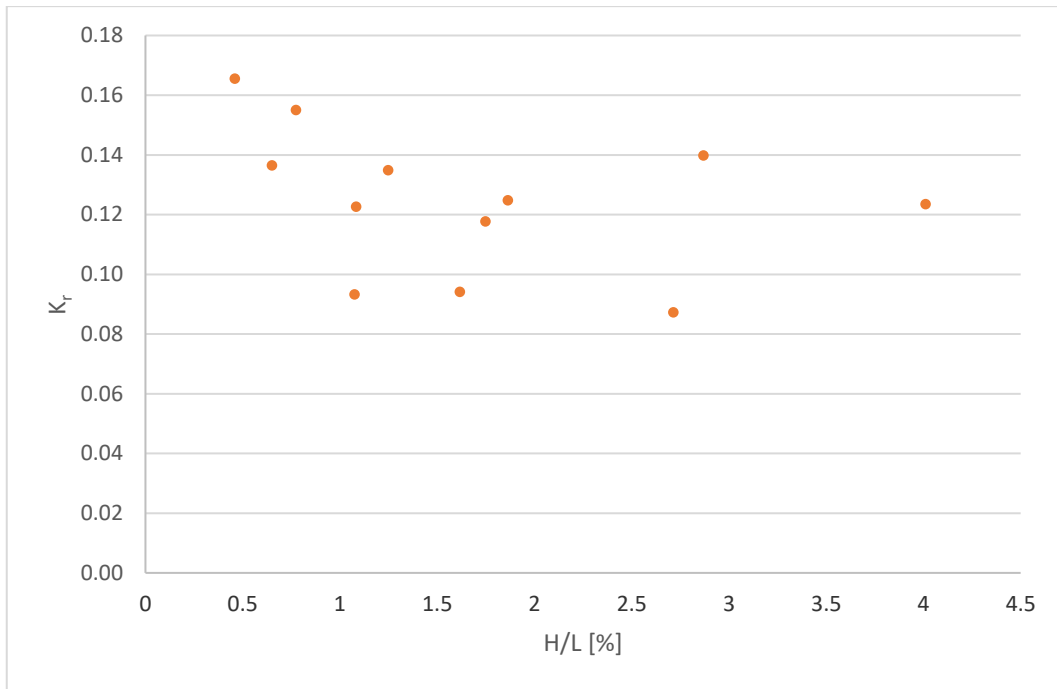


Figura 49 Valutazione del K_r per onde irregolari $h=0,56$ m

5.2 Risultati di K_t per onde regolari e irregolari

Il presente lavoro, come già detto, ha permesso di far luce anche sul fenomeno della trasmissione del moto ondoso. Questo è stato possibile attraverso l'analisi del coefficiente di trasmissione che dà informazioni riguardo alla quantità di energia dell'onda incidente che, propagandosi lungo il canale, passa sopra l'ostacolo e raggiunge la parte verso la costa.

Per il caso di onde regolari e profondità alla pala di 0,51 m le percentuali del coefficiente di trasmissione sono molto variabili e si osserva che, all'aumentare dell'altezza d'onda incidente ma a parità di periodo, si ha una diminuzione del K_t . Questo è dovuto

sia al fatto che in parte aumenta il contributo dovuto alla riflessione, ma soprattutto all'effetto del frangimento che provoca una notevole dissipazione energetica. La variazione dell'altezza d'onda ha molta più incidenza sul valore di K_t rispetto alla variazione del periodo. Passando alla profondità alla pala di 0,56 m il risultato non cambia, è possibile infatti riscontrare lo stesso comportamento ma con un aumento dei coefficienti che variano dal 5% al 10%, dovuto all'aumento del livello idrico nel canale. In Figura 50 si valuta K_t in funzione del rapporto adimensionale $R_c/H_{1/3}(S1)$, dove R_c assume valori negativi ed indica la sommergenza della barra. Come visibile dal grafico, il coefficiente di trasmissione risulta linearmente crescente al diminuire di $R_c/H_{1/3}(S1)$, per poi raggiungere un massimo pari a circa 0,90 per $R_c/H_{1/3}(S1) \approx -3$ e rimanere costante per valori di $R_c/H_{1/3}(S1) < -3$.

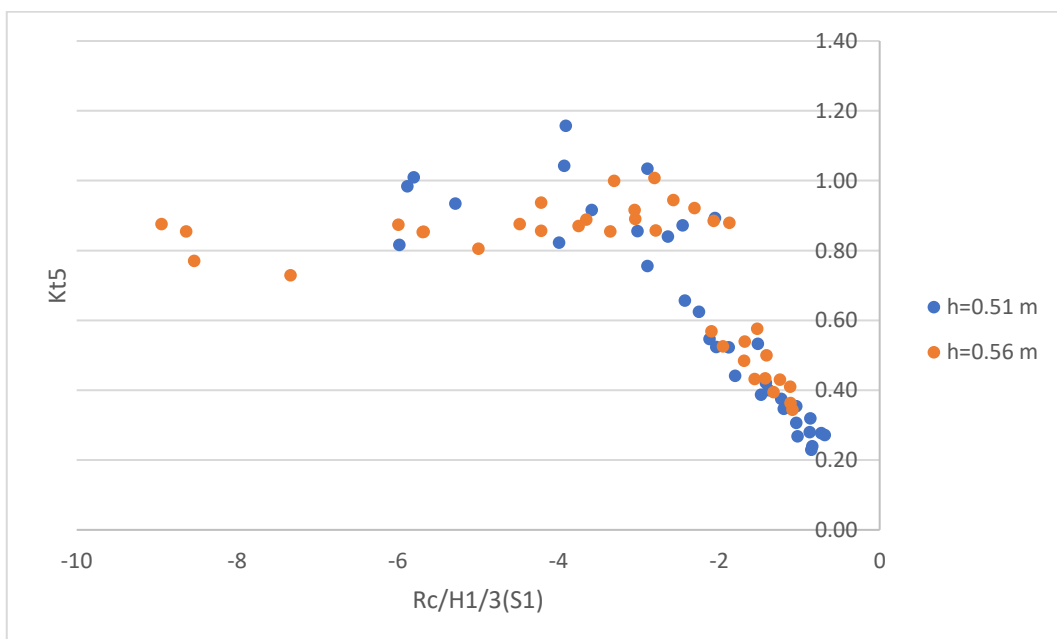


Figura 50 Valutazione del K_t per onde regolari

Anche per la trasmissione delle onde irregolari sono stati presi in considerazione diversi modi per la determinazione del coefficiente di trasmissione. K_{t1} è ottenuto come altezza d'onda trasmessa diviso quella incidente in termini di $H_{1/3}$, K_{t2} è valutato sulla base delle H_{m0} registrate alla sonda 15 (trasmessa) e 1 (incidente), infine K_{t3} è stato determinato applicando il metodo di Goda e Suzuki per determinare l'onda incidente, ovvero come rapporto tra H_{m0} registrato alla sonda 15 e H_I . Quest'ultima modalità per il calcolo di K_t sembra fornire i risultati più attendibili per cui si ritiene un buon metodo per la determinazione. In generale quello che si riscontra è una diminuzione del coefficiente, quindi del fenomeno della trasmissione, all'aumentare dell'altezza dell'onda e mantenendo costante il periodo. Anche in questo caso la presenza di frangimento e dissipazione energetica influisce ovviamente sulla quantità di energia trasmessa dietro l'ostacolo. Lo stesso risultato è ottenuto per entrambi i livelli idrici nel canale, ma come per le regolari nel caso di livello maggiore si hanno dei valori di K_t più elevati. Occorre ricordare che per il caso di analisi con periodo 1 s il metodo di Goda e Suzuki non è del tutto applicabile perché gran parte dell'energia dello spettro è concentrata oltre il valore della frequenza massima che può

essere indagata con il metodo. Di seguito, nelle Figure 51 e 5bis, si riportano i coefficienti di trasmissione in funzione del rapporto $R_c/H_{m0}(S1)$ e R_c/H_I in cui R_c è la sommersenza della barra (negativa perché la barra è sommersa). Anche in tal caso, seppur con un minor numero di dati a disposizione, risulta possibile vedere un trend simile a quello delle onde regolari.

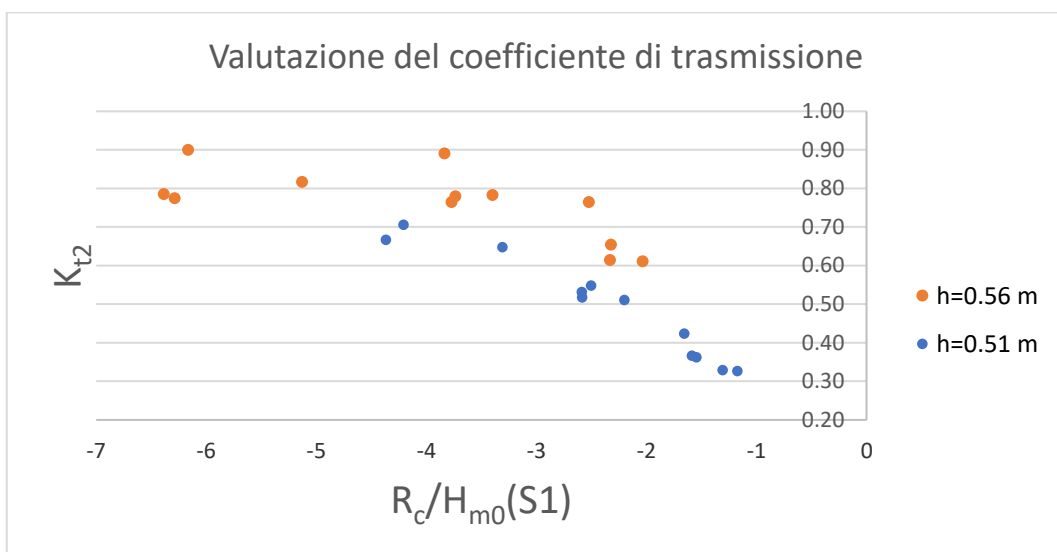


Figura 51 Valutazione del K_t per onde irregolari

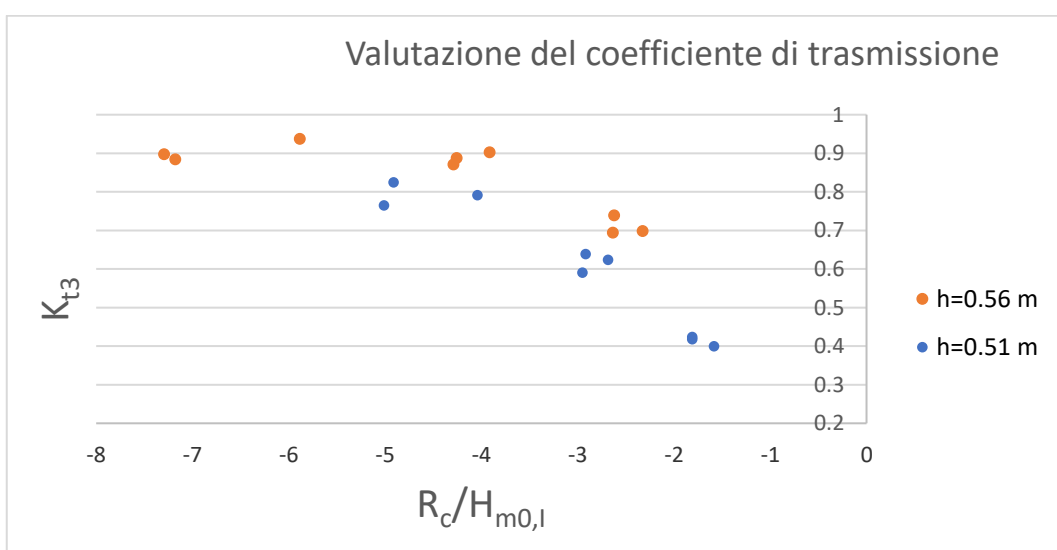


Figura 51bis Valutazione del K_t per onde irregolari.

5.3 Considerazioni sulla trasformazione dello spettro

Per quanto riguarda la trasformazione dello spettro delle onde irregolari oltre la barra sommersa, alle alte frequenze si osserva una distribuzione di energia caratterizzata da vari picchi, per cui non si verifica un appiattimento dello spettro alle frequenze più alte, come era stato invece osservato da van der Meer (2000) per strutture emerse. I grafici che seguono mostrano il rapporto tra l'energia spettrale alle alte frequenze e l'energia totale m_0 al variare del parametro di Ursell U_r . In questo caso il parametro di Ursell è stato calcolato come $U_r = \frac{H_{m0}(S1)L_0^2}{|R_c^3|}$ dove $H_{m0}(S1)$ è l'altezza spettrale incidente alla sonda 1, $L_0 = \frac{gT^2}{2\pi}$ è la lunghezza d'onda a largo e R_c la sommergenza della barra. Si può affermare che si riscontrano dei trend di trasferimento di energia alle alte frequenze in funzione del parametro U_r , inoltre, all'aumentare del livello nel canale di prova corrisponde una diminuzione della quantità di energia trasferita alle alte frequenze. Nei grafici l'energia trasferita alle alte frequenze è suddivisa nei range (1,5-2,5)fp, (2,5-3,5)fp e per frequenze maggiori di 3,5fp.

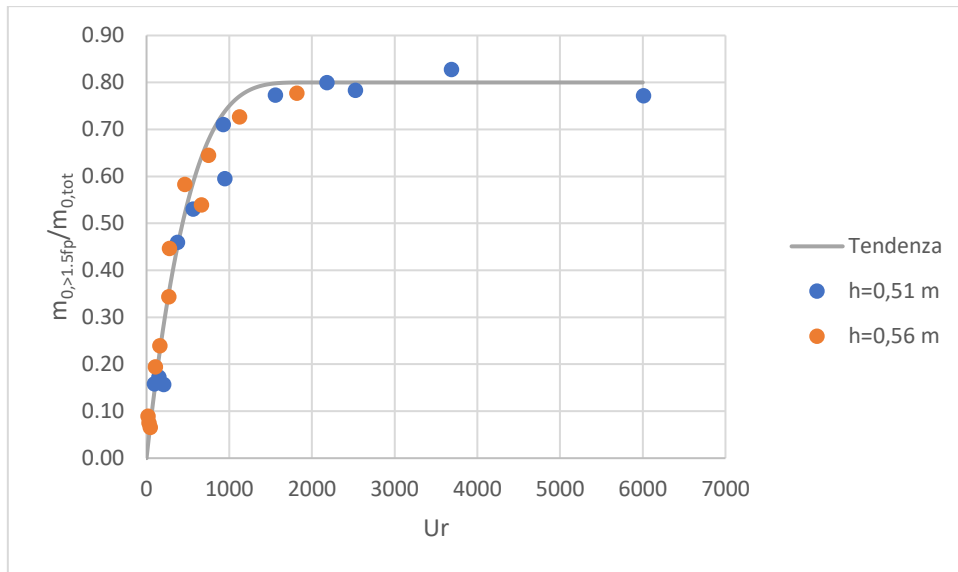


Figura 52 Energia per frequenze superiori a 1,5 fp relativa all'energia totale m_0 in funzione di U_r

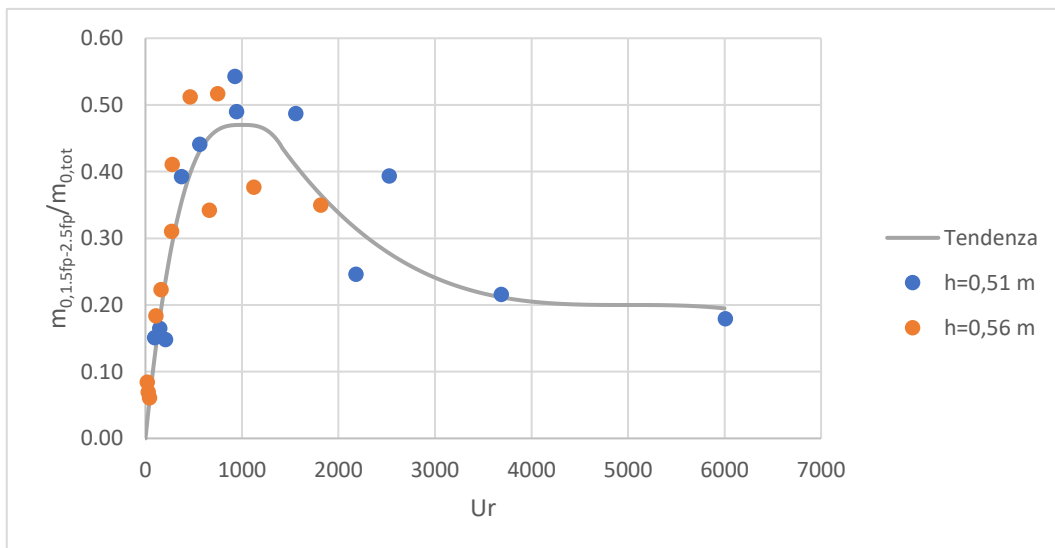


Figura 53 Energia per frequenze nel range (1,5-2,5)fp relativa all'energia totale m_0 in funzione di U_r

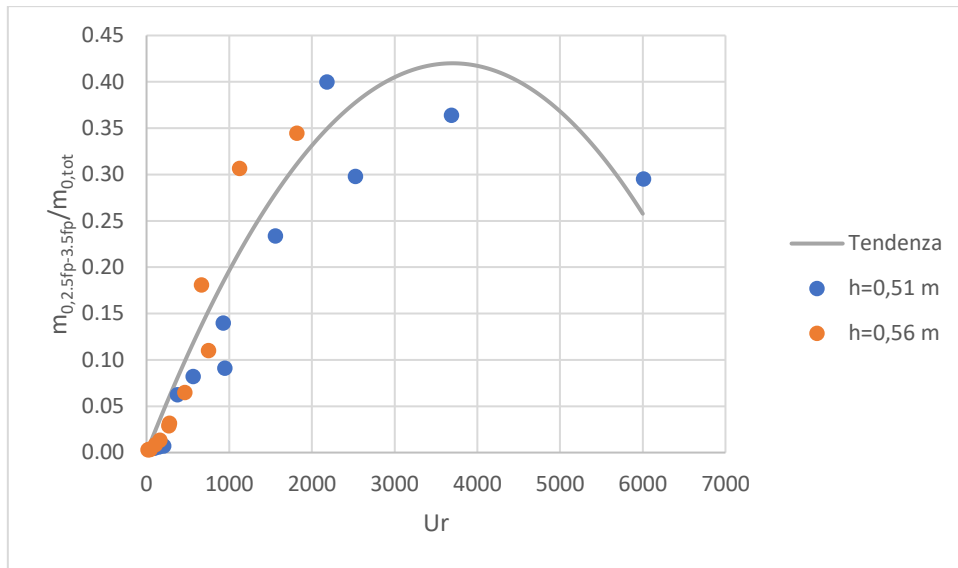


Figura 54 Energia per frequenze nel range (2,5-3,5)fp relativa all'energia totale m_0 in funzione di U_r

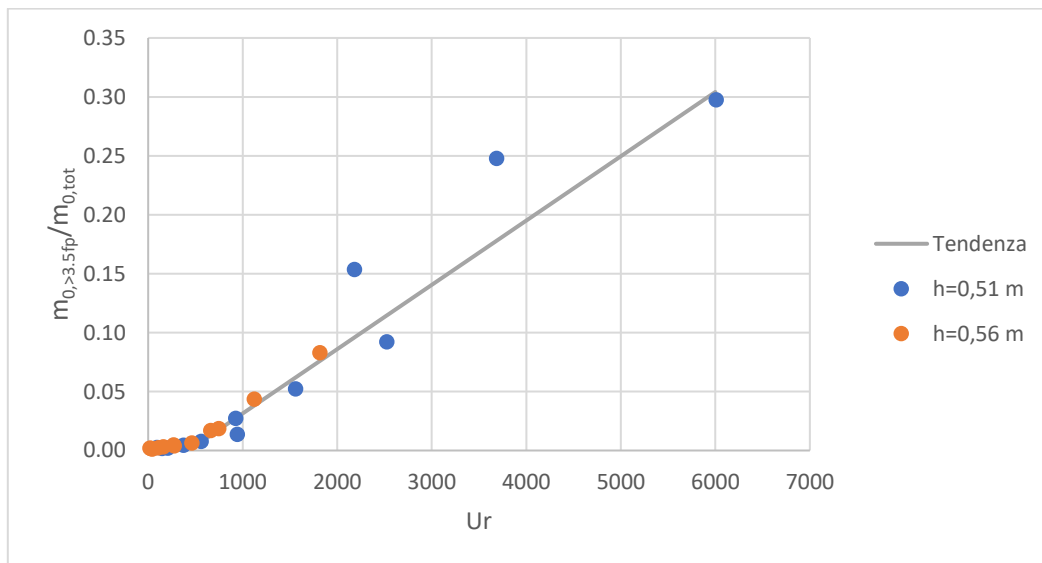


Figura 55 Energia per frequenze nel range (2,5-3,5)fp relativa all'energia totale m_0 in funzione di U_r

Si evidenzia come per entrambi i livelli, l'energia trasferita alle armoniche superiori tende ad aumentare con l'aumento del parametro di Ursell. Tale parametro è infatti associato alla non linearità delle onde e alla possibilità di generare armoniche alle frequenze superiori (Losada et al., 1997). I grafici mostrano degli andamenti abbastanza definiti che possono essere descritti tramite le seguenti equazioni in funzione del parametro di Ursell precedentemente definito:

per $m_0 > 1,5f_p/m_{0,tot}$:

$$\text{Per } Ur \leq 2000 \quad m_{0 > 1,5f_p} = 0,8 \left(1 - \left(1 - \frac{Ur}{2000} \right)^4 \right)$$

$$\text{Per } Ur > 2000 \quad m_{0 > 1,5f_p} = 0,8$$

$$r^2 = 0,963$$

per $m_0(1,5-2,5)f_p/m_{0,tot}$:

$$\text{Per } Ur \leq 1400 \quad m_{0(1,5-2,5)f_p} = 0,47 \left(1 - \left| 1 - \frac{Ur}{1000} \right|^3 \right)$$

$$\text{Per } Ur \geq 1400 \quad m_{0(1,5-2,5)f_p} = (0,2 + 0,64 \left(1 - \frac{Ur}{1000} \right)^3)$$

$$r^2 = 0,833$$

per $m_0(2,5-3,5)_{fp}/m_{0,tot}$:

$$m_{0(2,5-3,5)_{fp}} = 0,42(1 - |1 - \frac{Ur}{3700}|^2)$$

$$r^2 = 0,904$$

per $m_0 > 3,5_{fp}/m_{0,tot}$:

$$\text{Per } Ur \geq 600 \quad m_{0 > 3,5_{fp}} = -0,023 + 0,3 \frac{Ur}{5500}$$

$$\text{Per } Ur \leq 600 \quad m_{0 > 3,5_{fp}} = 0,008 \frac{Ur}{500}$$

$$r^2 = 0,944$$

Conclusioni

Le analisi eseguite per lo sviluppo di questo lavoro di tesi hanno permesso di investigare alcune questioni fondamentali riguardanti l'interazione tra moto ondoso, sia esso regolare o non, e un ostacolo assimilabile ad una barra sommersa. Nello specifico si è discusso dei fenomeni di riflessione e trasmissione dell'onda e della trasformazione dello spettro di energia nel caso di onde irregolari a seguito della propagazione e del passaggio al di sopra della barra. Lo studio è stato ripetuto per due profondità dell'acqua all'interno del canale ed è stato possibile trarre le seguenti conclusioni:

- Per quanto riguarda la riflessione di onde regolari, i risultati mostrano dei valori del coefficiente di riflessione dal 2% al 30%. In generale è possibile affermare che la variazione di K_r dipende per lo più dall'entità della variazione di altezza incidente piuttosto che dalla variazione del periodo. Con l'aumento del livello idrico, si registrano valori di riflessione più bassi, mentre, per il caso di barra emersa è maggiore la riflessione dovuta alla barra arriva al 40% poiché non si ha energia trasmessa. Per il caso di onde irregolari, si osserva un comportamento simile.

- Relativamente alla trasmissione invece, per il caso di onde regolari il coefficiente di trasmissione varia in un range piuttosto ampio (dal 30 % al 70 % circa). Anche in questo caso il coefficiente di riflessione dipende maggiormente dalla variazione dell'altezza d'onda e si registra un aumento praticamente lineare del K_t con il diminuire del rapporto R_c/H (dove R_c è assunto negativo per la barra sommersa) fino a raggiungere un valore "soglia" pari a circa 0,90. Ciò risulta associabile con tutta probabilità alla dissipazione energetica che si verifica per mezzo del frangimento. Passando al livello idrico maggiore i coefficienti aumentano del 5-15 %. Stesso riscontro si ha (con valori ovviamente diversi) per le onde irregolari.
- In merito alle modificazioni subite dallo spettro di energia al passaggio sulla barra sommersa, è possibile riscontrare una fondamentale influenza del periodo ondoso che, aumentando, comporta un trasferimento di energia via via maggiore alle frequenze più alte e per il periodo di picco più alto pari a 2,5 s, le componenti armoniche secondarie diventano prevalenti. Inoltre, il quantitativo di energia trasferito a frequenze superiori a 1,5 volte quella di picco iniziale può arrivare a percentuali piuttosto elevate (fino al 80%) rispetto all'energia totale coinvolta. È possibile schematizzare lo spettro d'onda trasmesso in funzione

delle caratteristiche dell'onda e della sommergenza attraverso il parametro Ur , nota la percentuale di energia trasferita a frequenze superiori.

Ringraziamenti

Le ultime parole di questo elaborato voglio scriverle per ringraziare tutte le persone, che, in qualsiasi modo hanno permesso il raggiungimento di questo punto. Ringrazio la professoressa Sara Corvaro che mi ha concesso la possibilità di lavorare a questo progetto e che, come sempre, con la sua grandissima disponibilità mi ha fornito tutti i consigli, strumenti e chiarimenti necessari per portare a termine al meglio il lavoro. Ringrazio inoltre il professor Alessandro Mancinelli e Carlo Lorenzoni che con le loro lezioni ricche di esperienza mi hanno trasmesso l'interesse verso questa materia. Un profondo grazie è rivolto a Stefania e Francesco, dottoranda e assegnista di dipartimento, che oltre al bel rapporto che hanno saputo innescare mi hanno sempre dato un grande aiuto, dal lavoro pratico di laboratorio a quello di stesura e revisione della tesi. Infine, ma non per ordine di importanza l'ultimo ringraziamento è per la mia famiglia senza la quale, per supporto e possibilità, non avrei mai potuto percorrere questo, seppur tortuoso, bel percorso.

Bibliografia

Benassai E. "Sulla riflessione di un'onda di oscillazione contro ostacoli a profilo discontinuo"

Chun-Yuan Lin, Chin-Jer Huang "Decomposition of incident and reflected higher harmonic waves using four wave gauges", *Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University, 2004*

Dean R.G., Dalrymple R.A, "Water wave mechanism for engineers and scientist", *World Scientific Publishing Co.Ote.Ltd, Singapore, 1991*

E.P.D. Mansard and E.R. Funke, "The Measurament of Incident and Reflected Spectra Using a Least squares Method"

Goda Y., "Random Seas and Design of Maritime Structures", *University of Tokyo, 1985*

I.J.Losada, M.D.Patterson, M.A.Losada., "Harmonic generation past a submerged porous step" *Universidad de Cartabria, 1997*

J.W. van der Meer, H.J.Regeling and J.P. de Wal, "Wave Transmission: spectral changes and its effects on run-up and overtopping", 2001

Mancinelli A., Lorenzoni C., Corvaro S. dispense e appunti
"Costruzioni Marittime"

Mancinelli A., Lorenzoni C., Corvaro S. dispense e appunti
"Ingegneria Costiera"

Matteotti G., "Lineamenti di Costruzioni Marittime", *Padova, 1995*

S.Beji, J.A Battjes, "Experimental investigation of wave propagation over a bar" *Delft University of Technology, 1993*

S.Beji, J.A Battjes, "Numerical simulation of non linear wave propagation over a bar" *Delft University of Technology, 1994*

Yasser Eldeberky, "Non linear Trasformation of Wave Spectra in the Nearshoe Zone", 1996