

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PISA

Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali
e Facoltà di Agraria



CORSO DI LAUREA IN SCIENZE AMBIENTALI
Indirizzo Marino

Tesi di Laurea

**STUDIO SPERIMENTALE SU MODELLO FISICO
DI IPOTESI PROGETTUALI PER LA RIQUALIFICAZIONE
DEL SISTEMA DI DIFESA COSTIERA DI MARINA DI PISA**

Candidato: Ilaria Crema

.....

Relatore: Prof. Ing. Lorenzo Cappietti

.....

Anno Accademico 2006/2007

*Ai miei genitori
e a Giuly*

Indice

Sommario	1
Introduzione	3
1. Il Modello Fisico	5
1.1 Concetti generali di modellistica costiera.....	5
1.1.1 Descrizione dei fenomeni da studiare.....	5
1.1.2 Strumenti di indagine.....	7
1.1.3 Modellistica fisica	10
1.2 Scale fondamentali.....	11
1.3 Criteri di similitudine	14
1.3.1 Similitudine di Froude.....	16
1.3.2 Similitudine di Reynolds.....	17
1.4 Modelli idrodinamici Short Waves	17
1.4.1 Campi di applicazione	18
1.4.2 Effetti di scala	19
1.4.3 Effetti di laboratorio.....	19
2. Concetti di idrodinamica costiera: interazione delle onde con le strutture costiere	20
2.1 Trasmissione, riflessione e frangimento	20
2.2 Water set-up indotto dalle scogliere.....	24
2.3 Overtopping.....	33
3. Descrizione e messa appunto dell'apparato sperimentale	38
3.1 Caratteristiche strutturali del Canale del Laboratorio Costiero di Firenze	38
3.1.1 Generatore di moto ondoso.....	39
3.1.2 Pompa di retro-pala	40
3.1.3 Pompa per il riempimento del canale.....	40
3.1.4 Sistema di ricircolo	41
3.2 Strumenti di acquisizione dei dati.....	42
3.2.1 Sonde resistive	42
3.2.2 Punta idrometrica	47
3.2.3 Misuratore di portata magnetico.....	48

4.	Caratteristiche generali del litorale pisano	50
4.1	Clima meteomarinario dell'area in esame.....	50
4.1.1	Regime anemologico	50
4.1.2	Clima del moto ondoso.....	51
4.1.3	Regime idrodinamico.....	54
4.2	Il litorale di Marina di Pisa	56
4.2.1	Evoluzione del litorale e successione delle opere di difesa.....	58
4.3	Descrizione tecnica delle strutture in esame	60
4.3.1	Caratterizzazione geometrica	61
4.3.2	Caratterizzazione granulometrica	63
5.	Applicazione al caso di Marina di Pisa: studio su modello fisico del tratto di costa protetto dalla scogliera n°5	67
5.1	Criteri adottati per la realizzazione del modello	67
5.1.1	Scelta della sezione di studio	67
5.1.2	Scelta del fattore di scala	68
5.1.3	Ricostruzione del profilo batimetrico in canale.....	69
5.2	Ricostruzione delle strutture.....	71
5.2.1	Scogliera emersa n°5.....	72
5.2.2	Scogliera radente	75
5.3	Ricerca e settaggio degli attacchi ondosi.....	78
5.4	Prove preliminari.....	81
5.4.1	Posizionamento delle sonde resistive.....	82
5.4.2	Misure di overtopping.....	84
5.4.3	Analisi dei dati delle prove preliminari.....	85
5.5	Prove definitive	91
5.5.1	Posizionamento delle sonde resistive.....	91
5.5.2	Configurazioni studiate	93
6.	Analisi e interpretazione dei risultati	97
6.1	Analisi di I livello.....	97
6.1.1	Coefficienti di calibrazione	97
6.1.2	Deviazione standard	98
6.2	Analisi preliminare della sessione sperimentale	103
6.2.1	Prove relative alla configurazione C1 senza ricircolo	103
6.2.2	Prove relative alla configurazione C1 con ricircolo	107
6.2.3	Prove relative alla configurazione C2.....	110

6.2.4	Prove relative alla configurazione C3.....	112
6.3	Analisi di II livello.....	115
6.3.1	Coefficiente di frangimento.....	115
6.3.2	Coefficiente di trasmissione.....	121
6.3.3	Water set-up	136
6.3.4	Overtopping	150
7.	Conclusioni	166
	Allegati	168
	Allegato I: Indagine Granulometrica delle strutture in esame.....	169
	Allegato II: Check list.....	175
	Allegato III: Listato Matlab	177
	Allegato IV: Schema del canale e della strumentazione utilizzata.....	180
	Allegato V: Schema delle configurazioni studiate.	181
	Indice delle figure	182
	Indice delle foto	184
	Indice delle tabelle	185
	Bibliografia	187
	Ringraziamenti	191

Sommario

Questa tesi si inserisce nella serie di studi effettuati, per conto della Provincia di Pisa dal Prof. Ing. Lorenzo Cappiotti, presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Firenze.

E' stato preso in esame il tratto di litorale di Marina di Pisa, protetto dalla quinta scogliera emersa, a partire dalla foce del fiume Arno.

L'obiettivo del presente lavoro è quello di proporre un nuovo sistema di protezione più efficace basato su opere sommerse, allo scopo di ridurre l'overtopping sulla strada litoranea e al contempo permettere una riqualificazione in termini di fruibilità del litorale attualmente degradato.

Lo stato dell'arte sui modelli fisici, studiato su aggiornati contributi disponibili nella letteratura specifica, è riassunto nei Capitoli 1 e 2 e su questa base bibliografica è stato realizzato un modello bidimensionale, nel Laboratorio di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria Civile di Firenze.

Tale modello riproduce lo stato attuale del tratto di costa protetto dalla scogliera in esame e ha permesso di condurre le misure sperimentali necessarie per valutazione delle ipotesi progettuali alternative, studiate per la Provincia di Pisa e oggetto della presente tesi.

Nel Capitolo 3 sono stati descritti gli aspetti caratteristici del canale di laboratorio, la strumentazione utilizzata per l'acquisizione dei dati, e le apparecchiature componenti l'apparato sperimentale.

Nel Capitolo 4 sono state descritte le condizioni meteomarine del litorale pisano, l'evoluzione dello stesso a seguito di opere di difesa e le caratteristiche geometriche e granulometriche delle strutture, che sono state poi riprodotte nel modello in scala.

Nel Capitolo 5 sono stati descritti i criteri adottati per la realizzazione del modello e le procedure preliminari per la messa a punto della strumentazione e delle apparecchiature, al fine di poter iniziare le sessioni sperimentali.

Sono state inoltre descritte le fasi di realizzazione delle quattro configurazioni adottate negli esperimenti, due delle quali (C1 e C1-R) rappresentano il modello dello stato attuale della scogliera emersa n°5, e le altre due (C2 e C3) il modello delle ipotesi progettuali concordate con la Provincia di Pisa.

Nel Capitolo 6 è stata presentata l'analisi e l'interpretazione dei dati acquisiti per le quattro configurazioni, ciascuna sottoposta a sei attacchi ondosi per tre diversi livelli idrici, per un totale di 72 prove.

Nel Capitolo 7 sono discussi i risultati di questo studio sperimentale al fine di valutare l'efficienza delle alternative progettuali verificate. Come parametro principale ritenuto più opportuno, per una valutazione oggettiva delle differenti alternative progettuali, è stato utilizzato il flusso di tracimazione sulla strada litoranea.

Introduzione

Il litorale pisano ha iniziato a presentare fenomeni di erosione dopo l'Unità d'Italia, a causa di modifiche effettuate alla foce dell'Arno e della costante riduzione del trasporto solido dovuto alle opere di sistemazione idraulico-forestali, effettuate nel bacino del fiume in quegli anni.

A partire dai primi anni del '900, l'abitato di Marina di Pisa è stato difeso con scogliere aderenti alla strada litoranea, per una lunghezza complessiva di 2.5 Km.

Successivamente negli anni '60 fu costruito a distanza di 80-100 m dalla scogliera radente, un sistema di dieci scogliere emerse parallele, lunghe da 200 a 250 m e con varchi di circa 15 m. Queste scogliere oltre ad aver causato una forte asimmetria della foce dell'Arno, hanno dimostrato di non costituire più una reale protezione dell'abitato e delle infrastrutture, tanto che la viabilità litoranea è stata spesso interrotta per il rischio di crolli del manto stradale e per le cospicue tracimazioni.

Inoltre, come è possibile constatare dai rilievi dei profili trasversali alla costa, l'erosione è proseguita sui fondali, che nella zona protetta raggiungono profondità massime intorno ai 2-3 m, mentre esternamente alle opere si raggiungono i 6-7 m, determinando così dislivelli, tra i due lati delle scogliere, che superano i 3 m.

A causa dell'approfondimento dei fondali, le scogliere parallele hanno avuto necessità di continue manutenzioni e rifiorimenti, con un quantitativo di materiale, che in circa 50 anni, è stato 2-3 volte quello utilizzato per la costruzione.

Ciò suggerisce che sebbene l'utilizzo di scogliere emerse da un lato fornisce una protezione quasi totale del litorale, comportandosi come un muro poco permeabile, dall'altro genera una forte riflessione dell'onda incidente su di esse, causando un profondo scavo al piede della struttura e mettendo in pericolo la stabilità della stessa.

Le scogliere emerse inoltre possono ridurre la fruibilità del litorale, peggiorare la qualità delle acque, facendo assumere alla zona protetta caratteristiche di zone semi-lagunari, generare pericoli per la balneazione, ostacolare l'utilizzo dei piccoli natanti ed alterare il paesaggio locale.

Da un punto di vista prettamente ambientale un intervento auspicabile è la riconversione di scogliere emerse in scogliere sommerse. Uno degli aspetti negativi di queste, però, è l'incremento della trasmissione del moto ondoso.

Questo inconveniente potrebbe essere risolto semplicemente aumentando la larghezza della cresta della scogliera e valutando il grado di sommergenza ottimale.

Il modello fisico realizzato, per conto della Provincia di Pisa presso il Laboratorio di Idraulica dell'Università di Firenze, ha come scopo la valutazione dell'efficacia di un nuovo sistema di protezione, basato su scogliere sommerse, per limitare i danni causati dalle mareggiate, e in particolar modo ridurre l'overtopping sulla strada litoranea.

Lo studio è rivolto alla ricostruzione della morfologia reale di una sezione del tratto di costa protetto dalla scogliera n°5, con l'intento di riprodurre tramite un modello fisico bidimensionale, in scala 1:40, i fenomeni di interazione fra onde e strutture, in particolare: la trasmissione, il water set-up e l'overtopping associati ad eventi estremi.

Tale modello ha permesso di condurre le misure sperimentali necessarie per la valutazione delle ipotesi progettuali alternative studiate, oggetto della presente tesi.

Sono state realizzate quattro configurazioni, due delle quali rappresentano il modello dello stato attuale della scogliera emersa n°5 e sono state denominate C1 e C1-R.

La configurazione C1 è stata eseguita non simulando la corrente presente nei varchi, mentre per la configurazione C1-R è stato scelto di azionare il sistema di ricircolo, per simulare le suddette correnti e riequilibrare il sovrizzo idrico indotto dall'attacco ondoso nella zona protetta, permettendo così di non sovradimensionarlo.

Le altre configurazioni rappresentano invece le due ipotesi progettuali concordate e sono state denominate C2 e C3. Si tratta per entrambe di strutture sommerse, con freeboard pari a -1 m, sotto il livello del mare (-2.5 cm nel modello). La struttura appartenente alla configurazione C2 presenta una larghezza di cresta pari a 20 m (50 cm nel modello), a differenza di quella realizzata per la configurazione C3 che ha una larghezza di cresta di 32 m (80 cm nel modello).

Ciascuna configurazione è stata sottoposta a sei attacchi ondosi, per tre diversi livelli idrici, che simulano sia l'innalzamento di marea che quello da vento e bassa pressione.

I risultati ottenuti durante la sessione sperimentale hanno permesso di effettuare l'analisi della trasmissione, del water set-up e dell'overtopping sulla strada litoranea, mettendo così in evidenza le differenze tra le quattro configurazioni, in modo da rendere facile e immediata la valutazione dell'efficienza delle varie alternative.

1. Il Modello Fisico

1.1 Concetti generali di modellistica costiera

La conformazione di una costa è il risultato di un processo evolutivo dovuto all'azione di modellamento da parte del mare; in particolare, con riferimento alle coste sabbiose, il fenomeno di modellamento è dovuto al trasporto dei sedimenti ed alla loro distribuzione.

Una determinata configurazione di un litorale è stabile, se tende a rimanere sostanzialmente immutata nel tempo, o instabile, se sono in atto fenomeni evolutivi. In questo ultimo caso si parla di erosione, quando la linea di riva si sposta verso l'interno e di accrescimento quando questo spostamento avviene verso il largo.

Le cause di erosione costiera possono essere distinte in naturali o antropiche, a seconda che siano o meno direttamente imputabili all'azione dell'uomo (CERC 1984). Tuttavia, è bene osservare che è proprio l'intervento dell'uomo, con le modifiche apportate all'ambiente, il responsabile indiretto di buona parte dei processi "naturali" che portano all'erosione.

1.1.1 Descrizione dei fenomeni da studiare

Prima di descrivere gli strumenti con i quali è possibile analizzare l'evoluzione di una costa, è opportuno un breve esame dei fenomeni fisici, direttamente responsabili di tale processo, che costituiscono l'oggetto dello studio da effettuare con gli strumenti forniti dalla modellistica (Thornton et al. 2000).

In questa tesi verrà affrontato lo studio dei fenomeni che avvengono a profondità relativamente basse, in cui l'interazione del mare con i sedimenti di fondo è più importante; in particolare, la zona di maggiore interesse è costituita dalla fascia compresa tra la zona di frangimento e la linea di riva.

I vari fenomeni coinvolti possono essere classificati in base alla scala spazio-temporale dell'osservazione; questa classificazione è direttamente connessa al fine per il quale viene effettuato lo studio.

Si possono quindi individuare tre grandi scale di fenomeni:

▪ **Processi su piccola scala (0.1 mm - 10m, 0.1 s - 1 giorno)**

In questa scala sono osservabili i processi di interazione tra il fondale ed i sedimenti, da cui ha origine il trasporto solido.

Dal punto di vista morfologico, il fondale non appare piano, ma presenta una serie di *forme di fondo*, cioè asperità ed increspature, che prendono il nome di *ripples* o di *dune* al crescere delle loro dimensioni.

La conformazione del fondale, e il comportamento dello strato limite nelle sue immediate vicinanze costituiscono oggetto costante di ricerca, in quanto la loro descrizione consente di definire in maniera precisa i meccanismi che danno luogo al trasporto di materiale.

▪ **Processi su media scala (1 m - 10 km, 1 giorno - 1 anno)**

In questa scala viene esaminata la propagazione del moto ondoso, la circolazione idrica nella fascia litoranea e le variazioni di batimetria dei fondali dovute al trasporto solido.

Circa la propagazione del moto ondoso, bisogna considerare i fenomeni di rifrazione e shoaling, dovuti alla diminuzione di profondità, la diffrazione e la riflessione, che intervengono in presenza di ostacoli, ed infine il frangimento.

Successivamente, si determina la circolazione idrica nella *surf zone*, che ha come immediato effetto il trasporto dei sedimenti. Una volta quantificato il trasporto, si determina la variazione nella batimetria, la quale a sua volta modifica l'idrodinamica; il processo va avanti fino al raggiungimento di una condizione di equilibrio, ove questo sia possibile.

▪ **Processi su larga scala (1 km- 100 km, 1 mese- decenni)**

In questa scala viene analizzato il comportamento nel lungo periodo di estesi tratti di costa, che in letteratura è indicato con la sigla LSCB (*Large Scale Coastal Behavior*).

I modelli su larga scala vengono sviluppati integrando quelli su piccola e media scala. A partire da una morfologia nota, vengono imposte delle condizioni “forzanti” (moto ondoso, correnti, apporti fluviali, presenza di opere, etc.) e viene ricavata una nuova configurazione.

L'osservazione su larga scala è importante dal punto di vista economico e sociale, e costituisce un efficace strumento per una corretta pianificazione nell'uso delle coste. In questa scala vengono inglobati anche altri fattori

responsabili dell'evoluzione delle coste, ai fini di una valutazione globale della risposta dell'ambiente alle sollecitazioni esterne.

Questa classificazione mette in evidenza la reciproca interconnessione dei vari fenomeni: ciò che avviene su larga scala modifica le condizioni in cui si sviluppano i processi in scala intermedia, che a loro volta, fanno sentire il loro effetto fino alle scale più piccole (fig. 1.1).

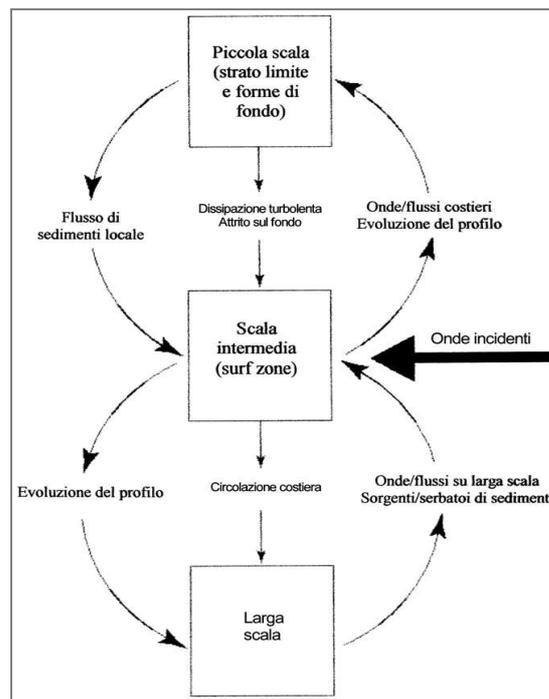


Figura 1.1- Rappresentazione schematica dei processi a scala piccola, larga e intermedia.

1.1.2 Strumenti di indagine

Per lo studio e la previsione dei numerosi fenomeni coinvolti nel processo evolutivo di un litorale, gli strumenti a disposizione dell'ingegneria costiera sono tre:

1. Osservazioni *in situ*
2. Modelli fisici
3. Modelli matematici

È importante sottolineare che la scelta di uno di questi strumenti non necessariamente esclude gli altri, anzi, è auspicabile che siano usati congiuntamente, per meglio sfruttarne le caratteristiche, che vengono illustrate di seguito.

1) Osservazioni in situ

L'osservazione sul campo del fenomeno così come avviene in natura è lo strumento di conoscenza più antico, e anche il più valido dal punto di vista concettuale, in quanto si può descrivere il processo senza la limitazione di dovere ricorrere a schematizzazioni.

Le informazioni che si possono ricavare sono sia di tipo qualitativo (utili come supporto allo sviluppo di modelli) sia quantitativo. Sotto questo ultimo aspetto, le misure *in situ* costituiscono uno strumento indispensabile per ottenere informazioni quali il valore di una portata, il clima meteo-marino e le caratteristiche dei sedimenti di spiaggia.

Tuttavia, le osservazioni sul campo sono costose rispetto ai modelli, e la loro interpretazione può risultare complicata, se i fenomeni coinvolti sono molto complessi. A ciò si devono aggiungere le difficoltà operative legate allo stato del mare, all'acquisizione dei dati e al funzionamento degli strumenti, che in certe situazioni condizionano pesantemente la scelta di questo tipo di indagine.

Il principale utilizzo delle osservazioni sul campo è come supporto per l'acquisizione di dati, che vengono poi utilizzati nella modellistica fisica e matematica.

2) Modelli fisici

I modelli fisici sono la riproduzione in laboratorio di un fenomeno naturale, che viene simulato in scala ridotta. Rispetto all'osservazione sul campo, di cui costituisce una diretta filiazione, la modellistica fisica ha il vantaggio di potere costruire artificialmente condizioni che in natura non esistono variando la geometria e le forze in gioco.

Questo strumento di indagine è importante quando i processi coinvolti, a causa della loro complessità, non si prestano ad una agevole schematizzazione matematica; inoltre, costituiscono spesso uno strumento di conferma e di taratura dei risultati forniti dai modelli matematici.

Di contro, i modelli fisici presentano difficoltà di vario tipo, che possono essere tutte ricondotte all'incapacità di riprodurre esattamente in laboratorio le condizioni presenti in natura. Questi inconvenienti prendono il nome di *effetti di scala* e di *effetti di laboratorio*.

Gli *effetti di scala* nascono nei modelli a scala ridotta quando non è possibile scalare tutte le grandezze significative in maniera corretta tra il prototipo e il modello. Un tipico esempio è costituito dalle forze viscosive, che sono di solito più grandi nel modello che nella realtà.

Gli *effetti di laboratorio* sono causati dal fatto che un'installazione sperimentale non è in grado di riprodurre le stesse condizioni fisiche presenti in natura. Il modello costituisce necessariamente una riproduzione schematica di un fenomeno molto più complesso.

Spesso non sono presenti nel modello tutte le condizioni al contorno presenti in natura; basti pensare alla presenza del vento, che in natura può generare una significativa circolazione idrica, assente in un modello in cui viene simulata l'azione del solo moto ondoso.

Infine, bisogna considerare che i modelli fisici sono di solito più costosi dei modelli matematici, che vengono preferiti ogni volta che i risultati forniti appaiono accettabili. L'uso congiunto di modelli fisici e matematici dà luogo ai cosiddetti "modelli ibridi" (Hughes 1993) in cui il modello fisico è usato congiuntamente al modello matematico, laddove quest'ultimo non riesce a dare una descrizione sufficientemente accurata.

3) *Modelli matematici*

I modelli matematici descrivono un fenomeno attraverso equazioni che legano tra loro le varie grandezze fisiche coinvolte. Le equazioni scritte sulla base di considerazioni di carattere teorico e sperimentale, si basano su principi fisici fondamentali quali la conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia. Formulando determinate ipotesi, i principi fondamentali vengono tradotti in equazioni o sistemi di equazioni, alle quali si associano opportune condizioni al contorno.

A seconda che si pervenga ad una soluzione in forma chiusa o si risolvano le equazioni per via numerica, si individuano rispettivamente, i *modelli analitici* e i *modelli numerici*. Questi ultimi, che in molti casi rappresentano praticamente l'unica soluzione, hanno avuto un grande sviluppo recentemente, di pari passo con l'aumento della capacità di calcolo e di memoria dei calcolatori, tanto da essere considerati di gran lunga lo strumento di studio più conveniente.

La formulazione teorica e lo sviluppo di modelli matematici rappresentano un compromesso tra due esigenze opposte: da un lato, si vuole che il modello descriva i fenomeni nel modo più accurato possibile, se pur con un crescente numero di equazioni e una crescente complessità, dall'altro bisogna semplificare al massimo le equazioni per permetterne la risoluzione. D'altra parte, questo problema si presenta anche per i modelli fisici, e in generale ogni volta che si deve riprodurre la realtà mediante una sua rappresentazione schematica.

1.1.3 Modellistica fisica

Per la descrizione dell'evoluzione di un litorale, inizialmente è necessaria l'acquisizione dei dati relativi alla distribuzione delle correnti ed alla circolazione idrica sotto costa, successivamente la valutazione dell'effetto delle correnti sul materiale granulare del fondale, ed infine la sua redistribuzione, che determina le modificazioni morfologiche, quindi può essere utile suddividere i modelli in tre famiglie:

- Modelli idrodinamici
- Modelli di trasporto solido
- Modelli di morfologia costiera

Alla base dello studio di qualsiasi fenomeno fisico si pongono i concetti di unità di misura e di dimensioni, la dimensione di una grandezza fisica rappresenta un concetto astratto, come la lunghezza, la massa, il tempo, la forza ecc., a cui viene assegnata una determinata unità di misura.

A seconda del sistema di misura utilizzato, alcune grandezze vengono considerate fondamentali, altre derivate dalle precedenti.

Nel Sistema Internazionale, che utilizza come grandezze fondamentali la lunghezza (L), la massa (M) e il tempo (T), a cui corrispondono le unità di misura metro, chilogrammo, secondo, le dimensioni di tutte le grandezze meccaniche possono essere espresse in termini monomi, come prodotto delle tre grandezze fondamentali elevate ad un opportuno esponente, secondo la formula:

$$[a] = L^\alpha T^\beta M^\gamma$$

In funzione del valore degli esponenti si possono individuare tre tipi di grandezze:

- Grandezza geometrica: $\alpha \neq 0, \beta = 0, \gamma = 0$
- Grandezza cinematica: $\alpha \neq 0, \beta \neq 0, \gamma = 0$
- Grandezza dinamica: $\alpha \neq 0, \beta \neq 0, \gamma \neq 0$

Nel caso in cui $\alpha = \beta = \gamma = 0$ la grandezza è adimensionale, ed il suo valore è indipendente dal sistema di unità di misura scelto.

Quando si vuole descrivere un fenomeno fisico, bisogna in primo luogo stabilire le grandezze significative, e successivamente le relazioni funzionali tra queste.

L'analisi dimensionale è una procedura per combinare le variabili di un fenomeno fisico in modo da creare dei prodotti adimensionali; ottenendo così un minor numero di variabili in gioco ed equazioni dimensionalmente omogenee, la cui forma non dipende dal sistema di unità di misura adottato (Langhaar 1951).

E' sempre conveniente utilizzare relazioni omogenee, in quanto, in caso contrario, si rende necessario inserire dei coefficienti dimensionali il cui valore dipende dalle unità di misura, con difficoltà sia in termini di comprensione del fenomeno, sia di utilizzo pratico delle equazioni.

Un insieme di prodotti adimensionali si dice *completo*, quando ogni prodotto dell'insieme è indipendente dagli altri e tutti gli altri possibili prodotti che possono essere formati con le variabili in gioco possono essere espressi come monomi in cui compaiono i prodotti originali dell'insieme.

In sostanza, una volta individuato un insieme completo di prodotti adimensionali, il fenomeno fisico è completamente descritto da relazioni funzionali tra queste variabili fondamentali.

1.2 Scale fondamentali

Per definizione un modello fisico è la rappresentazione semplificata in scala di un processo o di un evento del mondo reale (indicato come *prototipo*), ciò significa che il passaggio dal prototipo al modello fisico è regolato da opportune scale, cioè da particolari relazioni che consentono la riproduzione del prototipo in dimensioni diverse rispetto a quelle reali.

Le scale fondamentali adottate in un modello fisico sono definite nel modo seguente:

- scala delle lunghezze: $\lambda_L = \frac{L_m}{L_p}$
- scala dei tempi: $\lambda_T = \frac{T_m}{T_p}$
- scala delle masse: $\lambda_M = \frac{M_m}{M_p}$

dove i pedici m e p indicano che la grandezza si riferisce rispettivamente al modello e al prototipo.

A seconda della scala conservata tra prototipo e modello, un modello fisico si definisce:

- \Rightarrow *Geometricamente simile*, se si verifica la validità di λ_L ; due sistemi sono geometricamente simili se possono essere ricondotti ad una posizione parallela (omologa) e quindi se il rapporto di due dimensioni nel modello conduce allo stesso valore del rapporto nel prototipo:

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix}_m = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix}_p$$

⇒ *Cinematicamente simile*, se sono verificate entrambe le scale λ_L e λ_T ; questo implica che nei due sistemi particelle omologhe sono in punti omologhi ad istanti omologhi; questo implica che il rapporto tra le velocità (o le accelerazioni) per due punti nel modello è uguale al rapporto tra le stesse grandezze per i corrispondenti punti nel prototipo:

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix}_m = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix}_p \quad \text{e} \quad \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}_m = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}_p$$

La similitudine cinematica può esistere solo nel caso in cui sia soddisfatta la similitudine geometrica (eccetto nei casi in cui siano presenti effetti di scala);

⇒ *Dinamicamente simile*, se per i due sistemi (prototipo e modello) le masse di tutti gli elementi corrispondenti (geometricamente simili), in tutti i tempi corrispondenti sono correlate tra loro dalla stessa costante di proporzionalità λ_M ; dunque, questo tipo di similitudine esiste nel caso in cui il rapporto tra le forze che agiscono su due punti nel modello è lo stesso che si ottiene per le forze che agiscono sui punti corrispondenti del prototipo:

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix}_m = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix}_p$$

Strettamente correlata ai concetti sopra esposti è la classificazione in:

- * Modello iconico, se mantiene una somiglianza geometrica con l'originale, anche se questo risulta ridotto o distorto;
- * Modello analogico, se tale somiglianza manca, perché il modello corrisponde al reale, utilizzando un'analogia tra le leggi che governano il fenomeno da riprodurre ed il modello.

Se le scale delle lunghezze verticali e di quelle orizzontali (nei modelli bidimensionali) sono uguali o diverse, si parla rispettivamente di:

- * Modello indistorto, se il rapporto di scala fra le lunghezze verticali è uguale a quello delle lunghezze orizzontali;

- * Modello distorto, se il rapporto di scala fra le lunghezze verticali è diverso da quello delle lunghezze orizzontali.

Infine, in ingegneria costiera si parla comunemente di due tipi di modellazione:

- * Modelli a fondo fisso, importanti per gli studi di propagazione dell'onda e delle correnti;
- * Modelli a fondo mobile, importanti per lo studio della deposizione e del trasporto dei sedimenti.

La definizione delle scale per un particolare fenomeno fisico viene svolta tenendo conto che di solito nei modelli idraulici esistono alcuni vincoli, di natura fisica, tecnica e/o economica, i quali contribuiscono alla generazione degli effetti di scala:

- 1) Innanzi tutto esiste una restrizione fisica intrinseca nel fatto che l'accelerazione gravitazionale non è riproducibile in scala, in quanto risulta avere la stessa intensità sia nel prototipo che nel modello; ne consegue che il fattore di conversione per questa grandezza risulterà assumere valore unitario: $\lambda_g = 1$
- 2) inoltre per ragioni tecniche ed economiche, nei comuni modelli idraulici il fluido è acqua sia nel prototipo che nel modello, dal momento che un modello idraulico necessita di grandi quantità di fluido e l'unico fluido economicamente utilizzabile è proprio l'acqua; avviene, quindi, che parametri quali la densità e la viscosità cinematica risultano scalati con una scala unitaria: $\lambda_{\rho_f} = \lambda_{\mu} = \lambda_{\nu} = 1$
- 3) infine nasce un problema sulla scala dei sedimenti; infatti, diventando i sedimenti significativamente più piccoli nel modello rispetto alla loro dimensione nel prototipo, le loro proprietà cambiano e possono generare pesanti effetti di scala: per esempi, aumenta la coesione e quindi varia la loro risposta alla sollecitazione del moto ondoso.

1.3 Criteri di similitudine

Scelti i fenomeni da riprodurre, è necessario definire il criterio di similitudine da seguire, cioè la legge di riduzione in scala che lega la grandezza del modello a quella corrispondente del sistema reale.

Dato che teoricamente un modello fisico dovrebbe essere una perfetta riproduzione del prototipo, prima della sua realizzazione è necessario affrontare i seguenti problemi:

- * la scelta delle più opportune scale di riduzione, tali da garantire la similitudine dinamica, e quindi una corretta riproduzione delle condizioni idrodinamiche dei fenomeni idraulici di propagazione dell'onda;
- * la corretta riproduzione dell'inizio del movimento;
- * la scelta del tipo di materiale da utilizzare nel modello.

Non esistono delle regole generali per la realizzazione di un modello, la scelta di quest'ultimo, infatti, si basa unicamente sull'insieme delle conoscenze fisiche acquisite e sulle misure sperimentali, quindi varia con l'evolversi delle nozioni e delle tecnologie.

Un ruolo importante nella definizione dei criteri di similitudine, è quello svolto dall'analisi dimensionale, tutte le principali grandezze coinvolte dovrebbero essere in proporzione nel passaggio dall'originale al modello, tale proporzione è espressa dal fattore di scala:

$$N_x = X_p / X_m$$

in cui X_p è il valore di X nel prototipo e X_m nel modello.

Le condizioni per il rispetto della similitudine dinamica in un fluido sono date dalla seconda legge di Newton:

$$\sum_n F_n = m \frac{dV}{dT}$$

che può essere scritta come:

$$F_i = F_g + F_\mu + F_\sigma + F_e + F_{pr}$$

in cui:

- F_i : sono le forze inerziali (massa · accelerazione);
- F_g : sono le forze gravitazionali;
- F_μ : sono le forze viscosive;
- F_σ : sono le forze di tensione superficiale;
- F_e : sono le forze elastiche;
- F_{pr} : sono le forze di pressione.

In termini di fattori di scala, la condizione di similitudine meccanica si esprime:

$$N_{Fi} = N_{Fg} = N_{F\mu} = N_{F\sigma} = N_{Fe} = N_{Fp}$$

Nella pratica, questa condizione non è mai verificata nei modelli in scala ridotta, infatti, dal momento che gli esperimenti sono condotti sotto l'effetto del campo gravitazionale terrestre, che è lo stesso nel prototipo e nel modello, per conseguire la similitudine bisognerebbe poter variare, in funzione del fattore di scala geometrico, la viscosità e la densità del fluido utilizzato in modello, soluzione che appare impraticabile.

Ne consegue che nessun modello idraulico soddisfa la similitudine meccanica. Di conseguenza, l'obiettivo principale di chi affronta un problema di modellistica fisica è fare in modo che sia rispettata la similitudine per le forze più importanti, valutando l'effetto del mancato rispetto delle altre condizioni.

Anche se la similitudine meccanica non può essere conseguita, esistono in idraulica numerosi criteri per la modellazione, ciascuno dei quali basato su opportune ipotesi semplificatrici.

Il concetto base è che la maggior parte dei problemi può essere schematizzata secondo l'ipotesi che due forze risultano prevalenti rispetto alle altre; pertanto una volta riconosciute, con l'ausilio di strumenti teorici, le due forze fondamentali, si può realizzare il modello limitando la similitudine a queste sole grandezze.

In ogni fenomeno sono sempre presenti le forze inerziali, che vengono bilanciate dalle altre forze di diversa natura; tra queste, quelle che si incontrano nella quasi totalità dei casi riguardanti l'ingegneria costiera possono limitarsi alle forze viscosi e a quelle gravitazionali.

Le forze in gioco possono essere espresse in termini dimensionali nel modo seguente:

- Forze inerziali = massa · accelerazione = $(\rho L^3)(V^2/L)$
- Forze gravitazionali = massa · accelerazione gravitazionale = $\rho L^3 g$
- Forze viscosi = viscosità · (velocità/distanza) · area = $\mu(V/L)L^2 = \mu VL$

in cui:

- ρ : è la densità del liquido;
- L : è una lunghezza caratteristica;
- V : è la velocità;
- g : è l'accelerazione gravitazionale;
- μ : è la viscosità dinamica.

A seconda di quali forze risultano prevalenti tra le forze gravitazionali e quelle viscosse, si hanno i due fondamentali criteri di similitudine idraulica di Froude e di Reynolds.

1.3.1 Similitudine di Froude

Il numero adimensionale che esprime la radice quadrata del rapporto tra le forze inerziali e gravitazionali costituisce un parametro di fondamentale importanza in idraulica, e prende il nome di numero di Froude:

$$Fr = \sqrt{\frac{\rho L^2 V^2}{\rho L^3 g}} = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

Questo criterio di similitudine consiste nel mantenere costante, nel passaggio dal prototipo al modello, il numero di Froude, e quindi si presta a descrivere tutti i processi in cui le forze gravitazionali risultano prevalenti. Questo è il caso della maggior parte dei moti a pelo libero, e quindi è il più utilizzato nella modellistica costiera.

L'imposizione della condizione:

$$N_{Fr} = \frac{N_V}{\sqrt{N_g N_L}} = \frac{N_L}{N_T \sqrt{N_g N_L}} = 1$$

comporta che, una volta assegnato il fattore di scala N_L nell'ipotesi in cui si utilizzi acqua nel modello, rimanendo ovviamente costante l'accelerazione di gravità, risultano determinati tutti gli altri fattori di scala. In particolare, per i tempi vale la relazione:

$$N_T = \sqrt{N_L}$$

1.3.2 Similitudine di Reynolds

Il numero di Reynolds è il parametro adimensionale che esprime il rapporto tra le forze inerziali e quelle viscosi:

$$\text{Re} = \frac{\rho L^2 V^2}{\mu V L} = \frac{\rho L V}{\mu}$$

La similitudine di Reynolds consiste nel conservare costante questo parametro, e pertanto è efficace nella descrizione di tutti i fenomeni in cui la viscosità gioca un ruolo dominante; come per la similitudine di Froude, si può far vedere che l'imposizione della condizione:

$$N_{\text{Re}} = \frac{N_\rho N_L N_V}{N_\mu} = \frac{N_\rho N_L N_L}{N_\mu N_T} = 1$$

comporta, nell'ipotesi di uso dello stesso liquido e di g costante:

$$N_T = N_L^2$$

La similitudine di Reynolds è utilizzata molto raramente nella modellistica costiera, in quanto le forze gravitazionali sono di gran lunga prevalenti nei moti a superficie libera; inoltre, nei pochi casi in cui il moto non è a pelo libero (ad esempio, il moto di filtrazione attraverso i pori di una scogliera) i numeri di Reynolds in gioco sono elevati, per cui l'effetto della turbolenza prevale sulla viscosità.

1.4 Modelli idrodinamici Short Waves

Esistono due tipi fondamentali di modelli per i processi costieri:

- Modelli a fondo fisso
- Modelli a fondo mobile

Nei modelli a fondo fisso si studiano esclusivamente i processi idrodinamici, mentre i modelli a fondo mobile, cioè con il fondale costituito da materiale sciolto, servono a studiare l'interazione tra il campo di moto e i sedimenti, e valutare l'evoluzione morfologica della costa.

Nell'ambito dei modelli a fondo fisso (denominati comunemente modelli idrodinamici) si distinguono, a seconda del periodo del moto, due grandi tipologie (Dalrymple 1985):

1. *Short waves* (periodi dell'ordine di 1-20 s)
2. *Long waves* (periodi dell'ordine di minuti-giorni)

I principali fenomeni legati alla propagazione del moto ondoso rientrano nella categoria delle *short waves*, su cui si concentrerà l'attenzione di questo studio. I modelli di *long waves* studiano l'effetto di maree, tsunami, ed altri fenomeni di lungo periodo, date le notevoli dimensioni richieste per la simulazione di questi processi, unitamente ad un grande sviluppo delle potenzialità dei modelli matematici, l'interesse dei ricercatori verso questo tipo di indagine è minore.

Infine, un'ulteriore distinzione va fatta tra i modelli bidimensionali e quelli tridimensionali. I primi sono realizzati in canali, e si basano sull'assunzione di un moto ondoso prevalentemente ortogonale alla costa, batimetrie regolari, ed in genere in tutti i problemi in cui si può ipotizzare una simmetria piana. I secondi, realizzati in vasche, descrivono condizioni di moto proveniente da più direzioni, nelle condizioni più generali, e permettono di descrivere la morfodinamica di tratti estesi di costa.

1.4.1 Campi di applicazione

I campi di applicazione dei modelli *short waves* coprono una vasta gamma di fenomeni di interesse per l'ingegneria costiera, e possono sinteticamente essere elencati nel modo seguente (Hughes 1993):

- Cinematica del moto ondoso (2D e 3D)
- Shoaling (2D e 3D)
- Rifrazione (3D)
- Diffrazione (3D)
- Riflessione e trasmissione del moto ondoso (2D e 3D)
- Frangimento (2D e 3D)
- Caratteristiche non lineari del moto ondoso (2D e 3D)
- Interazione onde-correnti (2D e 3D)
- Innalzamento del pelo libero in zona frangente, *run-up* (2D e 3D)
- Studio dello strato limite e della turbolenza (2D e 3D)

1.4.2 Effetti di scala

Gli effetti di scala nei modelli basati sulla similitudine di Froude nascono dall'assunto che la gravità è la forza predominante, e che si possono ritenere secondarie le altre forze. Questa condizione può essere verificata in natura, ma poiché le forze viscosive, elastiche, la tensione superficiale etc. non sono scalate correttamente, queste possono diventare importanti nel modello a scala ridotta.

Varie soluzioni teoriche sui rapporti di scala sono state proposte per eliminare questi effetti (Costa 1990), ma la loro pratica applicazione risulta eccessivamente onerosa. Pertanto, l'interesse della ricerca è stato finora volto alla quantificazione esatta degli effetti di scala che intervengono nei vari fenomeni studiati. Una volta individuato e quantificato l'errore, attraverso metodi empirici o teorici è possibile correggerlo e fornire un risultato aderente alla realtà.

1.4.3 Effetti di laboratorio

Uno dei principali effetti di laboratorio è provocato dalle dimensioni finite dell'installazione, che è necessariamente delimitata da pareti impermeabili, sulle quali si possono verificare fenomeni indesiderati di riflessione.

La riflessione sulle pareti laterali di un canale provoca una indesiderata componente trasversale di moto ondoso, mentre nelle vasche tridimensionali altera la circolazione idrica; inoltre la riflessione sulla parete opposta a quella dove viene simulata la linea di riva amplifica il moto ondoso incidente e dà luogo ad una situazione innaturale. Questi effetti vengono attenuati attraverso vari accorgimenti che tendono ad attenuare la riflessione sulle pareti, oppure eseguendo gli esperimenti come una successione di piccoli impulsi di durata talmente breve che le onde riflesse non hanno il tempo di alterare il campo di moto incidente.

Altri effetti laboratorio sono legati alla difficoltà di riprodurre tutte le forze presenti in natura, ricorrendo ad una loro schematizzazione, ed alle difficoltà nella simulazione del moto ondoso incidente. Queste incertezze sono analoghe a quelle che si presentano nella modellistica matematica quando si deve ridurre un fenomeno all'interazione di forze da rappresentare mediante equazioni schematiche.

2. Concetti di idrodinamica costiera: interazione delle onde con le strutture costiere

2.1 Trasmissione, riflessione e frangimento

Quando un'onda frange su una scogliera, parte della sua energia viene dissipata e la quantità di moto trasferita al di là dell'ostacolo è nettamente inferiore a quella dell'onda incidente (Calabrese et al. 2006). Il coefficiente di trasmissione K_t è definito come il rapporto tra l'altezza d'onda trasmessa e l'altezza d'onda incidente:

$$K_t = \frac{H_t}{H_i}$$

Tale rapporto può variare tra 0 e 1, dove al valore zero corrisponde una scogliera alta ed impermeabile e al valore uno, la condizione di scogliera assente. Sostanzialmente K_t rappresenta la quantità d'energia ondosa incidente trasferita al di sopra e attraverso le scogliere frangiflutti.

I fattori che influenzano maggiormente il coefficiente di trasmissione, sono: l'inclinazione della struttura, la larghezza e l'altezza della cresta, la permeabilità della scogliera e quindi i materiali che la costituiscono (fig. 2.1).

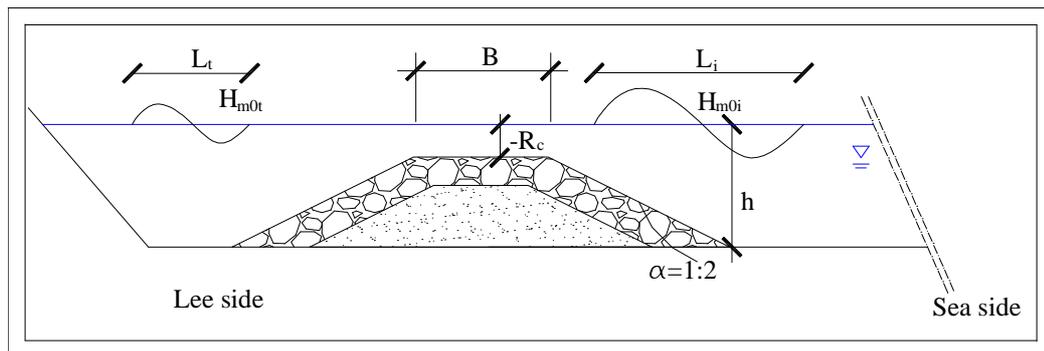


Figura 2.1- Parametri progettuali e terminologia adottata.

Nel corso degli anni si è cercato di trovare una formula adatta a definire il coefficiente di trasmissione.

La prima equazione proposta in ordine di tempo fra quelle considerate per il calcolo di K_t è quella ricavata da *Van der Meer* (1990), che propone una relazione lineare fra la

sommergenza R_c adimensionalizzata rispetto all'altezza d'onda incidente, H_{m0i} ed il coefficiente di trasmissione.

$$K_t = -0.30 \frac{R_c}{H_{m0i}} + 0.46 \quad (1)$$

I limiti di applicazione sono dati da: $0.1 \leq K_t \leq 0.8$

Van der Meer and Daemen (1994) introducono una relazione che considera anche altri parametri quali la larghezza di berma e la ripidità fittizia dell'onda incidente rendendoli dimensionali con il diametro caratteristico (eq.2).

$$K_t = a \frac{R_c}{D_{50}} + b \quad (2)$$

dove a è un coefficiente dipendente dall'altezza d'onda relativa: H_{m0i}/D_{50} :

$$a = 0.0031 \frac{H_{m0i}}{D_{50}} - 0.24$$

e b è il coefficiente di trasmissione per strutture non emerse ($R_c=0$) dipendente dall'altezza d'onda relativa, dalla larghezza della berma e dal periodo di picco dell'onda incidente (S_{op} è la ripidità di picco ed è espressa come $S_{op} = 2\pi H_{m0i}/gT_p^2$):

$$b = -5.42 \cdot S_{op} + 0.00323 \frac{H_{m0i}}{D_{50}} - 0.0017 \left(\frac{B}{D_{50}} \right)^{1.84} + 0.51$$

I limiti di applicazione sono dati da:

- $1 < H_{m0i}/D_{50} \leq 6$
- $0.01 \leq S_{op} \leq 0.05$
- $0.075 \leq K_t \leq 0.75$

La formula di *Van der Meer and Daemen* si adatta abbastanza bene ai dati sperimentali, ma non è adatta per strutture che abbiano permeabilità nulla.

D'Angremond et al. (1996) apportano ulteriori modifiche alla relazione eliminando dall'analisi dei dati, i test con onde molto ripide e strutture molto sommerse:

$$K_t = -0.4 \frac{R_c}{H_{m0i}} + 0.64 \left(\frac{B}{H_{m0i}} \right)^{-0.31} \cdot (1 - e^{-0.5\zeta_{0p}}) \cdot c \quad (3)$$

dove $\zeta_{0p} = \tan\alpha / (S_{0p})^{0.5}$ è il parametro di Iribarren, e ϵ è un coefficiente pari a 0.8 per scogliere impermeabili e a 0.64 per scogliere permeabili.

L'equazione 3 è applicabile a strutture sommerse e debolmente emerse ed è stata calibrata su un database dove B/H_{m0i} è compreso tra 0.37 e 43.48, ma l'80% delle strutture avevano $B/H_{m0i} \leq 4$.

I limiti per una sua applicazione sono definiti dalle seguenti condizioni:

- $0.075 \leq K_t \leq 0.8$
- $S_{0p} < 0.6$
- $H_{m0i}/h \leq 0.54$

Inoltre l'equazione di D'Angremond et al. è proposta per il caso di onde non frangenti, e dato il limitato numero di prove su scogliere a cresta molto larga sono necessarie ulteriori verifiche sperimentali in tale range.

Calabrese et al. (2002) mostrano che l'utilizzo di tale equazione, anche nel caso di onde frangenti, fornisce dei coefficienti di trasmissione in buon accordo con le misure sperimentali; *Van der Meer et al.* (2005), evidenziano che l'eq.3 fornisce una stima sufficientemente accurata per $B/H_{m0i} < 10$, mentre tende a sovrastimare sistematicamente la trasmissione al crescere del parametro, segno che la relazione funzionale tra i parametri caratteristici del fenomeno non è corretta.

Per porre rimedio, volendo ancora mantenere la stessa relazione, propongono di dividere in due il campo di applicazione (per $B/H_{m0i} < 10$ e per $B/H_{m0i} \geq 10$), utilizzando per la prima zona, quella di D'Angremond et al. (1996) e per la seconda una ricalibrazione della stessa (eq.4).

Si osserva che per tale campo, il database raccolto dagli autori contiene sia scogliere emerse che sommerse, quindi l'eq.4 è applicabile per entrambi i casi; questo approccio porta ad avere una discontinuità nella previsione di K_t , quando $B/H_{m0i} = 10$ che gli autori propongono di risolvere inserendo un terzo campo di applicazione della formula per $8 \leq B/H_{m0i} \leq 12$ in cui interpolare i valori delle equazioni 3 e 4.

$$K_t = -0.35 \frac{R_c}{H_{m0i}} + 0.51 \left(\frac{B}{H_{m0i}} \right)^{0.65} (1 - e^{-0.41 \zeta_{0p}}) \quad (4)$$

Il limite superiore dell'eq.4 per la stima di K_t dipende linearmente dalla larghezza di berma, mentre il limite inferiore è stato fissato a 0.05 che è un valore associabile a strutture emerse nel database da loro utilizzato (*Van der Meer et al.* 2005).

Per scegliere sommerse un'equazione specifica è quella di *Seabrook and Hall* (1998), che invece è stata sviluppata su un database che comprende scogliere la cui larghezza di cresta B è stata fatta variare uniformemente in un ampio intervallo.

$$K_t = 1 - \left[e^{\left(-0.65 \left| \frac{R_c}{H_{m0i}} \right| - 1.09 \left(\frac{H_{m0i}}{B} \right) \right)} + 0.047 \left| \frac{BR_c}{D_{50}L} \right| - 0.067 \left| \frac{H_{m0i}R_c}{D_{50}B} \right| \right] \quad (5)$$

dove:

- R_c/H_{m0i} , equivale alla quota di cresta relativa alla formula di Van der Meer (1990);
- B/H_{m0i} , corrisponde alla larghezza relativa di cresta della formula di D'Angremond et al. (1996);
- $R_c*H_{m0i}/B*D_{50}$, è un rapporto che rappresenta la quantità di energia dissipata per attrito;
- $B*R_c/L*D_{50}$, rappresenta le perdite di carico associate al flusso idrico all'interno della scogliera.

Calabrese et al. (2002) presentano una nuova formula riportata in eq.6. L'espressione è basata su esperimenti a grande scala condotti su due scogliere una delle quali ha larghezza di berma quadrupla rispetto all'altra e sono stati testati 5 livelli idrici in modo da avere la cresta lievemente emersa o sommersa. Le strutture sono state sottoposte a 5 diversi attacchi ondosi irregolari prevalentemente caratterizzati da frangimento prima della struttura.

$$K_t = a \frac{R_c}{B} + b \quad (6)$$

dove:

$$a = \left(0.6957 \frac{H_{m0i}}{h} - 0.7021 \right) e^{0.2568 \left(\frac{B}{H_{m0i}} \right)}$$

$$b = \left(1 - 0.562 e^{-0.0507 \xi} \right) e^{-0.0845 \frac{B}{H_{m0i}}}$$

ed i limiti di applicazione sono:

- $-0.4 \leq R_c/B \leq 0.3$
- $1.06 \leq B/H_{m0i} \leq 8.13$
- $0.31 \leq H_{m0i}/h \leq 0.61$
- $3.0 \leq \xi_{0p} \leq 5.2$

Vista la tendenza attuale ad utilizzare sempre più spesso le scogliere sommerse, con l'esigenza quindi di realizzare strutture con berma molto larga, le equazioni esistenti per il calcolo di K_r non risultano particolarmente indicate ai fini progettuali perché basate prevalentemente su modelli sperimentali di scogliere a cresta stretta.

Sono necessarie ulteriori verifiche su dati sperimentali di strutture a cresta larga, sia per verificare se l'applicazione delle formule esistenti sia ancora possibile che per sviluppare nuove equazioni.

2.2 Water set-up indotto dalle scogliere

Le scogliere frangiflutti hanno la funzione fondamentale di ridurre l'energia del moto ondoso prima che arrivi ad attaccare il litorale.

Le onde provenienti dal largo e che vanno ad incidere sulla scogliera, trasferiscono verso riva masse di acqua che oltrepassano l'ostacolo, l'eccesso di acqua tende poi a tornare verso il largo attraverso i varchi tra le scogliere o per filtrazione attraverso le scogliere stesse se sufficientemente permeabili, ma tale flusso è ostacolato dal moto ondoso incidente e dalla presenza della struttura.

Affinché si mantenga un equilibrio con trasferimento nullo di massa liquida tra l'esterno e l'interno della scogliera frangiflutti è inevitabile la formazione di un accumulo d'acqua a tergo della struttura con un conseguente aumento del livello del mare, tale fenomeno prende il nome di *Set-up*.

Il ($\Delta\delta$) (o *Piling-up*) indotto dalle scogliere, è un fenomeno strettamente dipendente dalle portate entranti e dalle resistenze associate ai flussi di ritorno ed è definito dall'equazione sotto indicata e schematizzato in figura 2.2 :

$$\Delta\delta = \eta_1 - \eta_2$$

con:

- η_1 variazione del livello d'acqua a tergo della struttura;
- η_2 variazione del livello d'acqua davanti alla struttura.

Da recenti analisi (*Murphy 1996; Van der Biezen 1998; Browder 1997*) emerge che il Set-up indotto dalla messa in opera di strutture tracimabili, sia sommerse, che leggermente emerse, sia un fenomeno che porta alla generazione di correnti parallele alla linea di riva

che contribuiscono in modo negativo alla mobilitazione di materiale verso il mare aperto (*offshore*) incrementando, anziché riducendo, il fenomeno erosivo di un litorale.

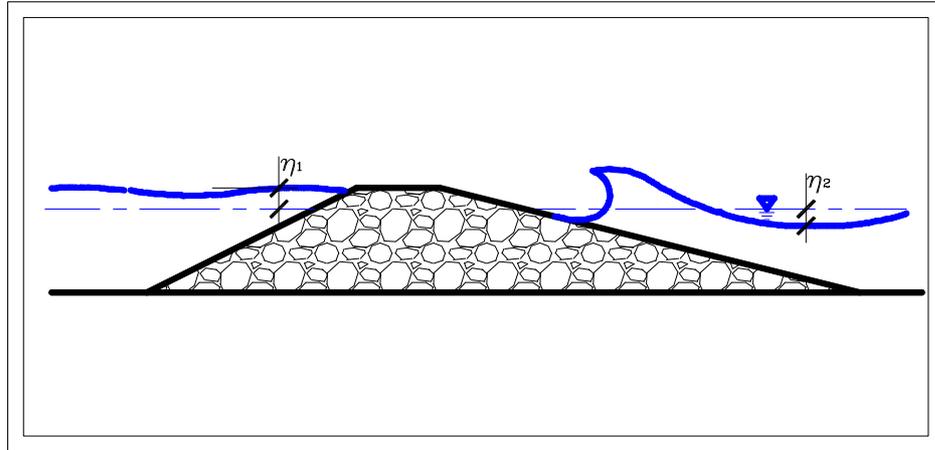


Figura 2.2 -Schematizzazione della variazione del livello idrico nella zona compresa tra una scogliera e la linea di riva.

Per progettare scogliere con design adeguati in grado di minimizzare gli inconvenienti citati è necessario comprendere bene i meccanismi che sono alla base di tali eventi.

Il fenomeno del set-up pur avendo un'importante influenza sull'efficacia delle scogliere frangiflutti, è stato finora poco studiato e non ancora ben compreso.

Per una scogliera sommersa, ove non sia considerato il frangimento, la prima soluzione analitica per il calcolo del piling-up fu fornita da *Longuet-Higgins* (1967), trascurando il fenomeno del frangimento.

La seguente espressione, ottenuta impostando il bilancio del flusso della quantità di moto sotto il pelo libero idraulico, rappresenta la somma tra il *Set-up* atteso a tergo della scogliera ed il *Set-down* atteso a fronte:

$$\Delta\delta = \frac{H_T^2 \cdot k_1}{8 \cdot \text{senb}(2 \cdot k_1 \cdot d_1)} - \frac{H_I^2 \cdot k_2}{8 \cdot \text{senb}(2 \cdot k_2 \cdot d_2)} \quad (7)$$

con:

- H_I , altezza d'onda trasmessa;
- H_T^2 , quadrato della somma delle altezze d'onda incidente e riflessa;
- k_1 , numero d'onda davanti la scogliera;
- k_2 , numero d'onda dietro la scogliera;
- d_1 , profondità dell'acqua davanti la scogliera;
- d_2 , profondità dell'acqua dietro la scogliera.

In una serie di risultati sperimentali del Set-up per una scogliera rettangolare impermeabile, Dick (1968) verificò che l'equazione di Longuet-Higgins sottostimava fortemente i valori ottenuti sul modello.

Successivamente furono effettuati ulteriori studi concernenti il Set-up attraverso l'analisi del fenomeno su un modello fisico 2D di una scogliera di tipo trapezoidale (Diskin, 1970). Diskin ipotizzò che gli unici parametri che regolavano la formazione del sovrizzo idrico a tergo della scogliera fossero:

- * H_i , altezza d'onda incidente sulla struttura;
- * R , sommergenza della struttura.

La relazione sperimentale proposta fu la seguente (fig. 2.3):

$$\frac{\Delta\delta}{H_i} = 0.60 \cdot \exp \left[- \left(0.70 - \frac{R}{H_i} \right)^2 \right] \quad (8)$$

valida in un range di sommergenza relativa: $-2 < \frac{R}{H_i} < 1.5$

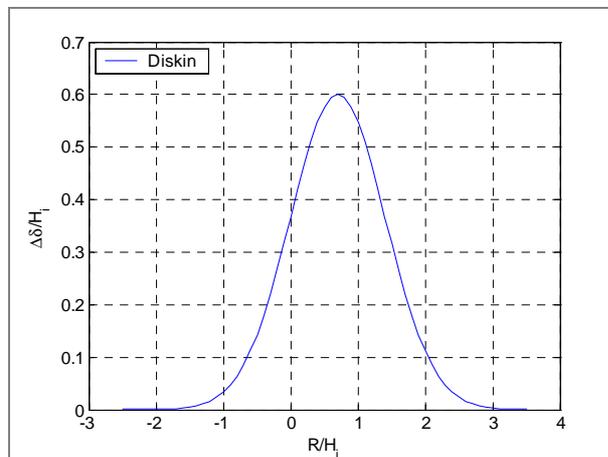


Figura 2.3 - Andamento del Piling-up in funzione della sommergenza relativa secondo la soluzione analitica di Diskin.

La formula mostra come il set-up aumenti all'aumentare dell'onda incidente e come, per una data altezza d'onda, raggiunga il valore massimo in corrispondenza di una altezza del pelo libero dell'acqua, appena sotto la cresta della scogliera, ovvero per $R = 0.7H_i$.

Per valori del livello del mare inferiori o superiori a questo discriminante, si osserva una diminuzione degli effetti del piling-up, che tende alla diminuzione fino all'annullamento totale.

Quanto emerge dalla formula di Diskin è chiaramente verificabile dalla valenza che la sommergenza di una struttura ha per i fenomeni di tracimazione e filtrazione: è evidente che scogliere molto emerse non consentendo all'onda di tracimare impediscono la formazione di un sovrizzo idrico. Analogamente scogliere molto sommerse non costituendo un valido ostacolo al flusso di ritorno dell'acqua verso il largo (*offshore*), non consentono anch'esse la formazione di un sovrizzo idrico.

La formula proposta da Diskin, tuttavia, non tiene di conto dell'influenza di parametri quali la larghezza di cresta della struttura (B_c) ed il periodo dell'onda (T_p). Inoltre non è presente alcuna considerazione sulla dipendenza dalla permeabilità della scogliera, dal momento che Diskin svolse i suoi esperimenti con massi aventi tutti la medesima dimensione.

Attraverso lo studio di un numero elevato di sezioni trasversali di frangiflutti permeabili, *Dean et al.* (1997) rilevarono la possibilità di un incremento del livello idrico a tergo della struttura dovuto al diminuire della sommergenza, fino ad un massimo dove l'elevazione della cresta della struttura sopra il livello medio dell'acqua risulta essere approssimativamente $0.7H_s$.

Per strutture con altezze di cresta maggiori, il livello dell'acqua decresce fino a zero ad un'elevazione di 1.5 volte l'altezza dell'onda sopra il livello medio dell'acqua. Nel caso di un frangiflutti sommerso e dotato di varchi che possano permettere all'acqua trasportata sopra la cresta di defluire verso il largo, viene ad imporsi la presenza di un flusso in direzione parallela alla costa che terminerà il suo viaggio non appena incontrerà una via di fuga. Questo studio ha identificato due significativi meccanismi:

- * il valore assunto dall'altezza di una scogliera frangiflutti, permette un flusso elevato di acqua sopra la cresta, qualora fosse ridotta, dettando le condizioni per l'instaurarsi di una corrente litoranea e annullando i benefici di una piccola riduzione dell'altezza d'onda e conseguente erosione della spiaggia;
- * l'importanza degli effetti della distanza da riva della scogliera: dai dati numerici il volume di acqua che oltrepassa la scogliera per *overtopping* è solo in piccola parte influenzato da questo parametro anche se è da sottolineare che comunque le correnti lungo-costa variano in maniera inversamente proporzionale alla distanza da riva.

Successivamente, *Loveless e Debski*, condussero nel 1998 dei test su otto differenti tipologie di scogliere variando dei parametri quali la larghezza della cresta, l'angolo di inclinazione della struttura rivolta verso il mare e modificando in nome della permeabilità le dimensioni dei massi costituenti i modelli studiati.

In questa fase l'attenzione si concentra sul fenomeno del set-up indotto da queste strutture, *Loveless e Debski* presentarono un'analisi teorica per spiegare la presenza di tale fenomeno ed i risultati sperimentali da loro ottenuti confermarono la relazione proposta.

Successivamente sono stati proposti vari altri test, tra i quali la dimostrazione che il Set-up può essere eliminato pompando via l'acqua da dietro la scogliera, e le misure di flusso di velocità netta in direzione *offshore* nel cuore della struttura.

Il sovrizzo a tergo di una scogliera trascinabile, può avere un effetto significativo sull'efficienza della struttura stessa e si crea perché l'onda incidente è maggiore di quella che torna indietro. Questo significa che per ristabilire l'equilibrio è necessario che aumenti il livello del mare a valle del frangiflutti (*inshore*) allo scopo di creare un riflusso maggiore in direzione *offshore* e, se possibile, una corrente lungo-costa dietro la scogliera. Pochi fino al 1998 hanno discusso il fenomeno del sovrizzo creato dai frangiflutti, una comprensione del Set-up e degli altri effetti che produce è essenziale per un corretto disegno di una scogliera distaccata.

Inoltre, con l'evoluzione dei disegni di strutture distaccate, i progettisti hanno provato ad usare scogliere con sempre minor elevazione della cresta, dato che il costo di un sistema di scogliere è proporzionale al volume di roccia per km di costa e quindi lo schema di scogliera più economica minimizza la sua altezza e larghezza, e massimizza la pendenza dei lati.

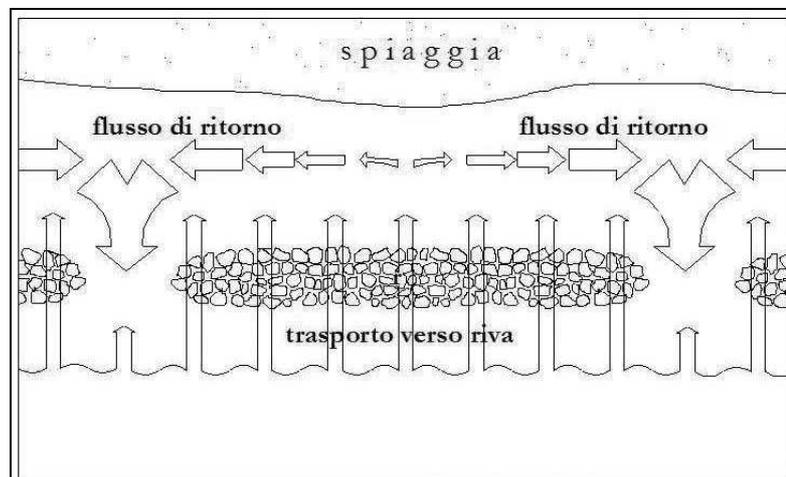


Figura 2.4 - Schema dell'interazione onde-struttura in corrispondenza di una scogliera trascinabile.

L'esperienza precedente di altri ricercatori (*Murphy, 1996, Van der Biezen 1998*) e di ingegneri costieri (*Browder et al. 1997*) nell'investigare o disegnare scogliere distaccate a cresta bassa o sommerse, ha rilevato che queste strutture producono larghe correnti lungo riva che possono incrementare l'erosione invece di ridurla (fig. 2.4).

Molti di questi ricercatori non sono del tutto d'accordo con l'uso di scogliere distaccate, secondo *Loveless et al.* le correnti litoranee sono dovute principalmente al fenomeno del set-up e solo dopo aver identificato il meccanismo, che ne governa la generazione, sarà possibile progettare opere che lo minimizzano, eliminando le conseguenze che favoriscono l'erosione della spiaggia.

Dagli studi di *Loveless et al (1998)* è stato appurato come la formula di *Diskin* fosse in grado di stimare con una certa accuratezza il valore del set-up nel caso di scogliere sommerse ($R < 0$) mentre sovrastima abbondantemente i dati sperimentali nel caso di scogliere emerse ($R > 0$). Questo aspetto è attribuito alla diversa permeabilità utilizzata in quanto il modello proposto da *Diskin* era caratterizzato da un diametro medio minore del 40% del più piccolo dei modelli di *Loveless*, un fattore che si presume non abbia influenza nel caso di strutture sommerse, ma che costituisca invece un vincolo sul comportamento di quelle emerse.

I risultati di questa ricerca hanno mostrato che l'ampiezza del set-up è massima quando la sommergenza, R_s , è zero, cioè quando la cresta della scogliera è al pari del livello medio marino. L'eccesso di flusso deve essere riportato *offshore* anche attraverso la struttura (se è permeabile) o sopra (se è sommersa) o intorno ai suoi estremi (se ha dei varchi) o come combinazione di questi tre percorsi di flusso.

In successivi studi condotti da *Loveless et al.* nel 1998 su scogliere trapezoidali distaccate in canale 2D, il potenziale livello massimo di set-up non si verifica poiché è decrementato dalla corrente di ricircolo in 3D: una nuovo approccio in cui è prevista l'installazione di una pompa dietro la struttura nel canale, in modo da poter ottenere una relazione tra la quantità di acqua pompata e la riduzione di set-up.

Essendo le velocità di ritorno al di sopra e per filtrazione attraverso la scogliera, minori se rapportate a quelle in ingresso, un trasferimento netto di acqua alla zona a valle rispetto alla scogliera sarà un fattore inevitabile e responsabile della resistenza al flusso che l'acqua nel suo percorso di ritorno incontrerà.

Secondo *Loveless et al.* il volume di flusso di andata e di ritorno, in metà periodo di un'onda progressiva, è pari a $HL/\pi T$.

La scogliera oppone una maggiore resistenza al flusso di ritorno più che al flusso sopra di essa. Quindi c'è un flusso in entrata netto che deve essere bilanciato (in 2D) da un set-up del livello dell'acqua dietro la scogliera.

Se la resistenza è prevalentemente turbolenta (considerando sia le barre che le scogliere), allora il piling-up, $\Delta\delta$, dovrà essere proporzionale a u_0^2 , dove u_0 è la media della velocità di smaltimento del set-up in direzione *offshore*.

Essendo h la profondità dell'acqua allora segue che:

$$\Delta\delta \propto \left[\frac{H_i L_i}{bT} \right]^2$$

La resistenza sul flusso è drasticamente ridotta quando la scogliera è sommersa, quindi la sommergenza relativa R/h_s sarà un'importante variabile e poiché la resistenza del flusso dentro la scogliera è funzione del D_{50} , la dimensione dei massi (e quindi la permeabilità della struttura) influenzerà il set-up.

Se il piling-up è adimensionalizzato tramite la larghezza della berma, B , si ha un gradiente idraulico $\Delta\delta/B$ che è correlato ad u_0 dalle medie dell'equazione di Forcheimer. Da tutte le considerazioni fatte, Loveless ha proposto la seguente formula:

$$\frac{\Delta\delta}{B} = \frac{\left(\frac{H_i \cdot L_i}{b \cdot T} \right)^2}{8 \cdot g \cdot D_{50}} \cdot e^{-20 \left(\frac{R}{b_s} \right)^2} \quad (9)$$

Con:

- $\Delta\delta$, piling-up o set-up;
- H_i , altezza dell'onda incidente;
- L_i , lunghezza d'onda incidente;
- T , periodo d'onda;
- R , sommergenza della scogliera;
- h , profondità d'acqua al piede della struttura;
- h_s , altezza della struttura;
- D_{50} , diametro nominale degli elementi della struttura;
- B , larghezza della berma;
- g , accelerazione di gravità..

In figura 2.5 è rappresentato l'andamento del piling-up proposto da Loveless, adimensionalizzato con la larghezza di berma, in funzione della sommergenza relativa: Dai risultati dei test è stato ricavato un grafico del livello di set-up rispetto alle altezze d'onda incidenti, per vari livelli dell'acqua (e quindi di sommergenza della scogliera).

Il massimo set-up è stato rilevato per un livello di acqua appena al di sotto della berma della scogliera. Per un'onda regolare di 3.0 m il set-up massimo (a pompa spenta) è di 1.0 m (scala prototipo). Gli autori hanno dimostrato che il set-up è influenzato dalla larghezza della berma e generalmente è maggiore quando questa è più larga.

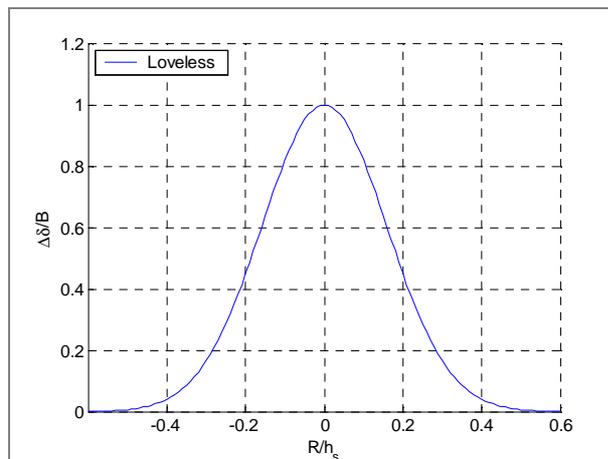


Figura 2.5 - Andamento del Piling-up in funzione della sommergenza relativa secondo la soluzione analitica di Loveless.

È possibile affermare che la verificabilità questi valori di set-up sia osservabile solamente nei casi in cui non sia possibile rilevare aumenti di livello dovuti alle correnti o ad altri fattori, tipico di una situazione bidimensionale. In caso invece di simulazione tridimensionale il set-up è frequentemente dissipato nella trasformazione in correnti marine così che in molti casi si ha un valore sottostimato di questo fenomeno.

Inoltre il set-up indotto dal frangimento del moto ondoso produce il movimento di masse d'acqua dal settore difeso dalla scogliera frangiflutti, verso il settore non protetto (*offshore*); il sistema viene chiuso da correnti presenti nella zona offshore che compensano il tutto.

La conoscenza di questi sistemi dinamici che vengono a crearsi intorno alle strutture di protezione della zona onshore, è molto importante sotto tanti punti di vista:

- le correnti rappresentano fonti di pericolo per i bagnanti;

- il trasporto dei sedimenti indotto dalle correnti determina l'erosione e la sedimentazione;
- le aree di erosione generalmente localizzate vicino alle strutture possono causarne l'instabilità.

Negli ultimi anni, sono stati eseguiti molti studi con l'intento di determinare, con metodi numerici, le correnti litoranee (in 3 dimensioni) intorno alle scogliere emerse o sommerse.

In situazioni puramente bidimensionali, cioè in esperimenti in canale effettuati senza ricircolo della portata tracimante, il sovrizzo misurato è molto più alto che in situazioni tridimensionali, dove il sovrizzo è dissipato dalla generazione di forti correnti.

In altre parole in un canale ad onde chiuso, le masse di acqua che passano sopra la scogliera ad ogni cresta dell'onda, devono ritornare indietro o riversandosi sopra la struttura o attraverso di essa, e questo richiede una consistente differenza di altezza. Invece in un sistema aperto, dove l'acqua può ritornare al mare piuttosto liberamente lungo percorsi differenti che sopra o attraverso la struttura, questo non accade.

In ogni caso tutti i fattori che generano il sovrizzo sono presenti anche in una situazione tridimensionale e se convertiti in correnti possono dare luogo a fenomeni di erosione e scalzamento al piede della scogliera provocandone l'instabilità.

Un'informazione complementare necessaria è fornita dall'analisi della portata d'*overtopping* libera (ottenuta con il *set-up* dell'onda pari a zero), che insieme a quella del *set-up* potenziale dell'onda facilita la comprensione del comportamento delle soglie (*reefs*) e delle scogliere sommerse in un sistema naturale.

Tirindelli et al. nel 2001, in seguito ad alcuni esperimenti, osservano sul fenomeno del frangimento e sul piling-up indotto dalle portate d'acqua che oltrepassano la struttura, un conseguente aumento del flusso medio di ritorno verso il largo, fino all'instaurarsi di una situazione di equilibrio dinamico, evidenziando tra l'altro le situazioni in cui tutto ciò è particolarmente evidente:

- un'area dove le opere sommerse chiudono una vasca formata da due pennelli consecutivi;
- una scogliera parallela alla spiaggia di una certa lunghezza in modo che il flusso nella sua sezione centrale ha divergenza nulla.

Dagli esperimenti i suddetti autori hanno concluso che il piling-up è influenzato dall'altezza d'onda e non in maniera rilevante dal periodo d'onda.

In figura 2.7 è riportata l'evoluzione nel tempo dell'entità del piling-up dall'inizio dell'attacco ondoso, calcolato come la differenza di livello dell'acqua rilevata da due sonde poste rispettivamente a monte e a valle della scogliera.

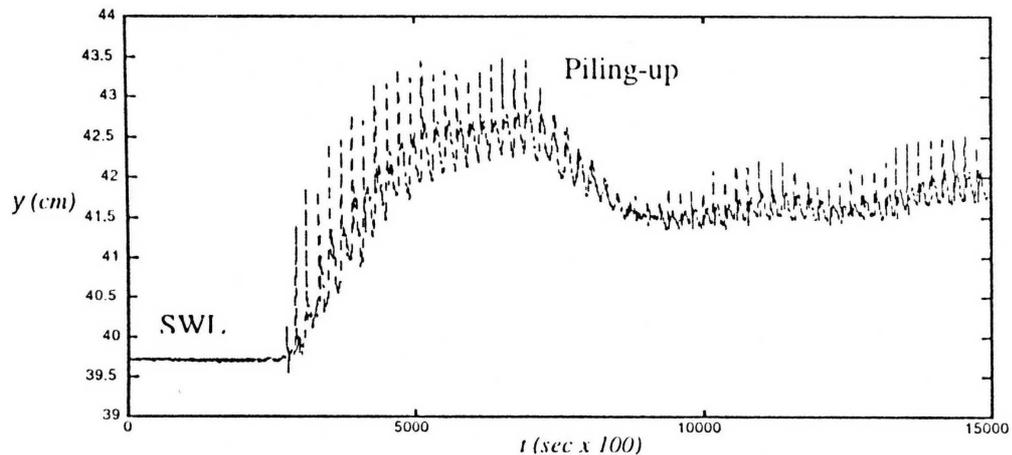


Figura 2.6 - Evoluzione del Piling-up nel tempo (Tirindelli et al. 2001).

2.3 Overtopping

Un fenomeno rilevante che interessa principalmente le opere a cresta bassa è l'overtopping, termine che in italiano può essere tradotto come tracimazione dell'onda, con la quale s'intende la portata di acqua che oltrepassa la cresta di un'opera.

Questo fenomeno, a lungo erroneamente trascurato nella progettazione delle strutture di protezione, sta assumendo sempre maggiore importanza a causa dell'intensificazione delle mareggiate e dell'innalzamento del livello marino.

Negli ultimi anni, infatti, sono sempre più frequenti i danneggiamenti alle imbarcazioni all'interno dei porti a causa dei processi di tracimazione delle onde al di là dell'opere di protezione e non meno rilevanti risultano i danni arrecati a strade, ferrovie e abitazioni costruite lungo i litorali.

Stimare la portata di tracimazione per un'opera di difesa del litorale costituisce, quindi, un obiettivo primario per un'adeguata interpretazione del comportamento di tale opera e di conseguenza per una migliore progettazione.

In letteratura con portata di tracimazione Q_T sono indicate grandezze legate a fenomenologie diverse; in questo lavoro con Q_T si individua la quantità di acqua che

oltrepassa (dal largo verso riva) la scogliera per effetto del moto ondoso nel dominio del tempo.

La portata di tracimazione è la somma di due contributi (almeno per scogliere emerse e a freeboard nullo) (fig. 2.8):

$$Q_T = Q_{OV} + Q_{IN}$$

con

- Q_{OV} , portata di *overtopping*, cioè la Q che passa sopra la struttura;
- Q_{IN} , portata di filtrazione attraverso la struttura verso riva.

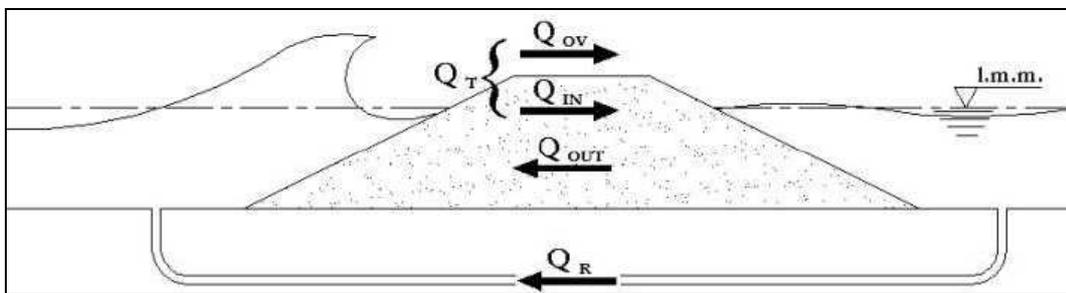


Figura 2.7 - Sezione di una scogliera frangiflutti e flussi presenti attorno ad essa (Q_R rappresenta il flusso che viene a crearsi attraverso i varchi (Ruol 2003).

Q_R rappresenta il flusso che in conseguenza del sovrizzo idrico viene a crearsi attraverso i varchi presenti tra le scogliere espresso dalla relazione sotto indicata e riproducibile in un modello 2D mediante un sistema di pompaggio a ricircolo forzato.

$$Q_R = Q_T + Q_{OUT}$$

Nei modelli bidimensionali dotati di un sistema di ricircolo, il massimo *sovrizzo* è ottenuto con il sistema di pompaggio non attivo, per il quale Q_R ha valore nullo, condizione che simula il caso di scogliera infinitamente lunga.

Per contro, il caso di scogliera posta tra varchi infinitamente estesi è riproducibile imponendo una portata di ricircolo per la quale si realizza un sovrizzo idrico nullo. Da osservare a tal proposito che tale condizione è l'unica che consente di stimare con buona approssimazione la portata di tracimazione Q_T per un certo spettro d'onda, considerando ovviamente che non vi sia filtrazione verso il largo (ossia $Q_{out} = 0$).

La durata complessiva del fenomeno dell'*overtopping* e il volume totale di acqua tracimata sono la somma della durata e del volume tracimato per ogni singola onda; questa osservazione è alla base della relazione tra *portata media* di *overtopping* q , *volume medio* di tracimazione V_{ovt} , *periodo medio* delle onde T_m e *probabilità* di *overtopping* P_{ovt} , data

dal rapporto tra il *numero delle onde* che tracimano N_{out} e il numero di onde riconoscibili N_w .

$$q = \frac{\sum_{onde} Volumi}{\sum_{onde} Periodi} = \frac{N_{out}}{N_w} \cdot \frac{V}{T} = P_{out} \cdot \frac{V_{out}}{T_m}$$

Per onde regolari: $P_{out} = 0$ se $R_u \leq R_c$; $P_{out} = 1$ se $R_u > R_c$;

dove R_u indica la risalita dell'onda e R_c il bordo libero della struttura, cioè l'altezza della cresta rispetto al livello medio del mare.

Per onde irregolari, per il calcolo della risalita dell'onda in presenza di strutture permeabili, irregolari, in massi, viene adottata una distribuzione di Weibull, con parametri k_1 e k_2 legati alle caratteristiche delle onde incidenti e alla pendenza del parametro (Van der Meer and Stam, 1992):

$$\Pr ob(R_u \leq z) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{z}{k_1}\right)^{k_2}\right) \Leftrightarrow P_{out} = \exp\left(-\frac{R_c}{k_1}\right)^{k_2} \quad (10)$$

Van der Meer and Janssen (1995), hanno proposto una distribuzione Rayleighiana (con il parametro di forma k_2 costante e il parametro di posizione proporzionale all'altezza d'onda incidente) in presenza di pareti verticali; questa distribuzione comunque approssima piuttosto bene la risalita dell'onda in qualsiasi caso.

La maggior parte delle formule esistenti sul fenomeno dell'overtopping, si applica a opere emerse o scogliere raramente tracimate dalle onde e si fonda su approssimazioni empiriche di dati sperimentali che riguardano diverse tipologie di strutture (impermeabili, a massi verticali e con berma inclinata).

In generale l'overtopping medio per unità di ampiezza della struttura è espresso come funzione dei seguenti parametri standard:

- Altezza della cresta rispetto al livello medio del mare R_c ;
- Altezza significativa dell'onda H_s ;
- Periodo d'onda caratteristica T_m ;
- Propagazione delle onde corte σ ;
- Direzione dell'attacco ondoso rispetto all'asse della struttura β ;
- Profondità dell'acqua di fronte alla struttura;
- Geometria della struttura.

La prima formulazione per la stima della portata di overtopping risale a *Owen* (1980):

$$\frac{q_{ov}}{g \cdot H_i \cdot T} = A \cdot \exp\left(-\frac{B \cdot R}{T \cdot \sqrt{g \cdot H_i}} \cdot \frac{1}{\gamma_r}\right) \quad (11)$$

dove A e B sono coefficienti sperimentali che rendono conto della rugosità e pendenza della struttura e γ_r è il coefficiente riduttivo dipendente dalla rugosità della struttura. Questa formula è valida per un range di: $0.05 < \frac{R_c}{T_m \cdot \sqrt{g H_s}} < 0.30$

Hedges e Reis (1998) hanno analizzato i dati di *Owen* con lo scopo di migliorarne la stima della portata per valori di R_c elevati e prossimi a 0 ottenendo:

$$\frac{q}{\sqrt{g} (CH_s)^3} = a_2 \left(1 - \frac{R_c}{CH_s}\right)^{b_2} \quad (12)$$

dove a_2 e b_2 sono coefficienti di regressione e C collega la massima risalita dell'onda all'altezza incidente significativa ($CH_s = R_{u,max}$); per $R_c > CH_s$ l'overtopping è nullo.

Van der Meer and Janssen (1995) forniscono due diverse formule per il calcolo della stima della portata di tracimazione per le onde di tipo plunging e surging; la portata di overtopping si ottiene come minimo delle due equazioni:

$$\frac{q}{\sqrt{g} \cdot H_i^3} = \frac{0.067}{\sqrt{tg\alpha}} \cdot \gamma_b \cdot \xi_0 \cdot \exp\left[-(5.2 \div 4.7) \cdot \frac{R}{H_i \cdot \xi_0 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_v}\right] \quad (13)$$

$$\frac{q}{\sqrt{g} \cdot H_i^3} = 0.2 \cdot \exp\left[-(2.6 \div 2.3) \cdot \frac{R}{H_i \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta}\right] \quad (14)$$

dove H_i è l'altezza d'onda significativa al piede della diga, $\tan\alpha$ indica la pendenza della struttura, ξ_0 è l'indice di frangimento al piede della diga e γ sono i fattori di riduzione della risalita dell'onda: γ_f per la larghezza della berma, γ_b per la rugosità della struttura, γ_v per l'obliquità dell'attacco ondosso, γ_b in presenza di un muro paraonde.

Dai dati sperimentali ricavati nel 2002, *Ruol* ha proposto una formula per valutare la portata di overtopping:

$$q = 4.2 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(0.8744 \cdot F^*) \quad (15)$$

con:

$$F^* = \frac{R_{n2\%} - R}{H_i}$$

In passato lo studio sulla portata di tracimazione era concentrato solo su dighe, o strutture impermeabili, per questo motivo è facile intuire come per strutture permeabili, le formulazioni esistenti sovrastimino la portata di overtopping.

Ricerche in corso mirano ad una maggiore accuratezza nella stima della portata d'overtopping q_{ov} e ad una più precisa identificazione del legame con i fattori che la controllano; quanto emerso da osservazioni sperimentali indica che sia possibile stimare un'andamento esponenziale della portata di overtopping Q_{ov} in funzione dell'aumento dell'altezza d'onda incidente H_i così come un aumento esponenziale di Q_{ov} sia verificabile al diminuire della larghezza di cresta (anche se ridotto di un ordine di grandezza rispetto alla dipendenza che questo parametro ha nei confronti di H_i).

Ruol et al. 2003 sottolineano dopo prove sperimentali la linearità esistente tra portata di ricircolo e piling-up, così come l'affinità tra il fenomeno appena enunciato e la portata di filtrazione verso il largo.

Come emerge da questi studi (Ruol et al. 2003) il contributo maggiore alla portata di tracimazione è dato dal flusso *inshore* che passa attraverso la porzione emersa della scogliera rispetto alla portata di overtopping.

3. Descrizione e messa appunto dell'apparato sperimentale

3.1 Caratteristiche strutturali del Canale del Laboratorio Costiero di Firenze

La parte sperimentale è stata svolta presso il Laboratorio Costiero (LC) del Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale (DICEA) presso la facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Firenze.

L'attività sperimentale iniziata a Dicembre 2007 ha previsto una prima fase di preparazione e messa a punto del canale e degli strumenti di misura presenti, la ricerca e la selezione dei materiali costituenti le strutture da analizzare e una serie di acquisizioni preliminari per la verifica del corretto funzionamento della strumentazione.

La fase preliminare terminata l'11 Febbraio con la ricerca di moti ondosi da riprodurre, ha dato inizio ad una fase ufficiale di esperimenti, che è stata caratterizzata dall'aver mantenuto alcuni elementi presenti durante la prima sessione di prove (profilo del fondale, granulometria delle strutture, disposizione delle sonde, tipi di onde), ed è consistita in esperimenti su tre tipologie di scogliere frangiflutti, le cui caratteristiche geometriche e strutturali saranno associate agli attacchi ondosi utilizzati, come descritto accuratamente nei prossimi capitoli.



Foto 3.1 - Il canale del Laboratorio Costiero del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università degli Studi di Firenze.

Il canale utilizzato è suddiviso in 37 settori (1.2x0.8x0.8 m) di vetro e acciaio, più due settori iniziali di cemento (foto 3.1) con un fondo costituito da pannelli di cemento fibro-rinforzato precompresso (120x80x2cm) facilmente modificabili nel loro andamento in modo da poter effettuare simulazioni su diversi profili batimetrici.

Ad un'estremità del canale è collocato il generatore di onde costituito da una struttura metallica che sorregge ed assiste al movimento di un battente di area pari alla sezione interna del canale. All'altra estremità è sistemato un diffusore che compie una curva a 180 e raccoglie l'acqua dall'ultimo settore, inviandola ad una tubazione al di sotto del canale che riporta l'acqua in testa ad esso.

Il canale è dotato di un sistema di generazione di onde in grado di simulare stati di mare reali con caratteristiche spettrali assegnate e di un sistema di ricircolo bidirezionale, con una portata massima di 25 l/sec.

3.1.1 Generatore di moto ondoso

Il generatore è costituito da una pala meccanica (foto 3.2) il cui movimento è gestito da un sistema idraulico controllato elettronicamente e da una servo-valvola idraulica collegata al sistema elettronico per assistere il movimento con sistema di retroazione.



Foto 3.2 - Prospetto frontale della parte meccanica del generatore di onde del laboratorio di Idraulica.

La generazione digitale del segnale voluto, avviene mediante un software appositamente sviluppato e dotato d'interfaccia grafica Windows Oriented (Cappietti 2003). Tramite conversione digitale-analogica, il segnale è inviato al sistema di controllo

della pala, mentre l'acquisizione analogica in tempo reale del livello della superficie libera è eseguita attraverso la disposizione di sonde resistive lungo il canale.

Il sistema permette la generazione sia di onde sinusoidali, con periodo e altezza assegnata, che di stati di mare con spettro di energia uguale ad uno teorico scelto tra: Jonswap, Pierson-Moskowitz, Scott, Neuman, Bretschneider, Ochi-Hubble.

Il segnale random generato può essere memorizzato e riutilizzato per riprodurre più di una volta lo stesso stato di mare; una volta acquisito è rielaborato in tempo reale con analisi sia nel dominio della frequenza (analisi spettrale), che nel dominio del tempo (analisi zero-crossing), così da fornire i seguenti parametri caratteristici dell'onda: H_{m0} , $H_{1/3}$, H_{std} , T_p , $T_{1/3}$.

3.1.2 Pompa di retropala

Per permettere lo svuotamento della porzione di canale posizionato dietro il battionde, è utilizzata una pompa (detta “di retropala”) centrifuga (foto 3.3) che aspira l'acqua dalla suddetta area reimmettendola davanti ad esso. La portata d'aspirazione della pompa può essere regolata tramite una valvola in modo da poter fissare il battente idrico dietro il battionde.



Foto 3.3 - Pompa di retropala.

3.1.3 Pompa per il riempimento del canale

Il canale è collegato tramite tubazione in acciaio ad un serbatoio sotterraneo posto nel piazzale adiacente al laboratorio: una valvola a saracinesca (foto 3.4) ed una pompa assiale consentono le operazioni di riempimento e svuotamento senza alcun spreco di acqua.



Foto 3.4 - Valvola a saracinesca.

3.1.4 Sistema di ricircolo

Per simulare la presenza di varchi fra le scogliere, il canale è munito di un sistema di ricircolo bidirezionale nella zona a tergo della struttura (fig. 3.1 e foto 3.5): una pompa centrifuga collegata alla tubazione posta sotto al canale e quattro valvole di apertura/chiusura consentono di governare il sistema.

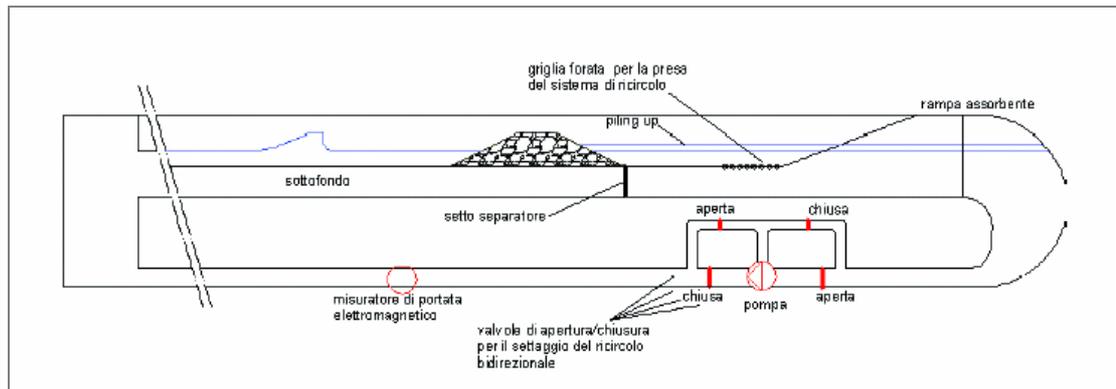


Figura 3.1 - Rappresentazione schematica del sistema di ricircolo.



Foto 3.5 - Particolari del sistema di ricircolo: pompa di aspirazione e valvola di chiusura.

Il setto impermeabile posto sotto la scogliera ha lo scopo di isolare idraulicamente la parte inferiore del canale in modo da poter misurare il sovrizzo che si crea durante una mareggiata. Facendo variare la portata di ricircolo durante gli esperimenti è possibile la misura del piling-up simulando la presenza di varchi nella struttura.

3.2 Strumenti di acquisizione dei dati

La strumentazione presente in laboratorio consente la misura dei livelli idrici lungo il canale per mezzo di sonde resistive e punte idrometriche, inoltre il canale è dotato di un misuratore di portata che consente di conoscere la quantità d'acqua ricircolata dall'apposito sistema prima descritto qualora si necessiti di effettuare delle prove simulando la presenza di varchi nel modello di studio.

3.2.1 Sonde resistive

Le misure dei livelli d'acqua nelle diverse sezioni del canale sono eseguite tramite le sonde resistive, queste sono costituite da un generatore di corrente, alle cui estremità sono collegati due fili conduttori, non in contatto tra di loro, quindi il circuito risulta essere aperto.

Le sonde resistive utilizzate sono definite “mobili” perché in grado di variare la propria condizione d'immersione: un'asta d'acciaio collegata ad un nonio con precisione del decimo di millimetro, e capace di muoversi lungo la verticale tramite un sistema di rotelle dentate, funge da supporto alla sonda e le consente il movimento verticale.

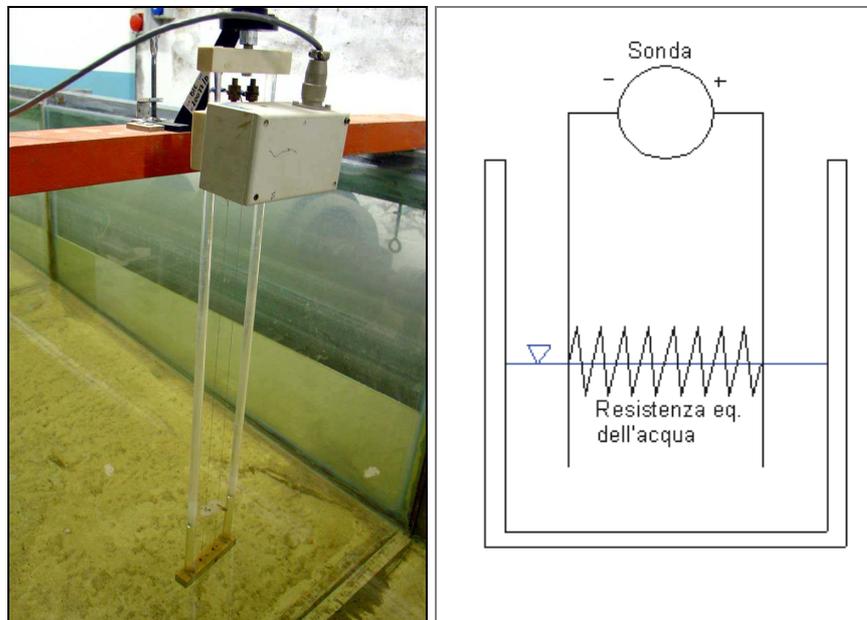


Foto 3.6 - Sonda resistiva e schema elettrico equivalente.

Quando la sonda resistiva è immersa in acqua, il circuito è chiuso (foto 3.6), e si instaura una differenza di potenziale espressa come:

$$\Delta V = R \cdot i$$

in cui i è l'intensità di corrente elettrica, R è la resistenza, (che per un filo è data da $R = \rho \cdot \frac{l}{S}$, dove l è la lunghezza del filo, S è la sua sezione) e ρ è la resistività elettrica ;

Da questa relazione risulta evidente che la differenza di potenziale, misurata da un voltmetro posto nella scatola superiore della sonda, risulta essere proporzionale alla lunghezza della parte di filo immersa, e di conseguenza al livello idrico in canale.

Le sonde forniscono una misura in Volt, con frequenza di acquisizione pari a 20 Hz, cioè ogni cinque centesimi di secondo, tale misura deve essere convertita in unità metriche, tramite una relazione lineare del tipo:

$$\eta = V_0 + kV$$

dove η è la misura dell'oscillazione della superficie libera in centimetri, V è la misura dell'oscillazione della superficie libera in Volt, V_0 è l'intercetta della relazione lineare di conversione in Volt e k è il coefficiente angolare della relazione lineare di conversione.

La linearità delle sonde è verificabile tramite la procedura di calibrazione, operazione eseguita giornalmente per tutta la durata delle prove in canale, e costituita dalle seguenti cinque fasi fondamentali:

1. portare il livello d'acqua in canale a -1 cm rispetto allo SWL prefissato ed attendere il tempo necessario affinché il livello d'acqua si stabilizzi (circa 20 minuti);
2. predisporre il PC per la calibrazione;
3. portare le sonde resistive al livello massimo, attendere il che il livello d'acqua si stabilizzi, dopodichè acquisire i valori forniti dalle sonde;
4. ripetere l'operazione con le sonde posizionate sul livello minimo;
5. ripetere l'operazione con le sonde posizionate sullo 0;

Le sette sonde resistive sono state settate in modo da restituire il solito valore di tensione in corrispondenza di un uguale livello idrico.

Con tale procedimento inoltre la linearità dovrebbe essere assicurata in tutto il range di acquisizione.

La calibrazione delle sonde deve essere ripetuta se l'errore medio risulta maggiore di 0.2 cm. Poiché il coefficiente di correlazione della retta interpolante non è 1, convertendo in centimetri il segnale acquisito in Volt per tre livelli noti, si ottengono valori leggermente diversi rispetto a quelli attesi. La media delle tre differenze fra valori attesi e calcolati, prese in valore assoluto, è definita come errore medio.

Descrizione e messa a punto dell'apparato sperimentale

La profondità d'immersione delle sonde è determinata in base alla profondità del canale, in corrispondenza della posizione di ognuna di esse ed in modo che l'onda più alta rientri all'interno del loro range di acquisizione per evitare che il livello idrico non venga acquisito. Infatti, se l'onda massima fosse troppo ampia, verrebbe acquisito un segnale tagliato (fig. 3.2).

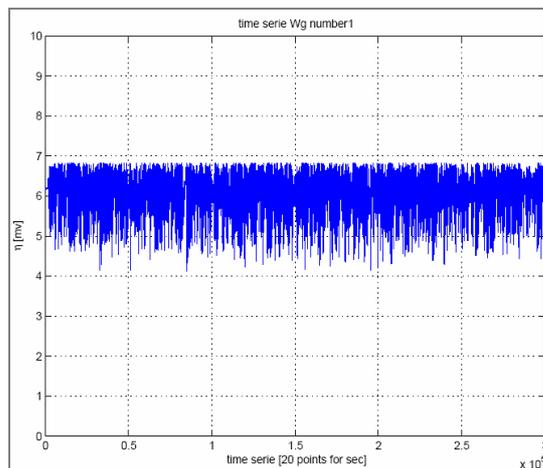


Figura 3.2 - Esempio di segnale “tagliato”.

Una volta deciso il range di taratura ottimale per ogni sonda, questi parametri vengono mantenuti per tutte le prove.

A titolo di esempio si riportano i valori di calibrazione di una giornata tipo (25-02-2008), in cui l'errore medio massimo è circa 1 mm (Tabella 3.1 e fig. 3.3) .

Dopo aver ottenuto i parametri di calibrazione, ovvero i coefficienti di conversione Volt-Cm per il segnale acquisito dalle sonde, tramite elaborazione “Matlab” si ottengono i segnali in cm per tutte le sonde resistive, con una frequenza di 20Hz (fig. 3.4).

Tabella 3.1: Esempio di calibrazione giornaliera sonde mobili (25-02-08).

cm = A * Volt + B				
Posizione	Sonda	A [cm/volt]	B [cm]	Errore [cm]
1	P	8.4698	-25.0649	0.0038
2	Q	4.5374	-22.4602	0.2329
3	F	8.6732	-9.7285	0.0540
4	I	5.6049	-9.3116	0.0996
5	A	4.9105	-10.5953	0.0797
6	M	6.2240	-4.0020	0.0498
7	N	5.7044	-2.7381	0.0266

Descrizione e messa appunto dell'apparato sperimentale

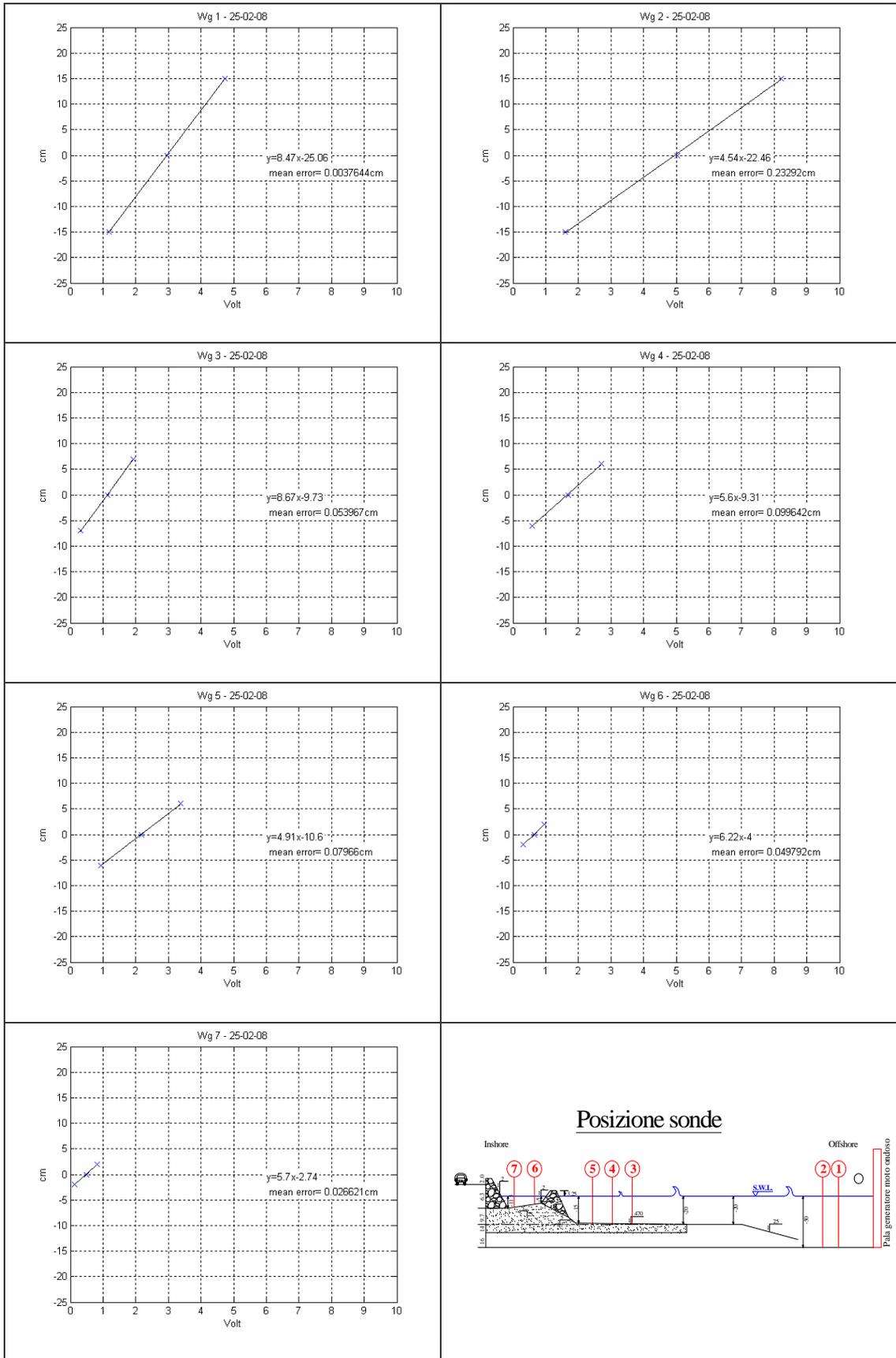


Figura 3.3 - Grafici di calibrazione giornaliera di una giornata tipo (25-02-08).

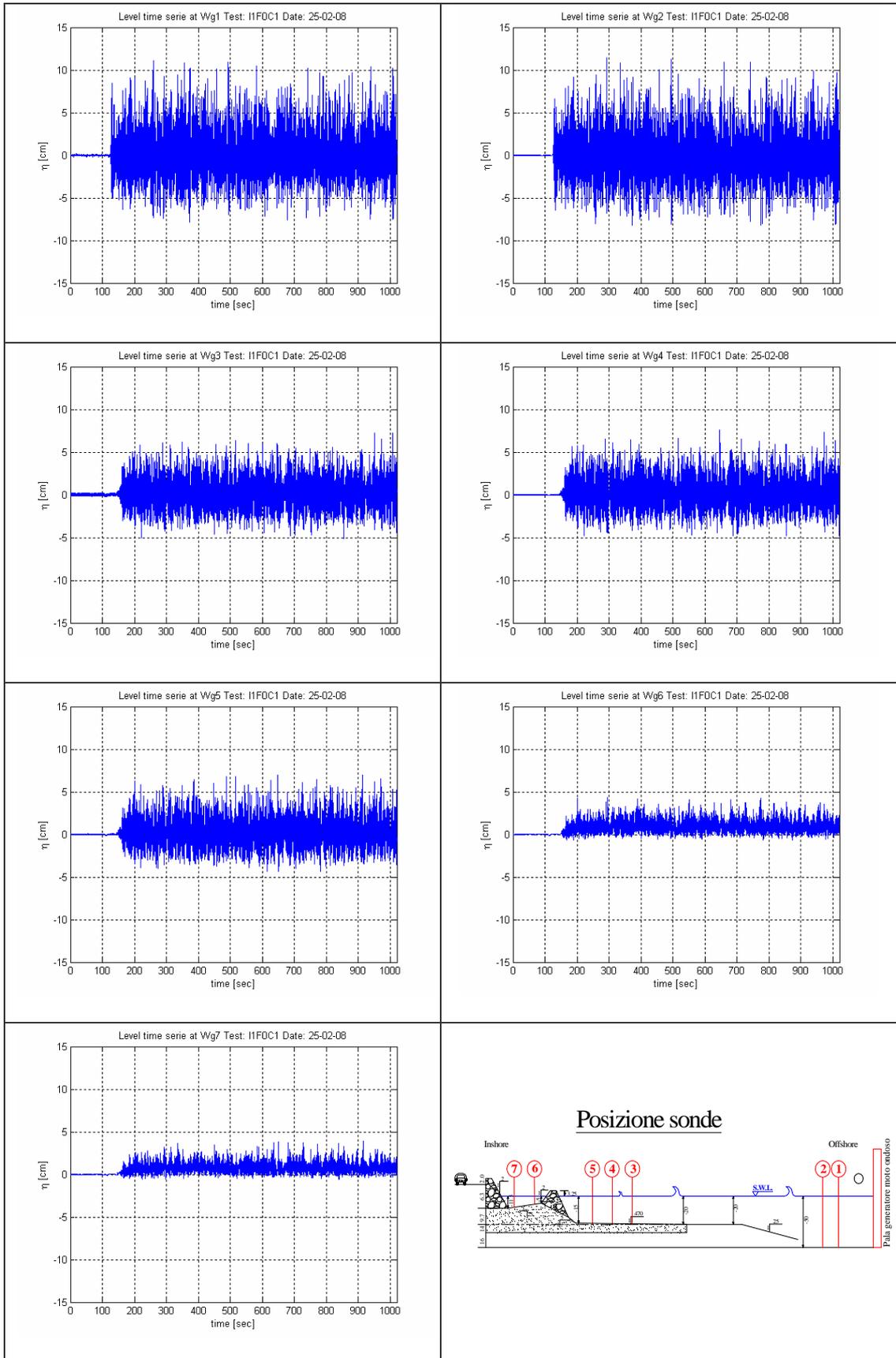


Figura 3.4 - Grafici di calibrazione giornaliera di una giornata tipo (25-02-08).

3.2.2 Punta idrometrica

I livelli d'acqua in fase di riempimento-svuotamento del canale sono determinati utilizzando la punta idrometrica (foto 3.7), ubicata in prossimità del generatore di onde.

Questa, grazie al nonio a cui è collegata, garantisce di apprezzare l'altezza del liquido con un errore di misura non superiore a 0,05 mm.

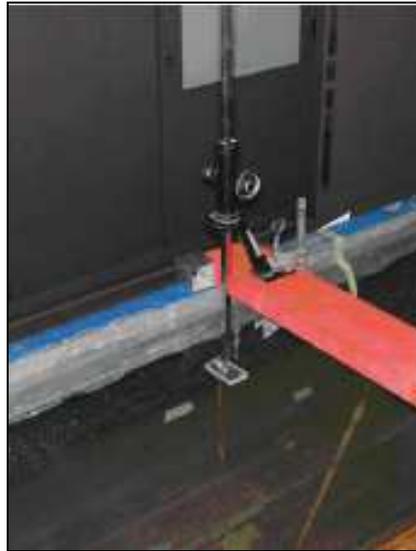


Foto 3.7 - Punta idrometrica.

La misura del livello idrico è determinata facendo scorrere verticalmente la punta idrometrica fino a quando la superficie di separazione liquido-aria, causata dalla tensione superficiale, non viene a contatto con la punta stessa, senza penetrare la superficie. La precisione del livello d'acqua in canale rispetto al livello target è importante per due fattori:

- corrispondenza tra la geometria della configurazione di progetto e quella effettivamente testata;
- ripetibilità dell'attacco ondoso, dato che a livelli differenti, pur mantenendo il solito segnale in ingresso, corrispondono caratteristiche diverse del moto ondoso generato.

In fase di calibrazione la superficie dell'acqua deve essere immobile, e questo è possibile solo con lo spegnimento della pompa di retro-pala. Infatti dato che la pompa di retro-pala serve per lo svuotamento della vasca a tergo del generatore di moto ondoso, l'acqua aspirata ed immessa in testa al canale, crea un'onda parassita ed un aumento del livello idrico in canale (fig. 3.5).

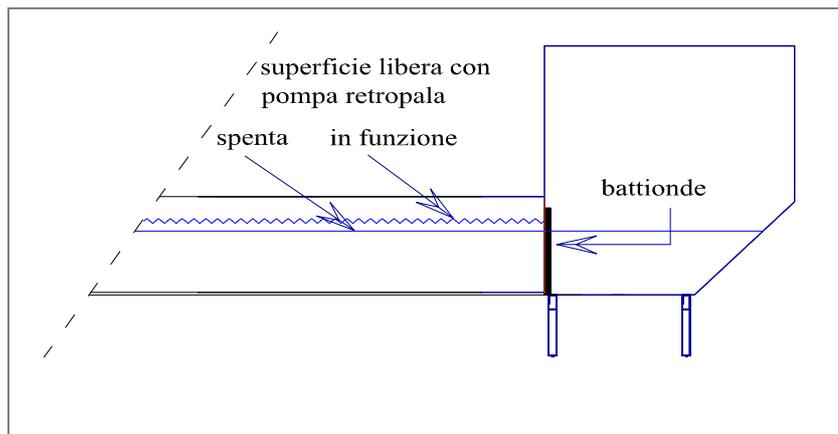


Figura 3.5 - Effetti della pompa retro-pala.

Per stimare l'entità di questa onda parassita e del sovralzato di livello indotto, in passato, sono state effettuate delle prove, acquisendo il segnale per mezz'ora, con la pompa di retro-pala prima spenta e poi accesa.

Questa prova ripetuta per più volte, ha permesso di stimare la differenza media di livello pari a 0.97 m, e accorpata ad un'analisi spettrale ha permesso di valutare la frequenza massima ottenuta alle varie sonde, ed il periodo di picco dell'onda indesiderata.

3.2.3 Misuratore di portata magnetico

Il misuratore di portata magnetico è uno strumento utilizzato per determinare la portata d'acqua nel sistema di ricircolo, che viene regolata nel corso delle singole prove, tramite la modulazione delle valvole.

Il principio di funzionamento del misuratore di portata volumetrica si basa sulla legge induttiva di Faraday-Neuman e sfrutta la conducibilità del fluido. Questo è assimilabile ad un conduttore, che in moto in un campo magnetico B , è soggetto ad una forza elettromotrice indotta U , proporzionale alla velocità media del flusso v :

$$U = B \cdot L \cdot v = L \cdot \overline{B} \times \overline{v}$$

$$Q = v \cdot A$$

dove:

- U è la tensione indotta;
- B è il valore del campo di induzione magnetica;
- L è la lunghezza del conduttore (distanza tra i due elettrodi);

Descrizione e messa appunto dell'apparato sperimentale

- v è la velocità di avanzamento media del fluido;
- A è la sezione trasversale del tubo;
- Q è la portata volumetrica.

Il sistema permette la lettura diretta della portata su un display digitale, (foto 3.8) con la precisione di 0.01 litri/s.



Foto 3.8 - Misuratore di portata magnetico.

4. Caratteristiche generali del litorale pisano

4.1 Clima meteomarinò dell'area in esame

Dato che le condizioni dell'area d'interesse dipendono strettamente da quelle a scala piú ampia, è necessario, prima presentare in maniera sintetica i dati rappresentativi del clima meteomarinò dell'area toscana e dell'Arcipelago, per definirne le caratteristiche essenziali e comprenderne la fenomenologia peculiare, e successivamente descrivere le caratteristiche principali del litorale di Marina di Pisa.

4.1.1 Regime anemologico

L'azione del vento ha un'influenza particolarmente importante sul campo idrodinamico costiero, essa si esplica mediante lo scambio diretto di quantità di moto dall'aria all'acqua, per effetto del cosiddetto "stress da vento".

Il regime anemologico tipico dell'area toscana, è fornito dalle misure effettuate dalla stazione meteorologica di Gorgona, ubicata a 255 m rispetto al l.m.m., mentre l'anemometro è posto alla quota di 10 m.

I dati misurati dalla suddetta stazione meteorologica sono stati successivamente validati attraverso modelli numerici dalla D.E.A.M. srl., e infine rappresentati in maniera grafica (fig. 4.1).

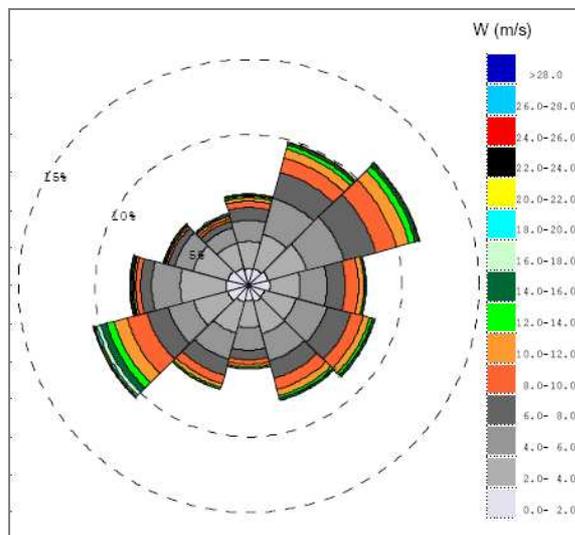


Figura 4.1 - Rosa dei venti ottenuta dalla validazione dei dati registrati della stazione meteorologica di Gorgona (D.E.A.M. srl. Marzo 2006).

L'energia complessiva dell'intensità del vento risulta essere decisamente notevole, a dimostrazione di ciò, i valori massimi di intensità misurati, sono dell'ordine di 26 m/s.

Dal grafico in Figura 4.1, rappresentante la "rosa dei venti", si può osservare che solo il 2.3% delle velocità registrate hanno valori superiori a 14 m/s, (cioè superiori a forza 6 della scala Beaufort¹), mentre solo il 16% di esse hanno valori inferiori ai 2 m/s (scala Beaufort 0-2). Inoltre le direzioni di provenienza principali sono il settore NE, caratterizzato dal 23% circa degli eventi, e l'W-SW per circa il 20% degli eventi.

4.1.2 Clima del moto ondoso

Purtroppo esiste una totale mancanza di misure di moto ondoso lungo la costa toscana: le uniche misure che possono essere utilizzate sono quelle rilevate dall'ondametro direzionale di La Spezia, che fa parte della rete RON (Rete Ondametrica Nazionale). Tale ondametro ubicato in acque profonde alle coordinate 43° 55.7' N, 9° 49.6' E, rileva dati, con frequenza 3-oraria, dal 1989.

Per le misure effettuate dall'ondametro direzionale di La Spezia è disponibile, per l'intero periodo di misura, la serie temporale dei seguenti parametri:

- altezza d'onda H_{m0} ;
- periodo medio T_m ;
- periodo di picco dello spettro T_p ;
- direzione media di provenienza delle onde.

È da sottolineare che l'altezza d'onda fornita non è l'altezza d'onda significativa $H_s = H_{1/3}$, cioè la media del terzo delle altezze d'onda singole più elevate, ma è un'altezza definita come:

$$H_{m0} = 4.004 (m_0)^{0.5}$$

dove m_0 è il momento spettrale di ordine zero, cioè l'area contenuta sotto lo spettro di energia $S(f)$ delle onde, quindi si tratta di una definizione dell'altezza significativa basata sull'energia dello spettro.

L'altezza H_{m0} è approssimativamente uguale ad H_s , ma non lo è per onde ripide o per basse profondità dei fondali.

¹ *Scala Beaufort*: è una scala numerica (da 0 a 12) per la stima dell'intensità del vento basata sullo stato del mare o le condizioni delle onde. Introdotta nel 1805 dall'ammiraglio britannico Francis Beaufort, questa scala fornisce criteri relativamente precisi per quantificare il vento in mare e permettere in tal modo la diffusione di informazioni affidabili e universalmente comprese sulle condizioni di navigazione. Un grado Beaufort corrisponde alla velocità media di un vento pari a 3.6 m/s.

Analogamente, il periodo medio T_m è definito come:

$$T_m = 2\pi(m_0/m_1)$$

dove m_1 è il momento spettrale al primo ordine, da non confondere con il periodo significativo T_s cioè il periodo medio delle onde più alte, quindi associato all'altezza significativa H_s .

Per quanto riguarda il periodo di picco T_p , esso corrisponde al periodo dell'onda a cui è associata la massima energia, ed è definito come:

$$T_p = 1/f_p$$

dove f_p è la frequenza del picco dello spettro.

In figura 4.2, è mostrata la distribuzione direzionale delle altezze d'onda ottenute, come nel caso dei venti, dalla validazione, a cura della D.E.A.M. srl, dei dati misurati dall'ondametro.

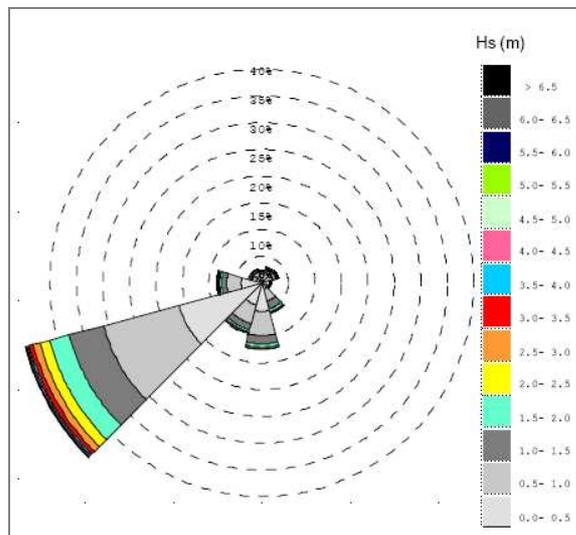


Figura 4.2 - Rosa delle onde ottenuta dalla validazione dei dati registrati dell'ondametro di La Spezia (D.E.A.M. srl. Marzo 2006).

Il settore prevalente è il 240°N, al quale è associato un fetch di lunghezza tale da permettere la formazione di mare completamente sviluppato. Complessivamente l'energia del moto ondoso è notevole, infatti i valori massimi di altezza d'onda sono

elevati e corrispondono a 7 m (corrispondente a mare forza 7 nella scala Douglas² dello stato del mare). La percentuale di eventi con altezza d'onda significativa superiore a 4 m (cioè a forza 6 della scala Douglas) è dello 0.57%, mentre i valori inferiori a 0.5 m (forza 0-2 della scala Douglas) sono dell'ordine del 36%.

Per quanto riguarda la propagazione delle onde dal largo verso acque meno profonde, è importante tenere presente le trasformazioni che esse subiscono, dovute essenzialmente all'effetto del fondale, che inizia ad esplicare la propria azione, quando la profondità dell'acqua diventa circa metà della lunghezza d'onda, instaurandosi così i fenomeni di rifrazione³, shoaling⁴ e di attrito⁵.

L'altezza dell'onda a largo H_0 si modifica continuamente nella sua propagazione verso le acque basse secondo la relazione:

$$H_i = H_0 \cdot K_r \cdot K_s \cdot K_f$$

dove:

- H_i è l'altezza d'onda locale;
- K_r , K_s , K_f , sono rispettivamente i coefficienti di rifrazione, shoaling e attrito.

Infine per quanto riguarda il settore prevalente, cioè quello delle onde da 240°N, viste le caratteristiche batimetriche dell'area, per questa direzione si nota l'influenza delle Secche della Meloria, in corrispondenza del tratto di costa che va da Marina di Pisa al Calambrone, dove la rotazione dei fronti d'onda è più accentuata, mentre a Nord dell'Arno l'energia delle onde si propaga in maniera regolare e senza brusche variazioni di direzione.

Ne consegue una suddivisione dell'area in due regioni caratterizzate da energie molto differenti, dato che si tratta del valore estremo associato al settore direzionale maggiormente dominante.

² *Scala Douglas*: è una scala numerica (da 0 a 9) per la stima dello "stato" del mare in base all'altezza media delle onde. Per "stato del mare" si intende il moto ondoso locale dovuto agli effetti combinati del mare vivo (o mare di vento) e del mare morto (o mare lungo) .

³ *Rifrazione*: rotazione dei fronti d'onda dovuta alla diminuzione della velocità delle onde con la profondità.

⁴ *Shoaling*: incremento o decremento dell'altezza d'onda legato alla concentrazione o dispersione dell'energia per effetto delle differenze tra velocità di fase dell'onda e velocità di gruppo causato dal fondale.

⁵ *Attrito*: dispersione di energia per effetto dell'attrito sul fondo che determina una riduzione dell'altezza d'onda.

4.1.3 Regime idrodinamico

Da misure effettuate in passato, è emerso un fenomeno rilevante per quanto riguarda il regime idrodinamico dell'area toscana.

La componente del vento longitudinale alla costa crea una corrente nel lungo termine che si esplica principalmente in direzione parallela al litorale, mentre la componente del vento, perpendicolare alla costa, ha la funzione di modulare tale corrente con periodicità semi-diurna e diurna.

Dato che questo vale, in condizioni barotropiche⁶, l'esame delle direzioni della corrente nella colonna d'acqua, e in particolare nello strato di fondo e in quello superficiale, ha messo in evidenza i seguenti aspetti:

- * fino ad Aprile l'andamento direzionale è sostanzialmente identico, sia in superficie, che sul fondo. Sono state rilevate modeste rotazioni della direzione (spirale di Ekman) quando il vento cresce di intensità, ma l'andamento generale resta comunque barotropico);
- * a partire da Maggio esistono situazioni di inversione di direzione subito seguite da situazioni in cui il flusso va nella stessa direzione.

Si hanno dunque, a partire da Maggio, situazioni in cui è presente la stratificazione delle acque: è quindi presente un termoclino (fig. 4.3) negli immediati pressi del fondo, e la sua oscillazione lungo la colonna d'acqua dà luogo a situazioni di barotropicità.

Il campo di corrente verticale risponde immediatamente a tale nuova situazione: solo lo strato superficiale risponde all'azione del vento, mentre lo strato di fondo rimane in condizioni di quiete. Tale "calma", che si avrebbe in condizioni di termoclino stabile ad una certa profondità, di fatto non esiste in quanto il termoclino oscilla e la sua oscillazione induce una notevole corrente di fondo, come testimoniano le ridotte percentuali di calma (<3% degli eventi) trovate nello strato di fondo.

⁶ *Condizione barotropica*: si instaura quando le correnti fluiscono essenzialmente nelle stesse direzioni a tutte le profondità, diversamente se l'andamento delle correnti a doppio strato avviene in direzioni opposte si parla di condizione baroclinica.

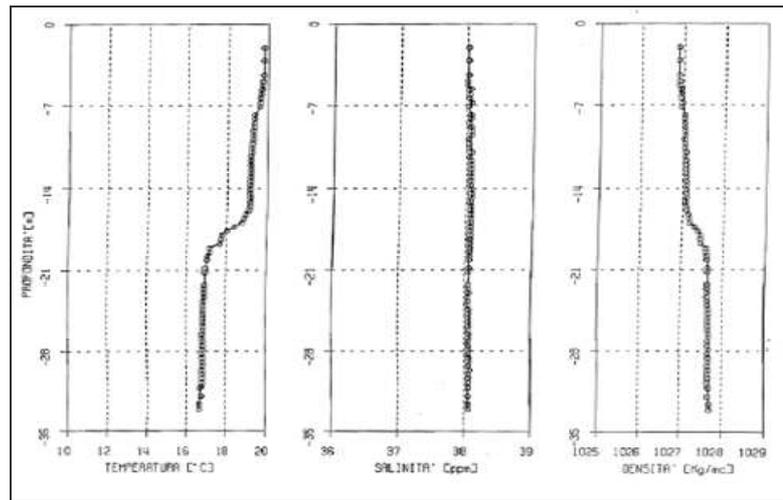


Figura 4.3 - Profilo verticale di temperatura, salinità e densità dell'acqua.

Dall'esame simultaneo dei dati di corrente, del campo di massa e del vento, è emerso un quadro fenomenologico abbastanza chiaro: pur nella complessità delle situazioni meteorologiche e nella diversità del loro evolversi, la corrente costiera risponde in maniera relativamente semplice all'azione del campo di vento, fluendo nel verso determinato dalla componente lungo costa dello stress del vento.

Inoltre, tutti i casi di aumento della corrente sono giustificabili da un corrispondente aumento del vento locale. Ciò significa che lungo la costa toscana sono poco probabili fenomeni rilevanti di propagazione di onde lunghe generate in aree lontane, in quanto la maggior parte delle perturbazioni meteorologiche che attraversano il Ligure-Tirreno interessano più o meno direttamente l'area toscana.

Analisi precedenti dei dati correntometrici hanno inoltre confermato il ruolo del vento quale termine forzante principale della corrente costiera fuori della "surf zone". All'interno dell'area dei frangenti è certamente il moto ondoso il termine forzante principale, capace di creare correnti long-shore, anche di notevoli velocità, soprattutto in corrispondenza di mareggiate.

Insieme alla corrente indotta dalla mareggiata, non va dimenticato il ruolo del vento, sempre presente nel corso delle mareggiate, in quanto il litorale pisano è affetto soprattutto da onde da vento, mentre lo swell è praticamente assente o rappresenta comunque una piccola frazione degli eventi.

4.2 Il litorale di Marina di Pisa

Il litorale di Marina di Pisa ($43^{\circ} 40.8' N$, $10^{\circ} 16.8' E$) ricade all'interno dell'Unità Fisiografica⁷ Pisano-Versiliese, che si estende per circa 65 Km, ed è delimitata a Nord dal Golfo di La Spezia (Punta Bianca alla foce del Magra) e a Sud dalla costa alta Livornese. La costa appartenente a questa unità fisiografica è, per tutta la sua estensione, bassa e sabbiosa, costituita da un'ampia e regolare falcatura a grande raggio di curvatura.

Essa presenta una direzione NW-SE presso Bocca di Magra fino ad orientarsi in direzione N-S in prossimità del porto di Livorno (fig. 4.4).



Figura 4.4 - Inquadramento geografico del litorale di Marina di Pisa.

Dal punto di vista meteomarinario, considerando le caratteristiche batimetriche ed orografiche, la fascia litoranea pisana, può a prima vista sembrare suddividibile in due aree distinte, separate dalla foce dell'Arno:

- l'area a Sud è influenzata dalla presenza del porto di Livorno, che contribuisce a schermare il litorale da certi settori direzionali, e dalle Secche della Meloria, che producono sostanziali effetti diffrattivi e rifrattivi sul moto ondoso.

⁷ *Unità fisiografica*: tratto costiero, delimitato da prominenze, più o meno marcate, di costa alta che fanno da ostacolo naturale alla corrente di deriva litoranea (drift) che intercetta il sedimento e lo trasporta parallelamente alla linea di riva; all'interno il bilancio sedimentario in entrata ed in uscita è all'incirca uguale.

→ l'area a Nord risulta invece più aperta al moto ondoso ad eccezione della zona più prossima alla foce dell'Arno, dove il pennello esistente induce qualche effetto diffrattivo.

Muovendosi lungo la fascia costiera, da nord a sud, il moto ondoso varia a causa della batimetria che svolge un ruolo essenziale sia sulle caratteristiche energetiche, che sulle caratteristiche spettrali delle onde. Soprattutto a sud dell'Arno, dove comincia a farsi sentire la presenza delle Secche della Meloria, le variazioni delle caratteristiche ondose sono decisamente consistenti, finché, nell'area che va da Tirrenia alla foce dello Scolmatore, si assiste alla formazione di mare incrociato.

Da studi condotti sul clima meteomarinico a largo del tratto di litorale oggetto di studio, è stato trovato che le mareggiate principali arrivano prevalentemente dal settore 240° - 270° N, mentre gli eventi estremi, cioè quelli relativi ad un'altezza d'onda maggiore di 6 m, provengono da un limitatissimo settore settato sui 225° N.

Da elaborazioni dei dati acquisiti dall'ondametro di La Spezia sono state ricavate le altezze d'onda del paraggio per i diversi periodi di ritorno, come riportato di seguito in Tabella 4.1:

Tabella 4.1: Altezze d'onda significative e rispettivi periodi di ritorno.

Periodo di ritorno Tr [anni]	Altezza significativa massima annuale Hs [m]
2	4.90
5	5.60
10	6.06
20	6.51
50	7.08
100	7.51

L'altezza d'onda di 6,50 m con tempo di ritorno di 20 anni è quella che è stata misurata dall'ondametro di La Spezia in concomitanza dell'evento verificatosi il 5 ottobre del 2003. Ciò comporta ovvie dirette conseguenze sul campo idrodinamico costiero e in tutti quei fenomeni, come ad esempio il trasporto sedimentario, per i quali il campo dinamico rappresenta il termine forzante principale.

Il campo idrodinamico costiero è scarsamente influenzato dall'oscillazione di marea, che induce correnti di pochissimi cm/s e quindi sono trascurabili ai fini pratici; mentre è invece influenzato dal vento.

Nelle aree costiere il flusso avviene prevalentemente lungo le isobate, ma, anche in questo caso, la presenza delle Secche non può essere trascurata.

Dal punto di vista generale i venti settentrionali creano un flusso parallelo alla costa e diretto verso sud, mentre i venti meridionali inducono un flusso diretto verso nord che risente tuttavia della presenza delle Secche: qui viene, in pratica, suddiviso in due rami, uno fluente verso costa e uno verso il largo, con correnti anche notevoli che decrescono progressivamente verso le aree più a nord. Nel corso di intensi eventi di moto ondoso, essendo le mareggiate del Ligure-Tirreno essenzialmente un “mare da vento”, non può essere affatto trascurato l’effetto del vento nella generazione della corrente: ciò comporta che, ai fini della morfodinamica costiera, non sarebbe corretto trascurare tale corrente, che va invece debitamente considerata e sovrapposta alla corrente longshore indotta dalle onde.

4.2.1 Evoluzione del litorale e successione delle opere di difesa

Il litorale di Marina di Pisa, ha iniziato a presentare fenomeni di erosione dopo l’Unità d’Italia a causa di modifiche effettuate alla foce dell’Arno e per la costante riduzione del trasporto solido dovuto alle opere di sistemazione idraulico forestali, effettuate nel bacino del fiume in quegli anni.

L’abitato di Marina di Pisa è stato difeso, per una lunghezza di 2,5 Km, da una scogliera radente che è stata costruita nella prima metà del secolo scorso per tratti successivi a partire dalla foce dell’Arno. Negli anni ’60 fu costruito, a distanza di 80-100 m dalla scogliera radente un sistema di dieci scogliere parallele lunghe da 200 a 250 m ciascuna, con varchi di circa 15 m. Tali scogliere hanno raggiunto lo scopo di proteggere l’abitato di Marina di Pisa, ma hanno anche determinato una forte asimmetria della foce dell’Arno, come è possibile vedere in figura 4.5.



Figura 4.5 - Foce dell’Arno, a sinistra all’altezza di S.Rossore si nota l’arretramento del litorale di circa 500 m (tratta da Google Earth 07-04-08).

Il tratto di costa in esame è stato rilevato nel 1997 con sezioni ortogonali alla riva distanziate di 50 m fino a raggiungere la batimetria dei -10m. La spiaggia sommersa compresa fra la scogliera radente e quella parallela ha una profondità media di circa 2-3 m, mentre all'esterno si superano in alcuni punti, in particolare in corrispondenza dei varchi, i 6-7 m, determinando dislivelli fra i due lati delle scogliere che superano i 3 m (fig. 4.6).

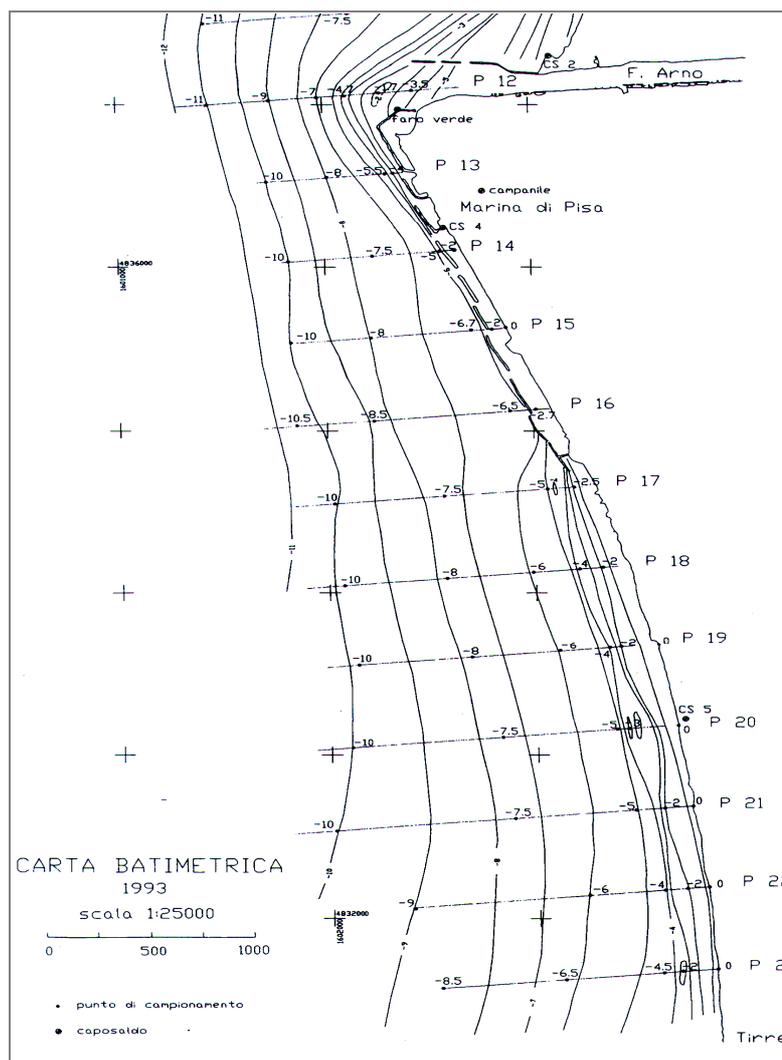


Figura 4.6 - Carta batimetrica dell'area antistante Marina di Pisa, rappresentante anche le dighe foranee.

La quota di sommità delle scogliere è fortemente variabile in funzione delle manutenzioni eseguite nel tempo: essa va da 3.8 m rispetto allo S.W.L.⁸, per opere recentemente sistemate, a circa 1.5 m per le scogliere dove da molti anni non si eseguono lavori di manutenzione.

⁸ S.W.L.: still water level, ossia il livello standard di mare "fermo".

Ne consegue che alcune scogliere sono ampiamente tracimabili e che in corrispondenza dei varchi, dove si concentrano correnti di ritorno, si sono verificati importanti canali di erosione al fondo.

Verso il largo il profilo della spiaggia è molto regolare e presenta solo una debole convessità la cui sommità si trova a circa 120 m dalla scogliera parallela, ad indicare l'allontanamento da riva del flusso sedimentario, dovuto proprio alla presenza di questa opera marittima.

Nel corso degli anni sono stati eseguiti vari interventi di manutenzione, sia delle dighe foranee, soggette a fenomeni di sprofondamento, sia dei muri radenti sottoposti a forti pressioni durante le mareggiate. Un altro problema che si verifica con questo tipo di intervento è quello del sovrizzo: durante gli episodi meteomarinari di maggiore intensità il livello dell'acqua all'interno delle dighe si alza provocando fenomeni di esondazione e in prossimità dei varchi, a causa del gradiente di profondità che si viene a creare, si sviluppano forti correnti che accentuano l'erosione dei fondali in quel punto, costituendo una fonte di pericolo durante la stagione balneare. Inoltre il fenomeno del sovrizzo ha creato problemi di erosione anche in prossimità della sede stradale con tutte le evidenti conseguenze.

Visto che le metodologie di difesa oggi disponibili sono assai più evolute rispetto a quelle adottate, consentendo la protezione del litorale con una utilizzazione assai contenuta di difese rigide e una buona fruibilità delle spiagge, il Comune e gli Enti interessati hanno programmato un intervento di riqualificazione.

4.3 Descrizione tecnica delle strutture in esame

Per la comprensione degli effetti che i parametri di progetto hanno su sovrizzo idrico, portate di overtopping e trasmissione del moto ondoso nel sito di interesse, è stata necessaria un'approfondita caratterizzazione granulometrica e geometrica delle strutture da riprodurre in laboratorio.

La scogliera emersa e quella radente sono state suddivise secondo l'asse S-N in sezioni distanti 5 m, delle quali è stato possibile misurare, per un numero di massi variabile, che va dalle 5 alle 14 unità, le tre grandezze caratteristiche (Allegato I).

4.3.1 Caratterizzazione geometrica

Il tratto di costa di Marina di Pisa da riprodurre nel modello fisico in canale è quello protetto dalla scogliera emersa n°5 e dalla scogliera radente in corrispondenza di essa (fig. 4.7).

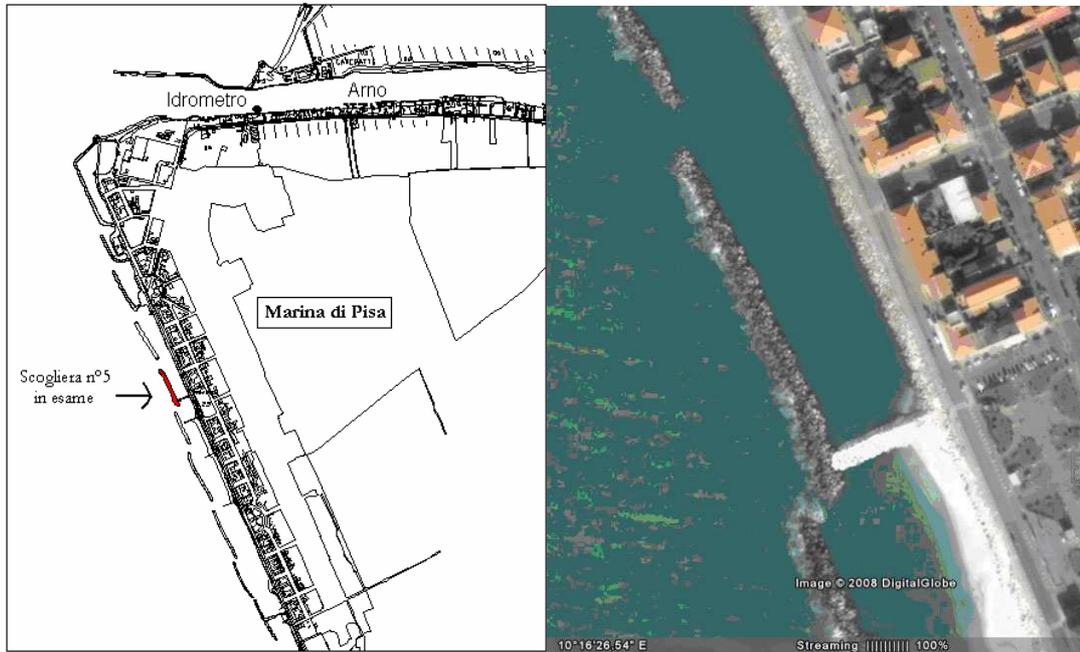


Figura 4.7 - A sinistra è rappresentato il sistema di scogliere radenti e parallele che difende il litorale di Marina di Pisa, a destra foto aerea della scogliera n°5.

Entrambe le scogliere sono composte da una gettata di massi naturali e presentano una caratteristica forma trapezoidale, anche se non perfettamente definita, a causa dell'azione modellatrice degli eventi meteomarinari rilevanti.

Per quanto riguarda la scogliera emersa l'elevazione sul livello del mare è di circa 2 m (in origine 4 m circa), mentre per la scogliera radente antistante è di circa 3.2 m, la distanza tra le due strutture è di circa 50 m, e tra la scogliera e la strada litoranea è di circa 60 m.

La scogliera radente nella sua totalità si estende per circa 2500 m., mentre la scogliera emersa, di lunghezza pari a circa 180 m. si interrompe verso nord con un varco ampio circa 10 m, che la divide dalla scogliera n°4, e verso sud da un pennello ortogonale alla linea di riva, che a sua volta la divide dalla scogliera n°6, in cui sono in atto i lavori di modifica (foto 4.1).

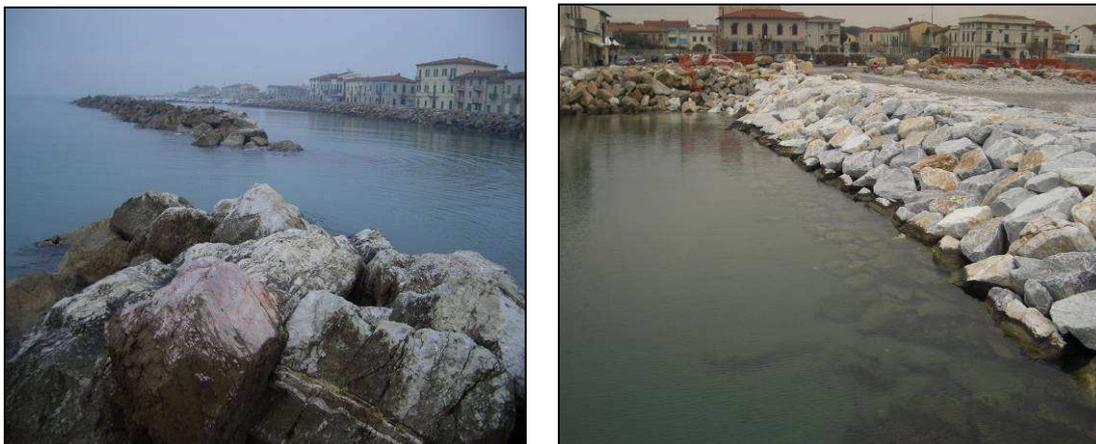


Foto 4.1 - Vista del confine Nord e Sud della scogliera n°5.

In figura 4.8 viene riportata una ricostruzione in sezione (scala prototipo) del sistema preso in esame con annesse le misure delle distanze e dei parametri geometrici di entrambe le tipologie di difesa.

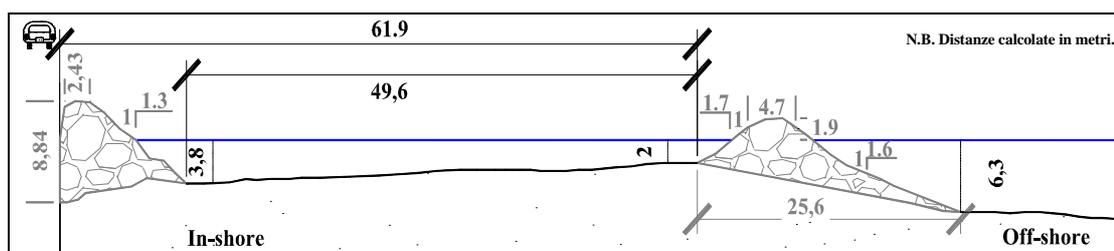


Figura 4.8 - Ricostruzione in sezione del sistema di studio (scogliera distaccata e radente).

Infine in figura 4.9 vengono rappresentati alcuni dei principali parametri generalmente utilizzati in ambito costiero per il dimensionamento di scogliere frangiflutti dimensionalizzati in figura 4.10, ovvero:

- L: Lunghezza della scogliera;
- L': Larghezza dei varchi tra due scogliere;
- D: Distanza dalla linea di riva;
- B: Larghezza di cresta;
- H_c: Freeboard;
- M: Pendenza del parametro lato mare;
- M': Pendenza del parametro lato terra.

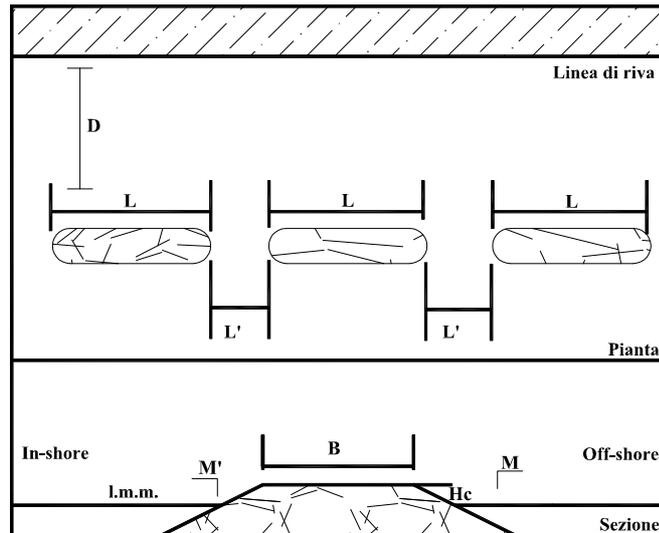


Figura 4.9 - Principali parametri per il dimensionamento delle scogliere frangiflutti.

4.3.2 Caratterizzazione granulometrica

Per la caratterizzazione del materiale costituente queste due strutture, il 6/12/07 sono state effettuate misurazioni in sito.

→ *Scogliera emersa*

Le misure dei massi della scogliera emersa n°5, di lunghezza pari a circa 180 m, sono state effettuate su 35 sezioni trasversali, poste a distanza di 5 m e distribuite uniformemente sull'estensione della scogliera. I valori così ottenuti hanno permesso di ottenere un campione rappresentativo dei massi della struttura. Per la costruzione del modello fisico in canale è stata scelta la sezione mediana n°3.

Per ognuna delle 35 sezioni trasversali della scogliera, è stato contato il numero dei massi emersi e per alcuni di essi, i più facilmente raggiungibili, sono state prese le misure nelle tre dimensioni. In totale sono stati misurati 152 massi, e dal calcolo del volume di essi, è stato estratto il diametro caratteristico (Tabella 1, Allegato I).

È importante sottolineare che il campione di massi misurati, è stato ipotizzato come rappresentativo di tutti i massi della scogliera, compresi quelli sommersi che non è stato possibile misurare.

Le frequenze relative e cumulate delle dimensioni dei massi rilevati sono riportate nella Tabella 4.2 e nei grafici delle figure 4.10 e 4.11.

Tabella 4.2: Frequenze relative e cumulate ottenute dai dati rilevati in sito per la scogliera emersa n°5.

Estremo della classe [m]	Numero massi con diametro inferiore all'estremo della classe	% Cumulata	Classi in diametro [m]	Centro della classe [m]	Numero massi contenuti nella classe	% Relativa
0.3	0	0	$0 \leq D < 0.3$	0.15	0	0
0.6	1	0.7	$0.3 \leq D < 0.6$	0.45	1	0.7
0.9	13	8.6	$0.6 \leq D < 0.9$	0.75	12	7.9
1.2	53	34.9	$0.9 \leq D < 1.2$	1.05	40	26.3
1.5	115	75.7	$1.2 \leq D < 1.5$	1.35	62	40.8
1.8	143	94.1	$1.5 \leq D < 1.8$	1.65	28	18.4
2.1	150	98.7	$1.8 \leq D < 2.1$	1.95	7	4.6
2.4	152	100.0	$2.1 \leq D < 2.4$	2.25	2	1.3
2.7	152	100.0	$2.4 \leq D < 2.7$	2.55	0	0

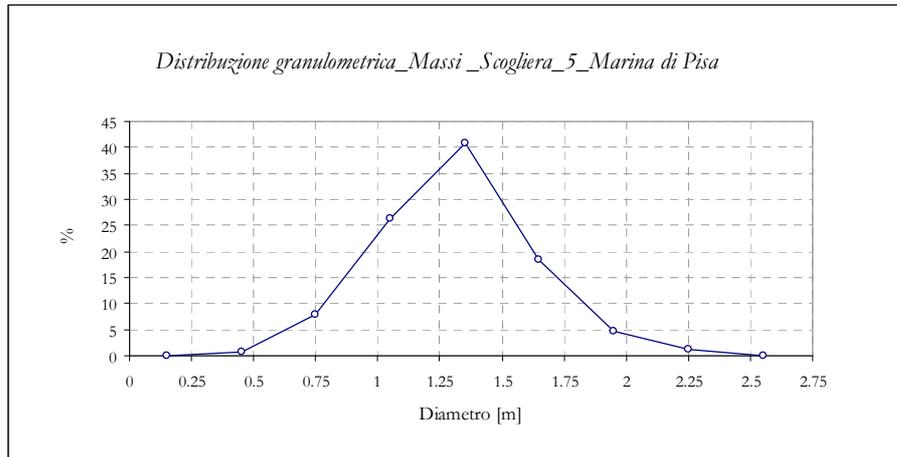


Figura 4.10 - Frequenza relativa dei massi della scogliera emersa n°5.

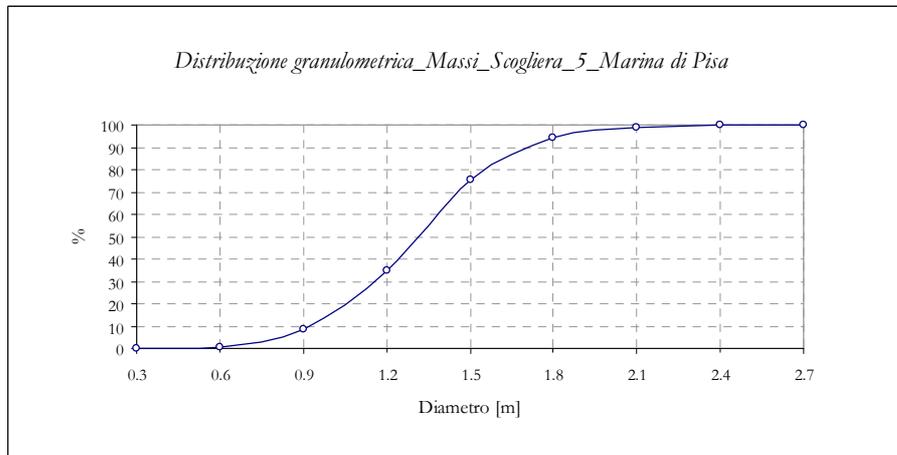


Figura 4.11 - Frequenza cumulata dei massi della scogliera emersa n°5.

Dal grafico in figura 4.11 sono stati ricavati i seguenti valori:

- * D_{15} : 1 m
- * D_{50} : 1.3 m
- * D_{85} : 1.6 m
- * D_{85}/D_{15} : 1.6

Com'è possibile intuire dalla stima del rapporto D_{85}/D_{15} pari ad 1.6, tale materiale non è risultato particolarmente classato.

→ **Scogliera radente**

Le misure dei massi della scogliera radente sono state effettuate su 20 sezioni trasversali, poste alla distanza di 10 m e distribuite uniformemente su circa 200 m della struttura. Per ogni sezione è stato contato il numero dei massi emersi, per ogni masso sono state prese le misure nelle tre dimensioni e dal calcolo del volume è stato estratto il diametro caratteristico (Tabella 2, Allegato I).

Anche nel caso della scogliera radente sono state calcolate le frequenze relative e cumulate in base alle classi in diametro e al numero dei massi, riportate in Tabella 4.3. I dati raccolti sono stati rappresentati nei grafici delle figure 4.12 e 4.13.

Tabella 4.3: Frequenze relative e cumulate ottenute dai dati rilevati in sito per la scogliera radente.

Estremo della classe [m]	Numero massi con diametro inferiore all'estremo della classe	% Cumulata	Classi in diametro [m]	Centro della classe [m]	Numero massi contenuti nella classe	% Relativa
0.2	0	0	$0 \leq D < 0.2$	0.1	0	0
0.4	0	0	$0.2 \leq D < 0.4$	0.3	0	0
0.6	49	27	$0.4 \leq D < 0.6$	0.5	49	26.92
0.8	120	66	$0.6 \leq D < 0.8$	0.7	71	39.01
1	159	87	$0.8 \leq D < 1$	0.9	39	21.43
1.2	177	97	$1 \leq D < 1.2$	1.1	18	9.89
1.4	182	100	$1.2 \leq D < 1.4$	1.3	5	2.75
1.6	182	100	$1.4 \leq D < 1.6$	1.5	0	0

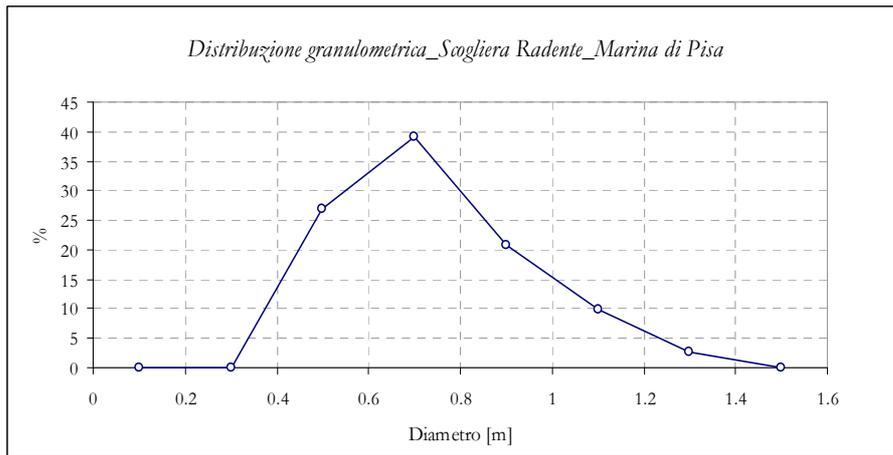


Figura 4.12 - Frequenza relativa dei massi della scogliera radente.

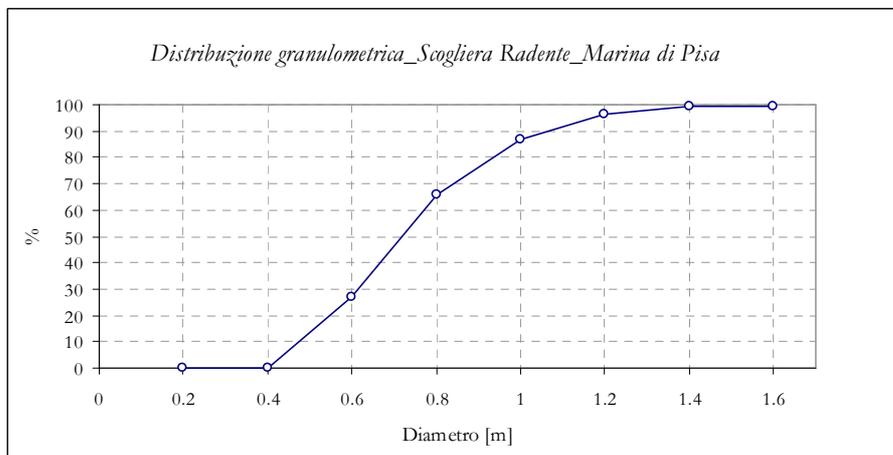


Figura 4.13 - Frequenza cumulata dei massi della scogliera radente.

Dal grafico in Figura 4.13 sono stati ricavati i seguenti valori:

- * D_{15} : 0.5 m
- * D_{50} : 0.7 m
- * D_{85} : 0.9 m
- * D_{85}/D_{15} : 1.8

Essendo il rapporto D_{85}/D_{15} pari a 1.8, come per il caso della scogliera emersa il materiale è risultato non particolarmente classato.

5. Applicazione al caso di Marina di Pisa: studio su modello fisico del tratto di costa protetto dalla scogliera n°5

5.1 Criteri adottati per la realizzazione del modello

Le prove su modello fisico sono state eseguite presso il Laboratorio di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria Civile di Firenze, su incarico della Provincia di Pisa, Settore Difesa del Suolo e Protezione Civile.

L'obiettivo di questo studio sperimentale è quello di analizzare l'equilibrio della configurazione attuale del tratto di costa di Marina di Pisa, protetto dalla quinta scogliera emersa, a partire dalla foce dell'Arno, e di verificare l'efficacia di una serie di interventi proposti per la riqualificazione del litorale.

5.1.1 Scelta della sezione di studio

Il profilo da riprodurre su modello è stato individuato sulla base dei rilievi batimetrici della zona di studio, aggiornati al 7 Novembre 2006 (fig. 5.1).

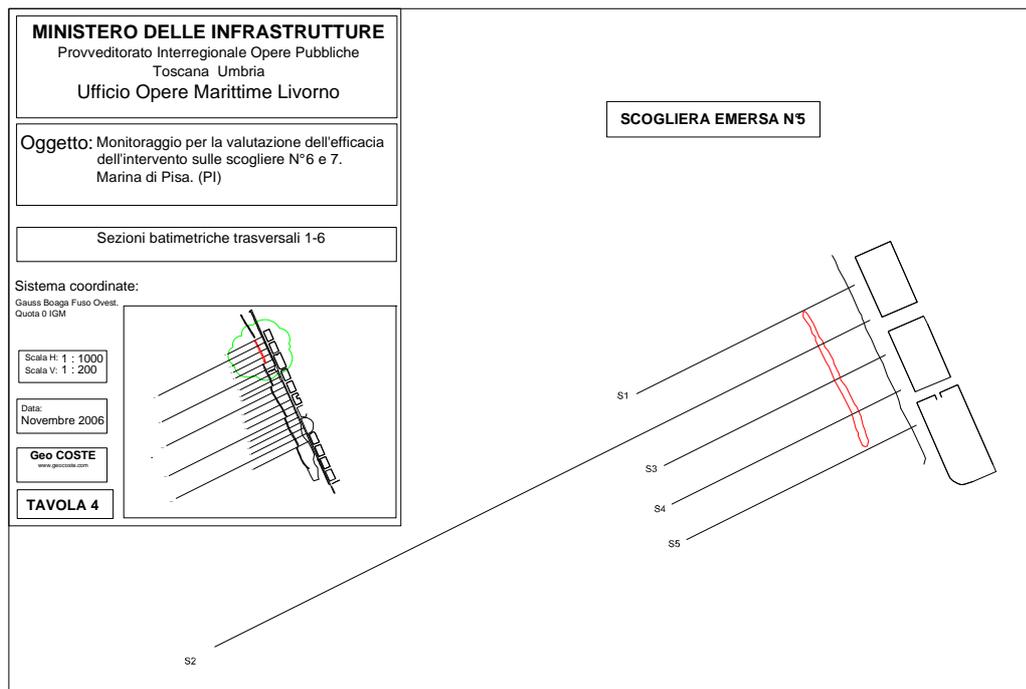


Figura 5.1 - Particolare della scogliera emersa n°5 e relative sezioni trasversali batimetriche.

Dato che per riprodurre tramite un modello bidimensionale i fenomeni di interazione fra onde e strutture è necessario prendere in considerazione una sezione rappresentativa dell'intera area di studio, è stato scelto di riprodurre su modello il profilo relativo alla sezione n°2 dei rilievi 2006 (fig. 5.2).

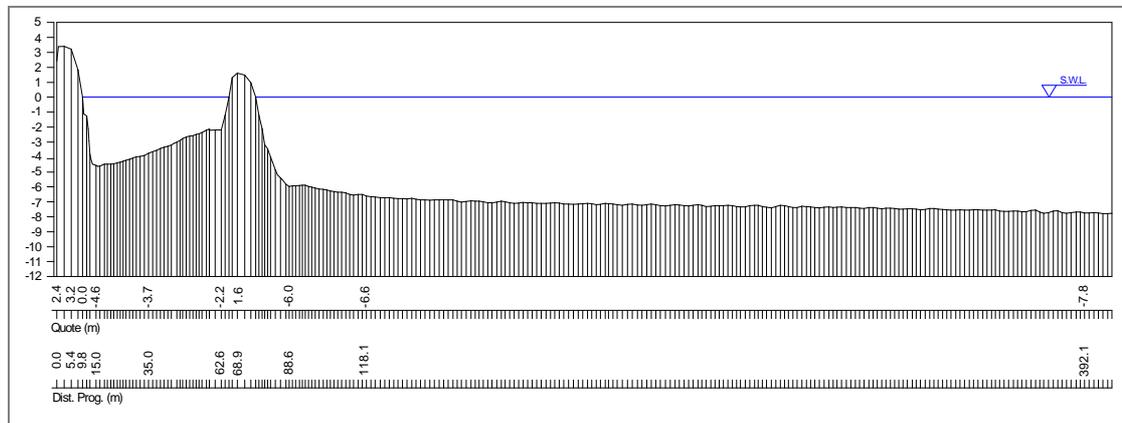


Figura 5.2- Sezione batimetrica n°2.

La sezione in questione si estende fino alla batimetrica dei -10 m che si trova a circa 1 km dalla linea di riva. Sebbene sia possibile riprodurre tale distanza in laboratorio, ciò determinerebbe una eccessiva dissipazione dell'energia del moto ondoso, con conseguente formazione di onde troppo basse, rispetto a quelle registrate di fronte all'abitato, in corrispondenza di una mareggiata.

Per questo motivo è stato deciso di limitare la porzione di fondale da riprodurre ai primi 400 m da riva.

Dall'esame della sezione n°2 inoltre, risulta evidente un forte abbassamento del livello del fondo al piede esterno della scogliera, che raggiunge anche i -6 m a fronte di un livello di posa originario di circa -3 m.

5.1.2 Scelta del fattore di scala

Una volta scelta la sezione da riprodurre su modello è necessario effettuare una valutazione del fattore di scala da utilizzare, tenendo conto dei limiti di generazione del moto ondoso e delle caratteristiche geometriche del canale.

La pala battonde con un livello idrico di circa 50 cm, nel settore antistante, può generare un'onda di altezza massima, pari a 20 cm, che propagandosi nella parte terminale del canale, dissipa la sua energia, diminuendo così la sua altezza d'onda per l'attrito con le pareti di vetro e con il fondo del canale.

Per calcolare l'altezza massima per la quale le onde frangono su se stesse in relazione alla profondità del fondale davanti alla struttura, si utilizza una formula semplificata dalla generale validità:

$$H_b = \gamma h_b$$

dove h_b è la profondità media al frangimento, γ è l'indice di frangimento e H_b è l'altezza di breaking; approssimando al primo ordine si usa il valore di $\gamma = 0.78$, quando il rapporto tra altezza e profondità supera tale indice, l'onda frange.

Dato che la batimetrica al piede esterno della scogliera, raggiunge i -6 m, l'onda massima, associata a tale fondale, è rappresentata da un'altezza inferiore a 5 m.

Per impostare la configurazione del canale, il profilo batimetrico e le dimensioni delle strutture, è necessario quindi trovare una scala, che permetta di simulare attacchi ondosi, associati ad eventi estremi, e quindi onde che arrivano sulla scogliera in condizioni di frangimento, o vicine al frangimento.

Date le dimensioni del canale e la capacità di generazione del moto ondoso, il fattore di scala minimo, che consente di riprodurre, il più fedelmente possibile, le condizioni del sito in analisi è 1:40.

Questo fattore di scala permette di studiare tutti i parametri d'interesse: la trasmissione del moto ondoso, il water set-up e l'overtopping sulla strada litoranea.

Inoltre per evitare la sovrastima del water set-up e dell'overtopping è stata simulata la corrente che si viene a creare tra i varchi, detta: *rip current*, azionando il sistema di ricircolo, che pompa l'acqua a tergo della scogliera emersa e la reimmette nella zona antistante il generatore di moto ondoso.

5.1.3 Ricostruzione del profilo batimetrico in canale

In figura 5.3 è rappresentata la disposizione dei pannelli in fibro-cemento, costituenti il profilo batimetrico ricostruito in canale.

Partendo dalla pala battionde, il profilo è costituito da un piano orizzontale lungo 2775 cm, seguito da un piano inclinato della lunghezza di 602 cm, con pendenza 1:25, al termine del quale (a 3377 cm dal battionde) è stato posizionato un pannello orizzontale con lunghezza di 121 cm, che si raccorda alla parte di fondale "mobile", composto da sabbia.

Il fondale di sabbia è caratterizzato da una pendenza molto dolce (1:470) e forma un tratto di 685 cm di lunghezza, al termine del quale (4183 cm dal battionde) si trova il piede della scogliera (inclinazione 1:5 e lunghezza 61cm).

Nella parte terminale di questo tratto (4244 cm dal battionde) è presente un aumento della pendenza del lato mare, della scogliera (1:2) con lunghezza di 40 cm; segue poi la cresta della scogliera di lunghezza 10 cm ed il lato obliquo con pendenza 1:2.

Il fondale all'interno della zona protetta (che inizia a 4294 cm dal battionde) è formato da un piano inclinato (anch'esso realizzato con la sabbia) con pendenza 1:25 e lunghezza 113 cm; al termine di questo tratto è posizionata la scogliera radente che presenta un lato inclinato 1:2 e lunghezza di 27 cm.

La cresta della scogliera radente è lunga 10 cm e finisce in corrispondenza della zona che riproduce la strada litoranea, a 4460 cm dal battionde.

La strada litoranea è larga 40 cm e termina a 4500 cm dal battionde, in quest'ultimo tratto di modello, è stato realizzato e montato l'apparato di misura dell'overtopping.

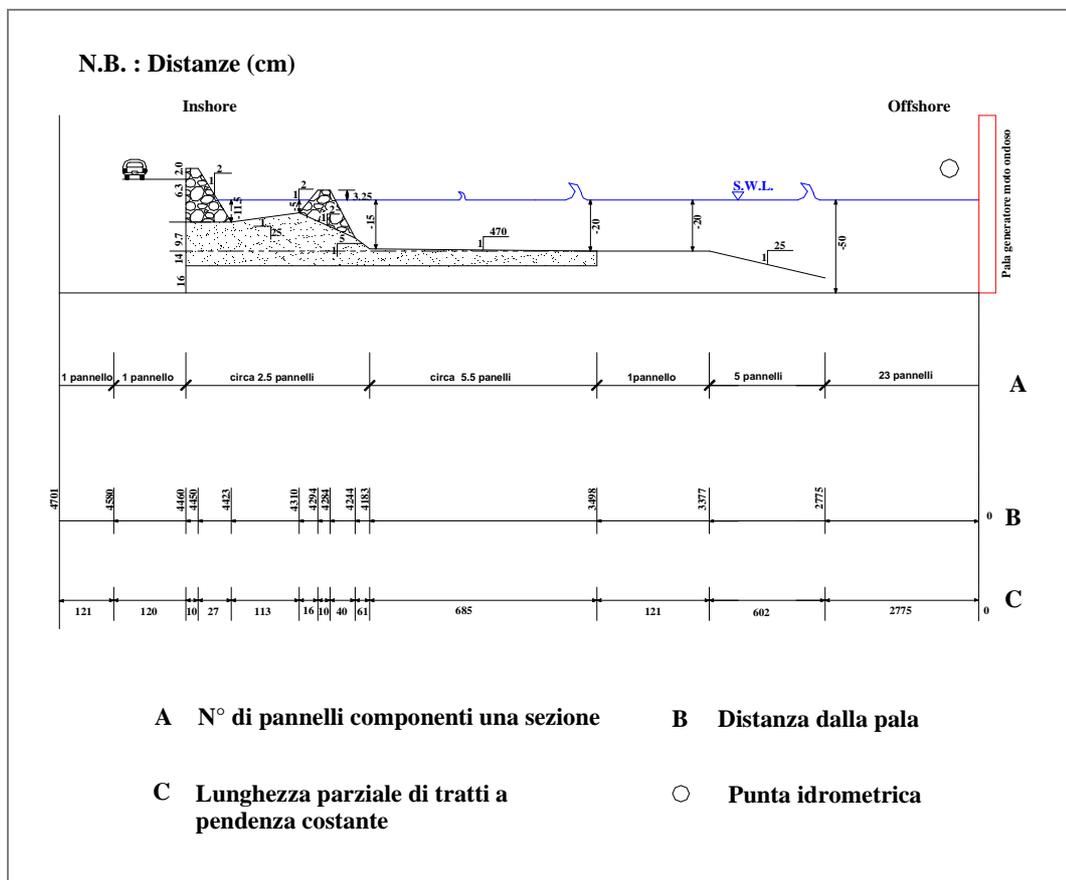


Figura 5.3 - Schematizzazione non in scala del profilo batimetrico ricostruito in canale.

La Tabella 5.1 mostra le caratteristiche dimensionali dei tratti a pendenza costante.

Tabella 5.1: Tabella riassuntiva riguardante i tratti a pendenza costante.

Pendenza	Distanza dalla pala del punto di inizio del segmento [cm]	Distanza dalla pala del punto finale del segmento [cm]	Lunghezza del tratto a pendenza costante [cm]
Slope 0	0	2775	2775
Slope 1:25	2775	3377	602
Slope 0	3377	3498	121
Slope 1:470	3498	4183	685
Slope 1:5	4183	4244	61
Slope 1:2	4244	4284	40
Slope 0	4284	4294	10
Slope 1:2	4294	4310	16
Slope 1:25	4310	4423	113
Slope 1:2	4423	4450	27
Slope 0	4450	4460	10
Slope 0	4460	4580	120

5.2 Ricostruzione delle strutture

Per poter realizzare un modello fisico in similitudine dinamica è necessario riprodurre le stesse condizioni del flusso attraverso la scogliera emersa e la scogliera radente. E' necessario, quindi, imporre al modello un numero di Reynolds (Re) tale, da garantire un regime turbolento per i flussi di filtrazione, pari a quello che si verifica nel prototipo.

$$Re = \frac{\sqrt{gH_s} \cdot D_n}{\nu} \quad (1)$$

dove:

D_n è il diametro rappresentativo dei massi della scogliera (m);

g è l'accelerazione gravitazionale (m/s^2);

H_s è l'altezza significativa incidente dell'onda (m);

ν è la viscosità cinematica (per l'acqua = $10^{-6} m^2/s$).

Affinché le condizioni di flusso nel modello siano rappresentative del caso reale, è molto importante che il numero di Re del modello ricada nello stesso range in cui cade il numero di Re del prototipo.

In base al manuale *Hydralab III*, utilizzato come riferimento, il valore minimo di Reynolds che occorre ottenere nel modello affinché il moto sia turbolento è di circa 30000.

5.2.1 Scogliera emersa n°5

Al fine di ricostruire la stessa distribuzione in frequenza misurata per il materiale della scogliera emersa n°5, le classi in diametro dei massi sono state ridotte in scala 1:40 e riportate in cm. Supponendo di dover preparare un volume che sia ampiamente sufficiente e quindi pari a 70 dm^3 (il volume della scogliera è approssimativamente 34 dm^3) è stato calcolato il volume da preparare per ogni classe in diametro, in funzione della frequenza relativa in percentuale stimata per il prototipo.

Il numero di Reynolds calcolato per il caso reale tramite la (1), con $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, e $D_{50(p)} = 1.3 \text{ m}$ e per tre altezze d'onda $^9(H_{s(p)})$ massime significative o incidenti scelte per le simulazioni, è il seguente:

$$\begin{aligned} \text{- per } H_{1s(p)} = 1.8 \text{ m} & \quad \text{Re} = \frac{\sqrt{9.81 \cdot 1.8} \cdot 1.3}{10^{-6}} = 5.46 \cdot 10^6 \\ \text{- per } H_{2s(p)} = 3.0 \text{ m} & \quad \text{Re} = \frac{\sqrt{9.81 \cdot 3.0} \cdot 1.3}{10^{-6}} = 7.05 \cdot 10^6 \\ \text{- per } H_{3s(p)} = 4.2 \text{ m} & \quad \text{Re} = \frac{\sqrt{9.81 \cdot 4.2} \cdot 1.3}{10^{-6}} = 8.34 \cdot 10^6 \end{aligned}$$

I valori di Re ottenuti, sono tutti dell'ordine di grandezza di 10^6 , e sono caratteristici di un moto turbolento.

Imponendo al modello un numero di Reynolds pari a 30000, come riportato nel manuale *Hydralab III*, ed essendo la viscosità cinematica la stessa del prototipo, il diametro minimo dei massi per la costruzione della scogliera emersa può essere calcolato attraverso la seguente relazione:

$$D_{n(m)} \geq \frac{\nu \cdot \text{Re}}{\sqrt{g \cdot H_{s(m)}}} \quad (2)$$

⁹ La notazione (p) è utilizzata per indicare i parametri relativi al prototipo.

Il diametro minimo dei massi calcolato per il modello tramite la (2), con $\nu = 10^{-6}$ m²/s, $Re=30000$, e $^{10}H_{s(m)} = 0.07$ m (altezza d'onda minima scelta, per le simulazioni in laboratorio) è il seguente:

$$\frac{10^{-6} \cdot 30000}{\sqrt{9.81 \cdot 0.07}} = 0.036m$$

Le classi in diametro scelte sono quelle evidenziate nelle Tabelle 5.2 e 5.3. Occorre precisare che per quanto riguarda la distribuzione relativa nel modello è stato scelto di sommare le percentuali delle classi inferiori a 3.38 cm, pari ad un totale di 34.9%, alle classi di 4.88 cm e 5.63 cm, in modo equamente suddiviso. In questo modo la classe di 4.88 cm ha ottenuto una distribuzione relativa pari a 22.05%, e quella di 5.63 cm pari a 18.75%.

Tabella 5.2: Frequenze relative stimate della scogliera emersa prima della modifica.

Classi in diametro [cm]	Centro della classe [cm]	% Relativa nel prototipo	% Relativa del numero dei massi prima della modifica	Classi in peso [g]
$0 \leq D < 0.75$	0.38	0	0	$0 \leq W < 1$
$0.75 \leq D < 1.5$	1.13	0.7	10.9	$1 \leq W < 9$
$1.5 \leq D < 2.25$	1.88	7.9	26.5	$9 \leq W < 30$
$2.25 \leq D < 3$	2.63	26.3	32	$30 \leq W < 70$
$3 \leq D < 3.75$	3.38	40.8	23.5	$70 \leq W < 137$
$3.75 \leq D < 4.5$	4.13	18.4	5.9	$137 \leq W < 237$
$4.5 \leq D < 5.25$	4.88	4.6	0.9	$237 \leq W < 376$
$5.25 \leq D < 6$	5.63	1.3	0.2	$376 \leq W < 562$
$6 \leq D < 6.75$	6.38	0	0	$562 \leq W < 800$

Attraverso la distribuzione relativa percentuale dei volumi nel modello, sono stati stimati i volumi da preparare per ogni classe, moltiplicando le percentuali relative per il volume totale di 70 dm³. Tramite i valori dei volumi così ottenuti, è stato possibile trovare il numero dei massi appartenenti a ciascuna classe, calcolando innanzitutto il volume di ogni masso (elevando al cubo il valore relativo al centro della classe a cui appartiene), e rapportando quest'ultimo al volume di ogni classe precedentemente ottenuto. Infine, moltiplicando il volume dei massi appartenenti agli estremi inferiori e superiori di ciascuna classe per il peso specifico (2.625 g/cm³), si sono ottenuti i pesi di ogni masso degli estremi della classe, in modo tale da capire entro quale range di peso doveva essere effettuata la scelta dei massi da utilizzare per la costruzione del modello.

¹⁰ La notazione (*m*) è utilizzata per indicare i parametri relativi al modello.

Tabella 5.3: Parametri stimati per la costruzione del modello della scogliera emersa dopo la modifica.

% Relativa corretta per costruire il modello	Volume di ogni classe [dm ³] (su un totale di 70 dm ³)	Numero di massi	% Relativa nel modello	% Cumulata nel modello
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
40.8	29	743	66	65.5
18.4	13	184	16	81.7
22.05	15	133	12	93.5
18.75	13	74	7	100
0	0	0	0	100

In figura 5.4 sono riportate le frequenze relative dei massi prima e dopo la modifica apportata alle classi inferiori a 3.38 cm, come spiegato precedentemente. In questo modo è possibile apprezzare le differenze che tale cambiamento ha apportato alle distribuzioni di frequenza. In figura 5.5 è riportata infine la distribuzione cumulata dei massi, ottenuta dopo la modifica.

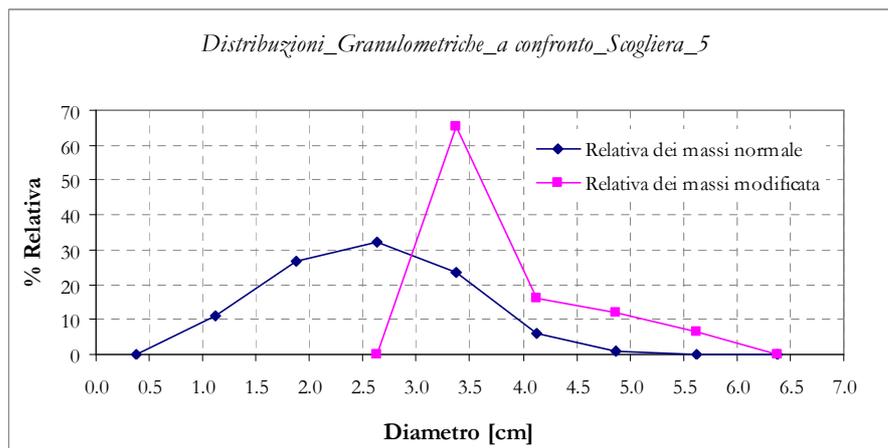


Figura 5.4 - Frequenze relative del numero dei massi costituenti la scogliera emersa, prima e dopo la modifica.

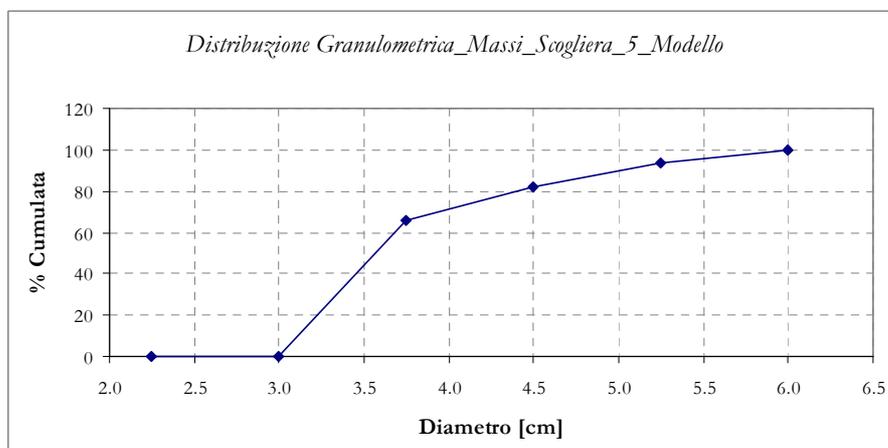


Figura 5.5 - Frequenza cumulata dei massi costituenti il modello della scogliera emersa, dopo la modifica.

Dal grafico in figura 5.5 si ricavano i seguenti valori:

- * D_{15} : 3.2 cm
- * D_{50} : 3.6 cm
- * D_{85} : 4.8 cm
- * D_{85}/D_{15} : 1.5

5.2.2 Scogliera radente

Per la costruzione della scogliera radente, sono state fatte le stesse considerazioni ed effettuati gli stessi calcoli visti per la scogliera emersa n°5.

Supponendo stavolta di dover preparare un volume pari a 50 dm^3 (il volume della scogliera è approssimativamente 46 dm^3) è stato calcolato il volume da preparare per ogni classe in diametro, in funzione della frequenza relativa in percentuale stimata per il prototipo.

Il numero di Reynolds calcolato per il caso reale tramite la (1), con $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $H_{s(p)} = 2.28 \text{ m}$ e $D_{50(p)} = 0.7 \text{ m}$, è il seguente:

$$\text{Re} = \frac{\sqrt{9.81 \cdot 2.28 \cdot 0.7}}{10^{-6}} = 3.31 \cdot 10^6$$

Il valore di Re ottenuto, pari a $3.31 \cdot 10^6$, è caratteristico di un moto turbolento. È importante precisare che nel calcolo del numero di Reynolds è stata utilizzata una H_s minima ($\sim 2.28 \text{ m}$) compatibile con la profondità del fondale ($\sim 3.7 \text{ m}$) che si trova davanti al piede della scogliera radente.

Imponendo al modello un numero di Reynolds pari a 30000, come riportato nel manuale *Hydralab III*, ed essendo la viscosità cinematica la stessa del prototipo, il diametro minimo dei massi per la costruzione del modello della scogliera radente può essere calcolato attraverso la (2), con $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\text{Re} = 30000$, e $H_{s(m)} = 0.06 \text{ m}$ (altezza d'onda minima, ottenuta riportando in scala 1:40 l'altezza d'onda corrispondente nel prototipo):

$$\frac{30000 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{9.81 \cdot 0.06}} = 0.038 \text{ m}$$

Le classi in diametro scelte sono quelle evidenziate nelle Tabelle 5.4 e 5.5. Occorre precisare che anche in questo caso, per quanto riguarda la distribuzione relativa nel modello, è stato scelto di sommare, le percentuali delle classi inferiori a 2.75 cm, pari ad un totale di 87.36%, alle classi di 3.25 cm e 3.75 cm, in modo equamente suddiviso. In questo modo la classe di 3.25 cm ha ottenuto una distribuzione relativa pari a 46.43%, e quella di 3.75 cm pari a 46.68%.

Tabella 5.4: Frequenze relative stimate per la costruzione della scogliera radente prima della modifica.

Classi in diametro [cm]	Centro della classe [cm]	% Relativa nel prototipo	% Relativa del numero dei massi prima della modifica	Classi in peso [g]
$0 \leq D < 0.5$	0.25	0	0	$0 \leq W < 0.3$
$0.5 \leq D < 1.0$	0.75	0	0	$0.3 \leq W < 3$
$1.0 \leq D < 1.5$	1.25	26.92	58.7	$3 \leq W < 9$
$1.5 \leq D < 2.0$	1.75	39.01	31	$9 \leq W < 21$
$2.0 \leq D < 2.5$	2.25	21.43	8	$21 \leq W < 41$
$2.5 \leq D < 3.0$	2.75	9.89	2	$41 \leq W < 70$
$3.0 \leq D < 3.5$	3.25	2.75	0.3	$70 \leq W < 111$
$3.5 \leq D < 4.0$	3.75	0	0	$111 \leq W < 166$

Attraverso la distribuzione relativa percentuale dei volumi nel modello, sono stati calcolati i volumi di ogni classe, il numero di massi corrispondenti e i pesi degli estremi di ogni classe, con le modalità precedentemente spiegate nel caso del modello della scogliera emersa.

Tabella 5.5: Parametri stimati per la costruzione della scogliera radente a partire dopo la modifica.

% Relativa corretta per costruire il modello	Volume di ogni classe [dm ³] (su un totale di 50 dm ³)	Numero di massi	% Relativa nel modello	% Cumulata nel modello
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
9.89	5	238	18	17.9
46.43	23	676	51	68.8
43.68	22	414	31	100

In figura 5.6 sono riportate le frequenze relative dei massi prima e dopo la modifica apportata alle classi inferiori a 2.75 cm, come spiegato precedentemente. In questo modo è possibile apprezzare le differenze che tale cambiamento ha apportato alle distribuzioni di frequenza. In figura 5.7 è riportata infine la distribuzione cumulata dei massi, ottenuta dopo la modifica.

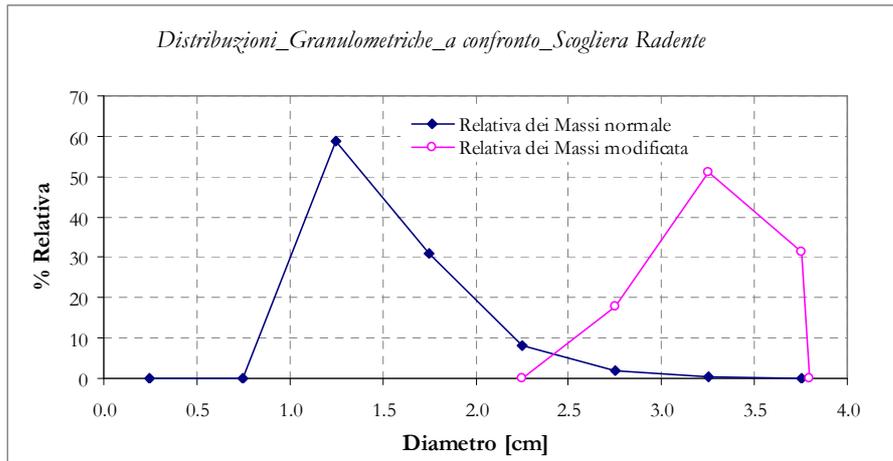


Figura 5.6 - Frequenze relative del numero dei massi costituenti la scogliera radente, prima e dopo la modifica.

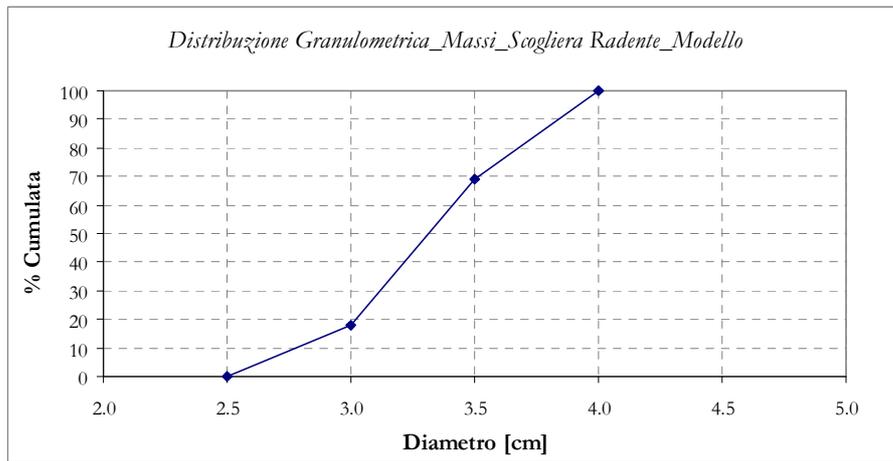


Figura 5.7 - Frequenza cumulata dei massi costituenti il modello della scogliera radente.

Dal grafico in figura 5.7 si ricavano i seguenti valori:

- * D_{15} : 2.9 cm
- * D_{50} : 3.3 cm
- * D_{85} : 3.75 cm
- * D_{85}/D_{15} : 1.3

5.3 Ricerca e settaggio degli attacchi ondosi

Dato che i fondali antistanti la scogliera emersa in esame, raggiungono valori pari a $d=6$ m (15 cm nel modello), la massima altezza d'onda significativa (H_s) che caratterizza un attacco ondoso dove i frangenti iniziano a manifestarsi, risulta compresa tra 0.5 d e 0.7 d. Di conseguenza le onde incidenti d'interesse per il modello risultano avere una massima altezza significativa compresa tra 3.0 m e 4.2 m (7.5 cm e 10.5 cm nel modello) relative rispettivamente a moto ondoso con incipiente frangimento (*breaking waves*) e moto ondoso completamente franto (*broken waves*).

È stato scelto, inoltre, di considerare anche quelle onde che si presentano davanti alla scogliera in condizioni di non frangimento. Per questo è stato preso in considerazione un coefficiente di frangimento (H/d) pari a 0.30 il quale, essendo il fondale di 6 m, fornisce un'onda di altezza significativa pari a 1.8 m (5.25 cm nel modello).

In conclusione le altezze d'onda significative scelte per il modello sono:

- $H_{S1i} = 1.8$ m (4.5 cm);
- $H_{S2i} = 3.0$ m (7.5 cm);
- $H_{S2i} = 4.2$ m (10.5 cm).

Una volta scelte le caratteristiche delle onde incidenti è stato necessario stabilire i parametri delle onde da generare al battionda.

Da studi precedentemente effettuati in laboratorio, sul moto tra il battionda e i modelli di strutture posti nella parte terminale del canale, è stato valutato un tasso di dissipazione dell'altezza d'onda dell'ordine tra il 30% e il 50%; tramite questo è stato possibile ricavare le altezze delle onde da generare a partire da quelle incidenti.

In seguito è stato necessario assegnare alle onde prescelte il proprio periodo. L'analisi dei dati ondometrici acquisiti dall'ondametro di La Spezia, per il settore d'interesse $170^\circ\text{N}-330^\circ\text{N}$, localizzato a $43^\circ40.8'\text{N}$ e $10^\circ16.8'\text{E}$, fornisce il grafico delle coppie H, T in fig. 5.8.

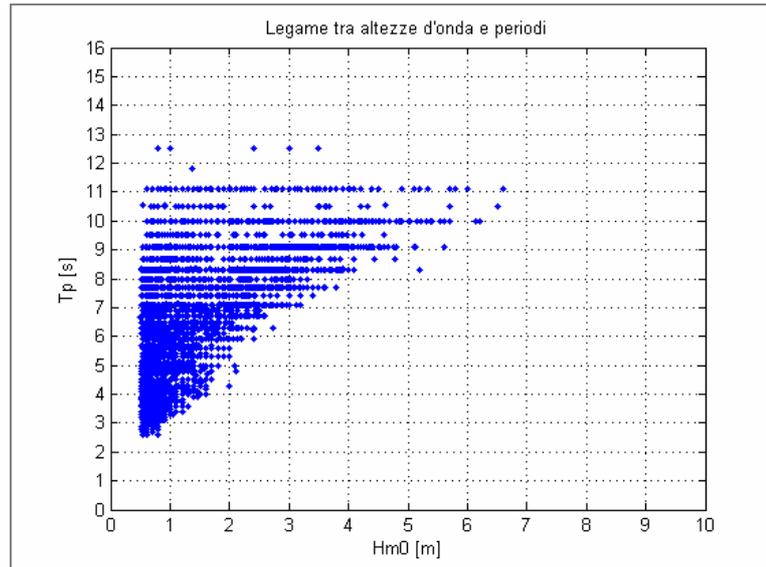


Figura 5.8 - Grafico H-T relativo al settore 170°N-330°N fornito dall'ondametro di La Spezia.

Dal grafico in figura si osserva che per l'onda con altezza 3.0 m i periodi possibili vanno da 7 s a circa 13 s, per l'onda di 4.2 m, i periodi vanno da 9 s a 11 s, infine per l'onda di 7 m si può avere solo un periodo di 11 s.

Per ottenere un maggior numero di informazioni sulla fenomenologia relativa agli attacchi ondosi sulle strutture oggetto di studio, è stato deciso di prendere in considerazione più periodi per ciascuna onda. In questo modo le onde da generare nel modello sono diventate sei (I1-I6).

In Tabella 5.6 sono riportati tutti i valori scelti (altezze significative incidenti H_i e generate H_g ; periodo e durata) per ciascuna delle onde incidenti e da generare.

Tabella 5.6: Parametri stimati per le onde incidenti e generate scelte nel Prototipo e nel Modello.

Altezza onda incidente (H_i) Prototipo [m] (Modello [cm])	Altezza onda impostata nel software di generazione (H_g) Prototipo [m] (Modello [cm])	Periodo (T) [s]	Durata Prove Preliminari (t) [min]	Codice Onda
1.8 (4.5)	4.0 (10,0)	7 (1.1)	5	I1
		9 (1.4)	5	I2
		11 (1.7)	5	I3
3.0 (7.5)	6.6 (15,0)	9 (1.4)	5	I4
		11 (1.7)	5	I5
4.2 (10.5)	7.2 (18,0)	11 (1.7)	5	I6

Le prove sperimentali sono state eseguite lanciando i sei attacchi ondosu su tre livelli idrici impostati in canale (F0, F1, F2), ognuno dei quali ha lo scopo di simulare una precisa condizione di mare.

Il riferimento è lo Steel Water Level (S.W.L.) registrato durante il rilievo batimetrico effettuato il 7 Novembre del 2006, esso rappresenta il livello medio depurato dall'innalzamento dovuto alla marea e da quello dovuto al vento e alla bassa pressione.

Sia l'innalzamento di marea che quello da vento e bassa pressione sono stimati nell'ordine dei 40 cm, e vengono quindi riprodotti nel modello scalati di un fattore 40 con il valore di 1 cm.

In particolare:

- * il livello F0: simula la condizione di mare senza innalzamenti dovuti a vento e marea (il livello S.W.L.);
- * il livello F1: simula la condizione di innalzamento da vento e non da marea;
- * il livello F2: simula la condizione di alta marea concomitante con l'innalzamento dovuto al vento.

I tre livelli sono impostati con la pompa di retropala spenta, e si tiene conto di un innalzamento di circa 1 cm al momento dell'accensione della pompa, mentre per le prove con ricircolo si verifica un ulteriore innalzamento del livello, dovuto al fatto che l'acqua pompata nella zona protetta viene reimpressa davanti al generatore.

Per riprodurre i livelli idrici in canale, è stata utilizzata la punta idrometrica posta vicino al generatore, che essendo costituita da una scala al nonio, ha permesso di fissare il livello idrico durante le prove, con una precisione del ventesimo di millimetro.

In Tabella 5.7 sono riportati i livelli idrici, relativi alle prove senza ricircolo, impostati durante le simulazioni con la pompa di retropala spenta, e i livelli target con la pompa di retropala accesa.

Tabella 5.7: Valori dei livelli idrici in canale per le prove senza ricircolo.

LIVELLI IDRICI IN CANALE						
	Livello F0		Livello F1		Livello F2	
	Profondità alla pala [cm]	Lettura punta idrometrica al nonio [cm]	Profondità alla pala [cm]	Lettura punta idrometrica al nonio [cm]	Profondità alla pala [cm]	Lettura punta idrometrica al nonio [cm]
Pompa di retropala spenta	49	21.55	50	20.55	51	19.55
Pompa di retropala accesa	≈ 50	≈ 20.55	≈ 51	≈ 19.55	≈ 52	≈ 18.55

In Tabella 5.8 sono invece riportati i livelli idrici, relativi alle prove con ricircolo, impostati durante le simulazioni con la pompa di retropala spenta, e i livelli target con la pompa di retropala accesa.

Tabella 5.8: Valori dei livelli idrici in canale per le prove con ricircolo.

LIVELLI IDRICI IN CANALE						
	Livello F0		Livello F1		Livello F2	
	Profondità alla pala [cm]	Lettura punta idrometrica al nonio [cm]	Profondità alla pala [cm]	Lettura punta idrometrica al nonio [cm]	Profondità alla pala [cm]	Lettura punta idrometrica al nonio [cm]
Pompa di retropala spenta	48	22.55	49	21.55	50	20.55
Pompa di retropala accesa	≈ 49	≈ 21.55	≈ 50	≈ 20.55	≈ 51	≈ 19.55

5.4 Prove preliminari

Le prove preliminari sono state effettuate i giorni 4 e 11 Febbraio 2008, con lo scopo di valutare l'andamento delle onde prescelte e il loro comportamento, al fine di individuare eventuali miglie da apportare al modello oggetto di studio.

Gli obiettivi più importanti di questa serie di prove sono:

- La valutazione delle funzionalità del settaggio di laboratorio, con particolare riguardo alle misure di overtopping;
- La valutazione delle trasformazioni a costa dei moti ondosì scelti;
- L'individuazione delle fasi principali del lavoro da svolgere in laboratorio, in modo da poter stilare una check-list, da seguire dettagliatamente durante le prove definitive;
- La valutazione della stabilità delle strutture;
- La stima della dissipazione dell'altezza d'onda con la nuova configurazione del canale.

In particolare lo studio delle prove preliminari è rivolto al miglioramento:

- dei parametri caratterizzanti le onde (H, T, durata), scelti nelle fasi di progetto degli esperimenti;
- del settaggio della strumentazione;
- dei materiali costituenti la scogliera emersa e quella radente.

Occorre precisare che per le prove preliminari, per la ricostruzione delle strutture, sono stati usati massi di differenti dimensioni, rispetto alla dimensione del materiale utilizzato nelle prove definitive.

Infatti, per quanto riguarda il giorno 4 Febbraio, i massi costituenti la scogliera radente e quella emersa, sebbene fossero qualitativamente simili e in scala 1:40, non rispettavano fedelmente l'indagine granulometrica, che, come descritto nei paragrafi precedenti, è stata effettuata tenendo conto del parametro di turbolenza di Reynolds e della distribuzione relativa nel prototipo.

Il materiale utilizzato per il primo giorno di prove preliminari era perciò mediamente più piccolo rispetto a quello utilizzato il giorno 11 Febbraio.

5.4.1 Posizionamento delle sonde resistive

Durante la sessione sperimentale preliminare sono state utilizzate sette sonde resistive in ordine numerico crescente a partire dal generatore di moto ondoso (fig. 5.9).

Le sonde in posizione 1 e 2 sono state usate per il calcolo dell'onda generata, invece le sonde 3, 4 e 5, situate davanti alla scogliera emersa, sono state utilizzate per il calcolo dell'onda incidente, ed in particolare le sonde in posizione 4 e 5 per la misura della riflessione. Infine le sonde in posizione 6 e 7, a tergo della scogliera, sono state usate per il calcolo del water set-up e della trasmissione.

In Tabella 5.9 sono rappresentate le posizioni delle sonde resistive e della punta idrometrica nel canale del Laboratorio Costiero, le coordinate z_1 , z_2 , e z_3 indicano le profondità in corrispondenza della sonda per i tre livelli.

Tabella 5.9: Posizione delle sonde in canale, durante le prove preliminari.

Numero Sonda	X[cm]	Y[cm]	Z ₁ [cm]	Z ₂ [cm]	Z ₃ [cm]
1	415	40	48.7	49.7	50.7
2	445	40	48.7	49.7	50.7
3	4101	40	17.4	18.4	19.4
4	4121	40	17.4	18.4	19.4
5	4151	40	17.4	18.4	19.4
6	4374	40	6.9	7.9	8.9
7	4404	40	9.1	10.1	1.1

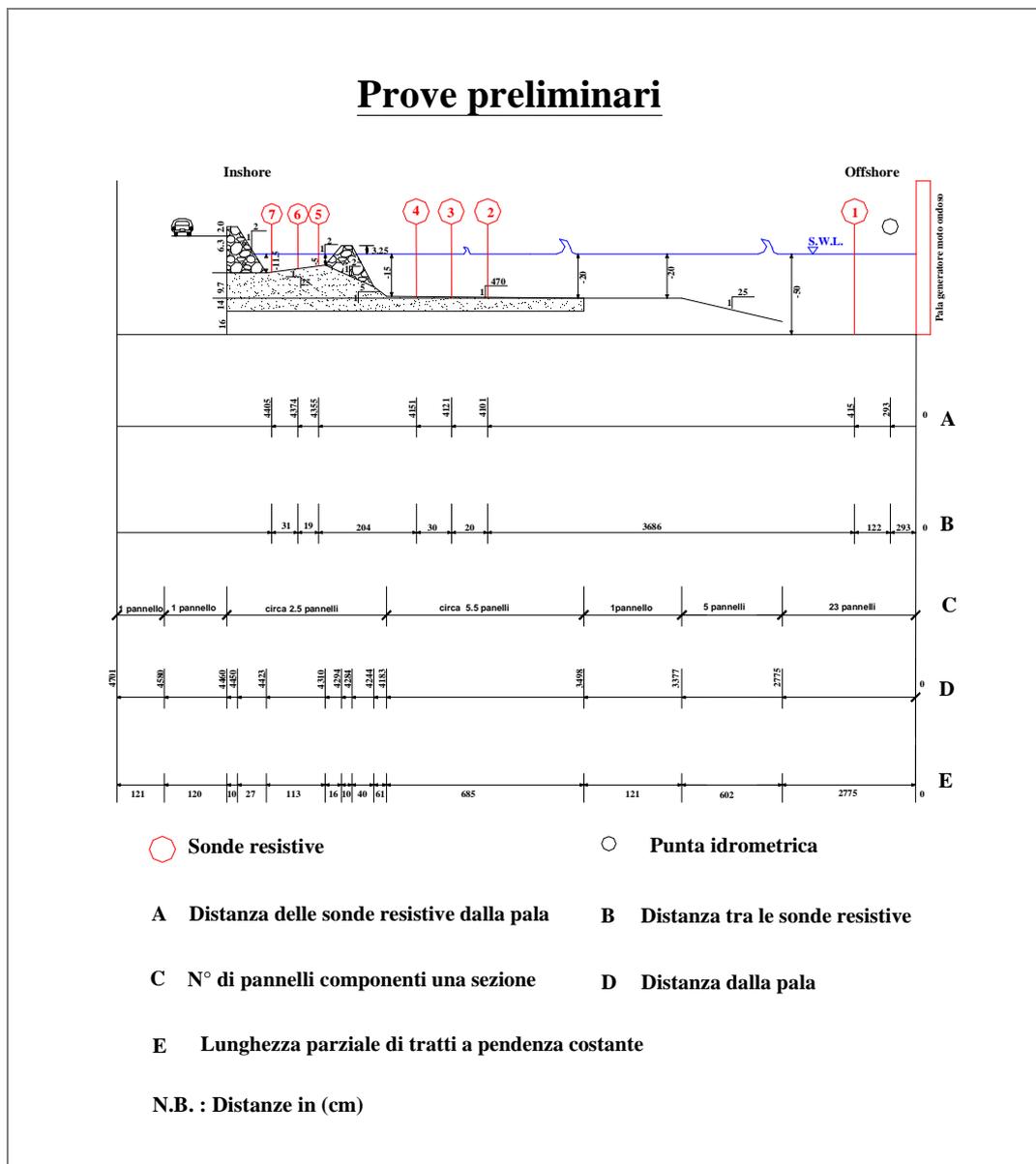


Figura 5.9 - Profilo non in scala del canale del Laboratorio Costiero di Firenze, rappresentante la posizione delle sonde durante la prove preliminari.

5.4.2 Misure di overtopping

La stima dei volumi di overtopping sulla strada litoranea durante le prove è stata valutata attraverso la misura della variazione di livello in una vasca di raccolta.

L'apparato di raccolta primario è composto da un cilindro alto 80 cm e con diametro di 19.5 cm, collegato al piano rappresentante la strada litoranea, attraverso una tubazione inclinata a 45° (diametro 9.4 cm), che svolge la funzione di convogliare nel cilindro l'acqua di overtopping (vedi figura 5.10 e foto 5.1).

Un sifone, preventivamente innescato, trasferisce dal cilindro di raccolta l'acqua di overtopping nella vasca di misurazione.

Infine attraverso l'uso della punta idrometrica posta nella vasca, è possibile la valutazione della variazione di livello, che si verifica durante ogni prova, permettendo così di stimare i volumi di overtopping.

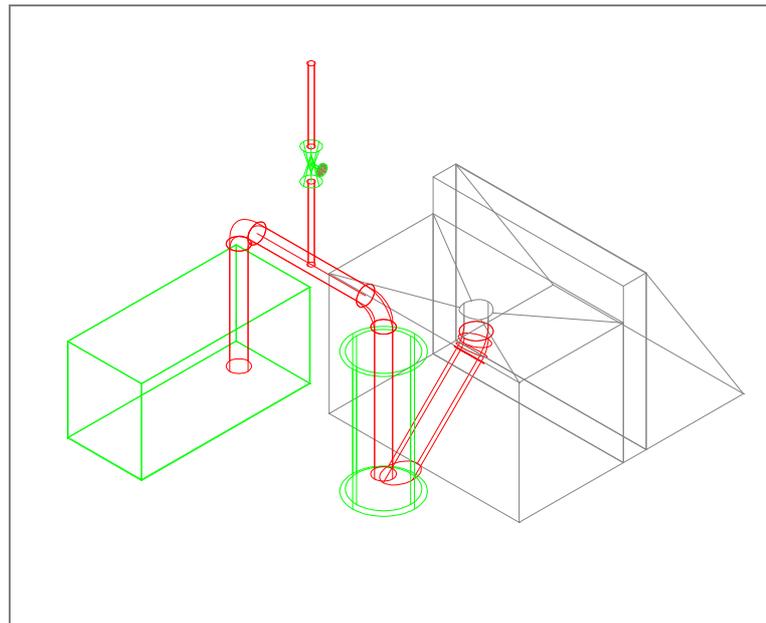


Figura 5.10 - Rappresentazione grafica dell'apparato per la misura dei volumi di overtopping



Foto 5.1 - Componenti dell'apparato per la misura dei volumi di overtopping.

5.4.3 Analisi dei dati delle prove preliminari

Una prima analisi delle prove preliminari consiste nel confronto dei dati target con quelli di generazione.

E' importante ricordare che, nel corso delle prove preliminari, gli esperimenti sono stati svolti con sostanziali differenze rispetto alle prove definitive, in particolare:

- sono state effettuate solo con due livelli idrici F1 e F2;
- le prove hanno avuto una durata di 5 minuti;
- tra un esperimento e il successivo, e dopo l'accensione della pala battionde non è stata rispettata una pausa di 20 minuti, per stabilizzare il livello in canale;
- non sono stati acquisiti i primi 2 minuti ad acqua ferma;
- è stata studiata una sola configurazione, rappresentante la scogliera n°5 emersa, e denominata C1.
- il sistema di ricircolo non è stato azionato.

→ *Livelli idrici*

In Tabella 5.10 si riportano i valori dei livelli idrici in canale, impostanti durante le prove preliminari, con la pompa di retropala spenta.

Tabella 5.10: Valori dei livelli idrici in canale per le prove preliminari.

LIVELLI IDRICI IN CANALE			
Livello F1		Livello F2	
Profondità alla pala [cm]	Lettura punta idrometrica al nonio [cm]	Profondità alla pala [cm]	Lettura punta idrometrica al nonio [cm]
50	20.55	51	19.55

→ *Misura delle onde generate*

In Tabella 5.11 sono riportati i parametri di generazione (registrati dalla sonda in posizione 1) e quelli misurati durante la serie di prove preliminari per ognuno dei due livelli idrici F1 e F2.

Inoltre per valutare la differenza tra i valori di generazione target impostati e i valori delle onde che effettivamente sono generate dalla pala battionde, sono stati confrontate le altezze d'onda generate con le altezze d'onda incidenti, misurate al piede della scogliera. Queste misure permettono anche di verificare la dissipazione lungo il canale, dovuta alla sistemazione dei pannelli costituenti il fondo.

Tabella 5.11: Parametri di generazione e valori misurati durante le prove preliminari.

CODICE ONDA	Data	Parametro H_{m0} di generazione [cm]	Parametro T_p di generazione [sec]	H_{m0i} misurata dalla sonda WG 1 [cm]	H_{m0i} misurata al piede della scogliera [cm]
I1F1C1	04/02/08	10	1.1	9.92	6.57
	11/02/08	10	1.1	10.08	6.54
I2F1C1	04/02/08	10	1.4	12.46	7.09
	11/02/08	10	1.4	12.88	6.92
I3F1C1	04/02/08	10	1.7	10.87	7.7
	11/02/08	10	1.7	10.78	7.22
I4F1C1	04/02/08	15	1.4	15.77	8.31
	11/02/08	15	1.4	15.99	7.97
I5F1C1	04/02/08	14	1.7	14.92	7.84
	11/02/08	15	1.7	14.90	7.57
I6F1C1	04/02/08	18	1.7	17.86	8.20
	11/02/08	18	1.7	17.86	8.11
I1F2C1	04/02/08	10	1.1	9.90	6.93
	11/02/08	10	1.1	9.90	6.85

I2F2C1	04/02/08	10	1.4	12.23	7.14
	11/02/08	10	1.4	12.54	7.31
I3F2C1	04/02/08	10	1.7	10.53	8.02
	11/02/08	10	1.7	10.78	7.22
I4F2C1	04/02/08	15	1.4	16.10	8.86
	11/02/08	15	1.4	16.44	8.71
I5F2C1	04/02/08	15	1.7	14.33	8.43
	11/02/08	15	1.7	14.78	8.34
I6F2C1	04/02/08	18	1.7	18.00	8.42
	11/02/08	18	1.7	17.94	8.69

Dall'esame della tabella risulta evidente una buona corrispondenza, per entrambi i livelli F1 ed F2, tra l'altezza d'onda generata e i valori di altezza d'onda acquisiti dalla sonda in posizione WG1 per tutti gli attacchi ondosi.

→ **Parametri caratteristici registrati durante le prove preliminari**

Una prima analisi della sessione sperimentale consiste nel mettere insieme tutti i dati raccolti durante le prove.

Nella Tabella 5.12 sono riassunti i dati raccolti durante per le prove preliminari, relativi ad ogni attacco ondoso, in particolare:

- H_{m0i} : altezza d'onda incidente al piede della scogliera filtrata dall'onda riflessa (misurata dalle sonde in posizione 3, 4);
- $H_{m0(2-3-4)}$: media delle altezze d'onda misurate dalle sonde in posizione 2, 3 e 4;
- T_p : periodo di picco registrato davanti alla scogliera (media dei T_p misurati dalle sonde in posizione 2, 3, 4);
- T_{m0-i} : periodo medio registrato davanti alla scogliera (media dei T_m misurati dalle sonde in posizione 2, 3, 4);
- **Level WG 2-3-4**: media del livello misurato dalle sonde in posizione 2, 3 e 4.
- H_{m0t} : media delle altezze d'onda trasmesse dietro la scogliera (misurata dalle sonde in posizione 5 e 6);
- T_{pt} : periodo di picco registrato dietro la scogliera (media dei T_p misurati dalle sonde in posizione 5 e 6);
- T_{m0-it} : periodo medio registrato dietro la scogliera (media dei T_m misurati dalle sonde in posizione 5 e 6);
- **Level WG 5-6**: media del livello misurato dalle sonde in posizione 5,6;

Tabella 5.12: Parametri caratteristici registrati durante la serie di prove preliminari.

CODICE ONDA	Data	H _{m0i} [cm]	H _{m0(2-3-4)} [cm]	T _p [sec]	T _{m0-li} [sec]	Level WG 2,3,4 [cm]	H _{m0t} [cm]	T _{pt} [sec]	T _{m0-1t} [sec]	Level WG 5,6 [cm]
I1F1C1	04-02-08	6.57	7.61	1.3	1.9	-0.39	2.5	1.0	2.8	0.91
	11-02-08	6.54	7.76	1.3	0.9	-0.1	2.78	1.0	1.1	0.6
I2F1C1	04-02-08	7.09	8.42	1.6	3.1	-0.12	3.21	13.5	3.9	1.32
	11-02-08	6.92	8.41	1.4	0.8	0.0	3.24	2.5	1.2	1.07
I3F1C1	04-02-08	7.7	9.32	2.1	2.6	-0.40	3.3	2.2	2.8	1.35
	11-02-08	7.22	8.62	1.9	0.7	0.05	3.38	2.3	1.1	0.9
I4F1C1	04-02-08	8.31	9.62	1.6	2.0	-0.01	3.91	2.5	2.6	1.51
	11-02-08	7.97	9.63	1.5	0.8	0.1	4.21	2.5	1.1	1.2
I5F1C1	04-02-08	7.84	9.51	1.8	2.7	-0.14	3.75	2.5	3.2	1.62
	11-02-08	7.57	9.41	1.9	0.7	0.1	3.81	2.8	1.0	1.46
I6F1C1	04-02-08	8.20	9.71	2.3	2.9	-0.10	4.12	7.5	3.4	2.35
	11-02-08	8.11	9.78	2.0	0.7	0.18	4.17	8.1	1.0	1.64
I1F2C1	04-02-08	6.93	7.75	1.2	2.4	-0.05	3.39	13.5	2.7	1.21
	11-02-08	6.85	7.62	1.2	0.8	-0.06	4.65	0.9	1.2	1.21
I2F2C1	04-02-08	7.14	8.41	1.6	2.1	0.02	3.85	18.5	3.4	1.56
	11-02-08	7.31	8.59	1.5	0.8	0.1	3.78	2.5	1.2	1.4
I3F2C1	04-02-08	8.02	9.41	2.1	2.6	-0.01	4.10	2.2	2.6	1.35
	11-02-08	7.22	8.65	2.0	0.7	0.05	3.42	2.2	1.1	0.9
I4F2C1	04-02-08	8.86	10.30	1.6	2.0	0.06	4.71	13.2	3.0	1.92
	11-02-08	8.71	10.22	1.6	0.8	0.1	4.98	2.3	1.1	1.6
I5F2C1	04-02-08	8.43	10.15	1.8	2.3	0.12	4.61	2.5	2.6	2.10
	11-02-08	8.34	9.91	1.6	0.7	-0.06	4.75	2.1	1.1	1.53
I6F2C1	04-02-08	8.42	9.85	1.7	3.2	0.26	4.58	7.5	4.1	2.21
	11-02-08	8.69	10.12	2.1	0.7	0.04	4.89	12.8	0.9	1.85

→ *Dissipazione*

Dall'analisi dei valori di altezza d'onda incidente al piede della scogliera emerge una sostanziale corrispondenza fra la percentuale di dissipazione e l'altezza d'onda incidente e una sostanziale diminuzione della percentuale di dissipazione per il livello idrico più alto F2.

In Tabella 5.13 sono stati riassunti i dati riguardanti la dissipazione percentuale dell'energia, durante la propagazione dell'onda in canale, secondo la formula:

$$\frac{H_{m0gen}^2 - H_{m0i}^2}{H_{m0gen}^2} \cdot 100$$

dove:

- H_{m0gen}: è l'altezza d'onda misurata dalla sonda in posizione 1 (quella più vicina al generatore);
- H_{m0i}: è l'altezza d'onda incidente depurata dall'onda riflessa misurata dalle sonde in posizione 2, 3 e 4.

Tabella 5.13: Dissipazione percentuale per i livelli F1 e F2 durante la serie di prove preliminari.

DISSIPAZIONE ENERGIA D'ONDA			
CODICE ONDA	DATA	LIVELLO F1 [%]	LIVELLO F2 [%]
I1	04-02-08	56.14	51.00
	11-02-08	57.90	52.12
I2	04-02-08	67.62	65.92
	11-02-08	71.13	66.02
I3	04-02-08	49.82	41.99
	11-02-08	55.14	55.14
I4	04-02-08	72.23	69.72
	11-02-08	75.16	71.93
I5	04-02-08	72.39	65.39
	11-02-08	74.19	68.16
I6	04-02-08	78.92	78.12
	11-02-08	79.38	76.54

→ ***Overtopping***

La valutazione del numero di onde che effettuano *overtopping* sulla scogliera radente, data la breve durata delle singole prove, è stata eseguita visivamente. Nel conteggio sono state inserite anche le onde il cui volume di tracimazione non è risultato apprezzabile quantitativamente.

Nelle Tabelle sottostanti sono riportati i risultati relativi al numero e ai volumi di *overtopping* per i 2 giorni di prove.

Tabella 5.14: Misurazioni relative al giorno 04/02/08 per il livello idrico F1.

Livello F1			
Codice onda	N° di overtopping	Volume stimato di overtopping [dm³]	Commenti
I1	0	0	Il run-up delle onde arriva appena sotto il livello di cresta della scogliera radente.
I2	0	0	Il run-up delle onde arriva al livello di cresta della scogliera radente
I3	7	0	C'è tracimazione, ma non è quantificabile
I4	9	0	C'è tracimazione, ma non è quantificabile
I5	21	0.8	-
I6	26	2.8	-

Tabella 5.15: Misurazioni relative al giorno 04/02/08 per il livello F2.

Livello F2			
Codice onda	N° di overtopping	Volume stimato di overtopping [dm³]	Commenti
I1	2	0	Volume non stimabile
I2	19	1.1	-
I3	33	4.5	-
I4	46	5.1	-
I5	62	17.0	-
I6	70	15.3	-

Tabella 5.16: Misurazioni relative al giorno 11/02/08 per il livello F1.

Livello F1			
Codice onda	N° di overtopping	Volume stimato di overtopping [dm³]	Commenti
I1	0	0	Il run-up delle onde arriva appena sotto il livello di cresta della scogliera radente
I2	0	0	Il run-up delle onde arriva appena sotto il livello di cresta della scogliera radente
I3	4	0	C'è tracimazione, ma non è quantificabile
I4	6	0	C'è tracimazione, ma non è quantificabile
I5	18	0.3	-
I6	21	0.5	-

Tabella 5.17: Misurazioni relative al giorno 11/02/08 per il livello F2.

Livello F2			
Codice onda	N° di overtopping	Volume stimato di overtopping [dm³]	Commenti
I1	0	0	Volume non stimabile
I2	14	0.3	-
I3	15	0.5	-
I4	31	1.3	-
I5	52	5	-
I6	50	11.8	-

Dalla lettura delle tabelle e dall'interpretazione dei grafici restituiti per ogni sonda dal programma di analisi dei dati è stata registrata una sostanziale conformità delle prove e una dissipazione dell'energia d'onda del 51% per le onde più piccole con livello più alto, e del 78% per le onde più grandi con livello idrico più basso, inoltre è stato possibile constatare una buona stabilità delle due strutture.

5.5 Prove definitive

Le prove definitive, inerenti lo studio su modello fisico delle ipotesi progettuali per la riqualificazione del sistema di difesa costiero di un tratto del litorale di Marina di Pisa, sono iniziate il 20 Febbraio 2008.

Le sostanziali differenze, rispetto alle prove preliminari sono le seguenti,

- sono state eseguite con tre livelli idrici F0, F1 e F2;
- ogni prova ha avuto una durata di 15 minuti;
- tra un esperimento e il successivo, e dopo l'accensione della pala battionde è stata rispettata una pausa di 20 minuti, per stabilizzare il livello in canale;
- sono stati acquisiti i primi 2 minuti con generatore di moto ondoso spento;
- sono state studiate quattro configurazioni, denominate C1, C1-R, C2 e C3;
- il sistema di ricircolo è stato azionato solo per la configurazione C1-R;
- al termine di ogni prova, la registrazione di ogni sonda, relativa agli ultimi 5 minuti di attacco ondoso, è stata analizzata con il programma “Matlab” (Allegato III). Tale elaborazione restituisce la variazione del livello idrico in canale e l'analisi spettrale delle onde (Allegato IV).

5.5.1 Posizionamento delle sonde resistive

Per le prove definitive è stato deciso di apportare alcune modifiche alla disposizione degli strumenti di acquisizione in canale (fig. 5.11).

La sonda in posizione 3 è stata sostituita, poiché acquisiva dati discordanti, la sonda in posizione 2 è stata spostata e messa in coppia con la sonda in posizione 1 davanti al battionde, per la registrazione delle onde generate.

Infine la sonda 5, che nelle prove preliminari era situata nella zona protetta, per le prove definitive è stata spostata al piede della scogliera, insieme alle sonde 4 e 3.

Prove definitive

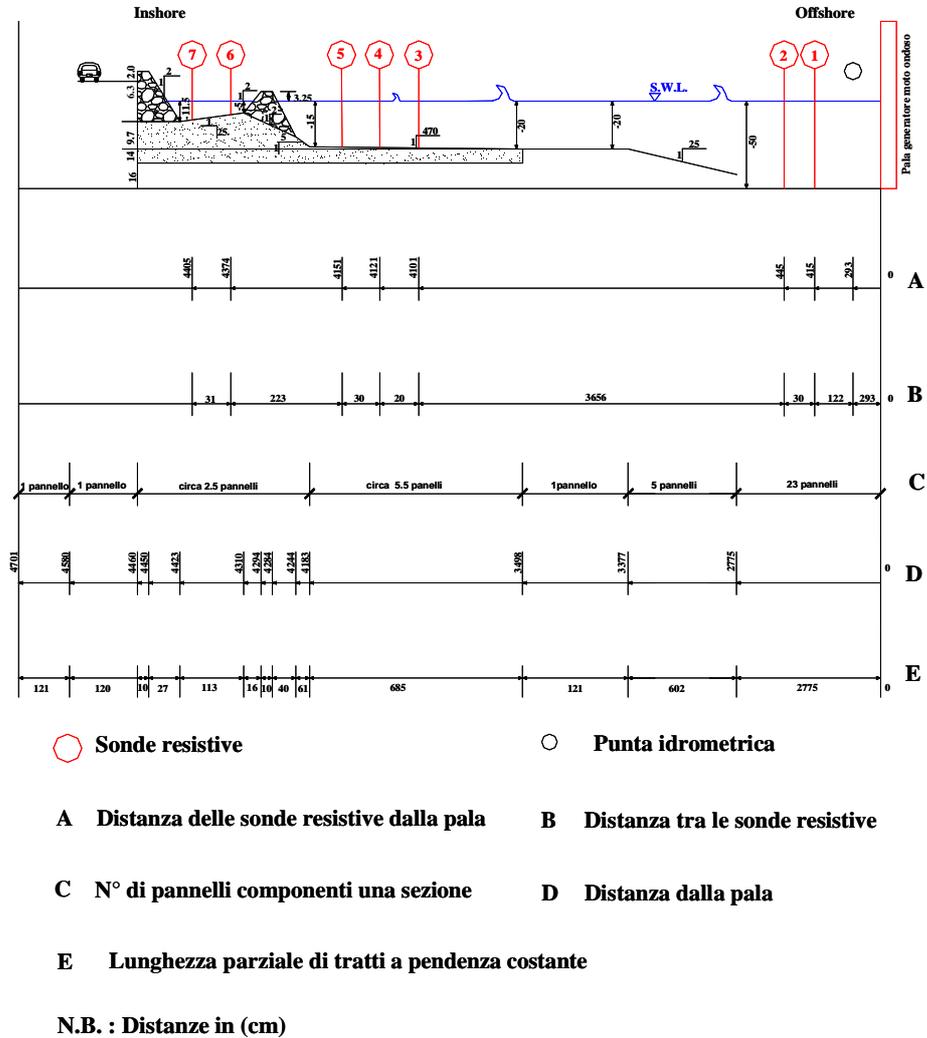


Figura 5.11- Profilo non in scala del canale del Laboratorio Costiero di Firenze, rappresentante la posizione delle sonde durante la prove definitive.

5.5.2 Configurazioni studiate

→ Configurazioni C1 e C1-R

Nei giorni 20-21-22 e 25 Febbraio è stato ricostruito in scala 1:40 il profilo rappresentante la sezione n°2 del tratto di costa in esame (fig. 5.12).

La configurazione, denominata C1, è caratterizzata da una scogliera radente costituita da massi con d_{50} pari a 3.3 cm, larghezza di cresta di 10 cm, e lato inclinato verso mare (1:2) di lunghezza pari a 27 cm, per un volume complessivo di 46 dm³ (foto 5.2).

Il fondale all'interno della zona protetta è formato da un piano, realizzato in sabbia, con pendenza 1:25 e lunghezza pari a 113 cm.



Foto 5.2 - Scogliera radente ricostruita in canale, vista laterale (a sinistra) e frontale (a destra).

La scogliera parallela (foto 5.3) è stata invece costruita con massi aventi d_{50} pari a 3.6 cm, per un volume complessivo di 34 dm³. Il lato obliquo rivolto verso la zona protetta ha un'inclinazione 1:2, e la larghezza della cresta è di 10 cm.

Tale scogliera presenta un freeboard di 3.25 cm, sopra il livello del mare e una pendenza lato mare complessivamente pari a 1:2.

Per il primo ciclo di prove è stato deciso di non simulare la corrente di rip, indotta dai varchi e quindi di eseguire le simulazioni con il sistema di ricircolo spento.

Successivamente nei giorni 28 Febbraio, e 03-06 Marzo, sono state effettuate le prove per la configurazione, denominata C1-R, simulando le suddette correnti di rip, tramite il sistema di ricircolo, in modo da riequilibrare il sovrizzo idrico indotto dall'attacco ondoso, nella zona protetta e permetterci così di non sovradimensionarlo.

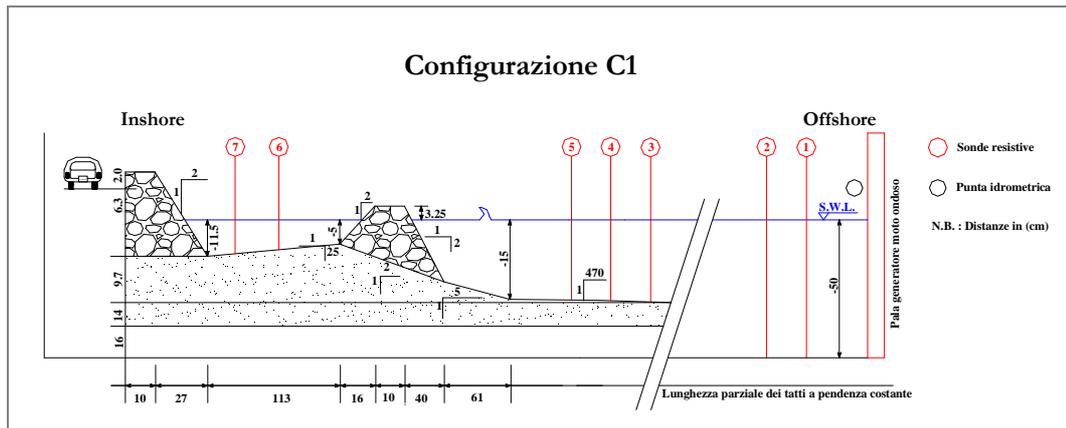


Figura 5.12 - Profilo non in scala rappresentante le strutture della configurazione C1 e C1-R e il posizionamento delle sonde.



Foto 5.3 - Scogliera emersa ricostruita in canale per le configurazioni C1 e C1-R.

→ Configurazione C2

I giorni 17-19 e 20 Marzo sono state eseguite le prove per la configurazione C2 (fig. 5.13 e foto 5.4), che rappresenta, insieme alla configurazione C3, una delle ipotesi progettuali studiate per conto della Provincia di Pisa.

La scogliera radente rimane immutata nelle quattro configurazioni, l'unica struttura che subisce delle variazioni è la scogliera parallela.

La configurazione C2 è stata ricostruita a partire dalla configurazione C1, portando la cresta della scogliera parallela, fino ad un freeboard pari a -2.5 cm, sotto il livello del mare (-1 m nel prototipo). Lo stesso materiale rimosso (circa 10.3 dm³), è stato poi posto al piede esterno della struttura, per incrementare la larghezza della cresta fino a 50 cm (20 m nel prototipo).

Inoltre è stata modificata la pendenza del lato mare che presenta un'inclinazione 1:2.5, mentre la pendenza del lato rivolto verso la zona protetta resta immutata rispetto alla configurazione precedente.

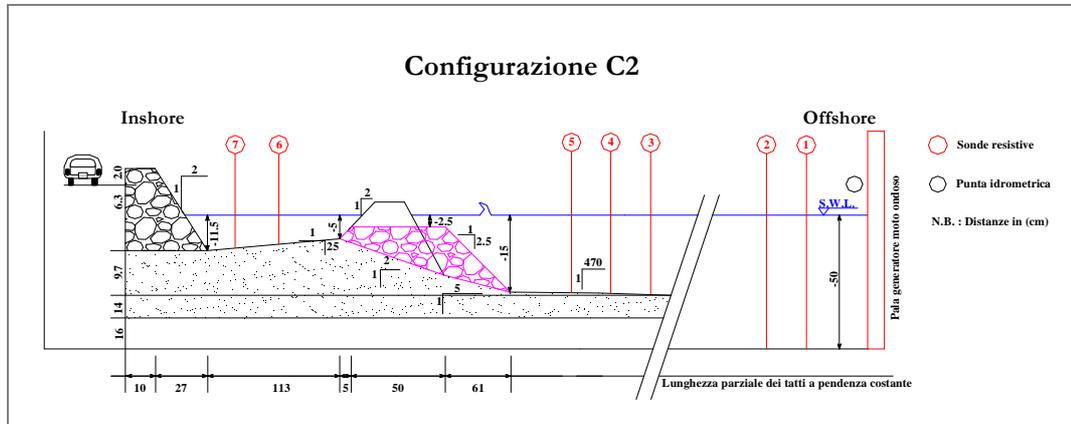


Figura 5.13 - Profilo non in scala rappresentante le strutture della configurazione C2 e il posizionamento delle sonde.



Foto 5.4 - Scogliera emersa ricostruita in canale per la configurazione C2.

→ Configurazione C3

I giorni 9-10-15 e 16 Aprile è stata ricostruita l'ultima configurazione studiata in questa sessione sperimentale, denominata C3 (fig. 5.14 e foto 5.4).

Per tale configurazione è stata costruita una scogliera sommersa, con stesso freeboard di quella rappresentante la configurazione C2, ma con una larghezza di cresta pari a 80 cm (32 m nel prototipo) ed un volume di 88 dm³.

La struttura è stata realizzata aggiungendo al piede esterno materiale dotato delle stesse caratteristiche granulometriche viste per la scogliera della configurazione C1.

Per questa struttura la pendenza del lato obliquo verso mare è 1:5, mentre la pendenza del lato rivolto verso la zona protetta resta immutata rispetto alla configurazione precedente.

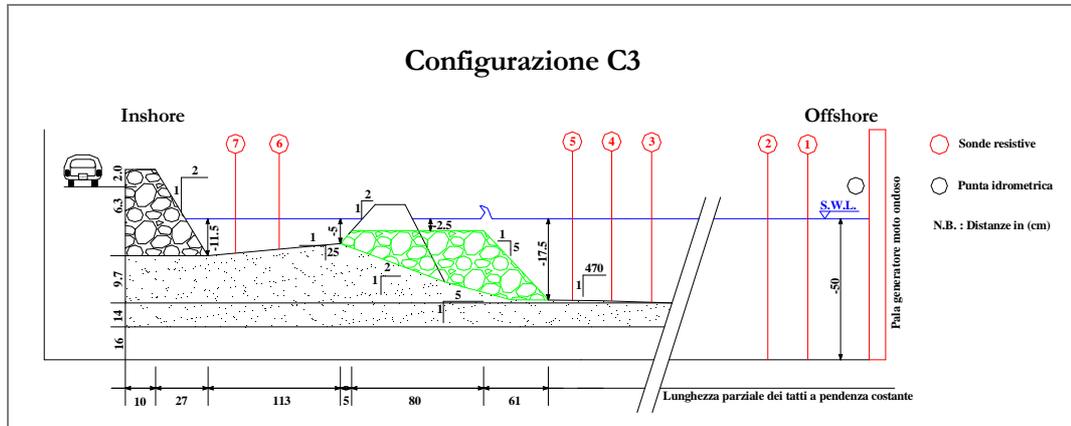


Figura 5.14 - Profilo non in scala rappresentante le strutture della configurazione C3e il posizionamento delle sonde.



Foto 5.5 - Scogliera emersa ricostruita in canale per la configurazione C3.

Infine sia per la configurazione C2 che per la C3 è stato deciso di non azionare il sistema di ricircolo, dato che il sovrizzo idrico dovuto all'attacco ondoso per queste due configurazioni non è risultato rilevante.

6. Analisi e interpretazione dei risultati

6.1 Analisi di I livello

L'obiettivo principale di questa analisi detta "di primo livello" è quello di calcolare i parametri caratteristici del moto ondoso (altezze e periodi) e i volumi di tracimazione, mediante l'analisi dei dati acquisiti dagli strumenti utilizzati. Questa analisi viene effettuata subito dopo l'esecuzione di ogni singola prova e permette anche di verificare il corretto funzionamento della strumentazione.

A seguito di questa analisi, i parametri ottenuti vengono utilizzati nell'analisi detta "di secondo livello" finalizzata allo studio delle relazioni tra i fenomeni caratteristici del modello in esame e le grandezze progettuali dell'opera.

6.1.1 Coefficienti di calibrazione

L'analisi dei coefficienti di calibrazione è una procedura eseguita all'inizio di ogni giornata di esperimenti e permette di verificare sia l'accuratezza della calibrazione, sia l'esistenza di qualche eventuale anomalia nell'apparato strumentale.

In particolare nella Tabella 6.1 viene riportato l'errore medio di calibrazione, per ogni sonda e per ogni giornata di prove.

Tabella 6.1: Errore medio di calibrazione associato ad ogni sonda.

Data	Errore medio di calibrazione per ogni sonda [cm]						
	WG1 (P)	WG2 (Q)	WG3 (F)	WG4 (I)	WG5 (A)	WG6 (M)	WG7 (N)
20-02-08 (C1F2)	0.0120	0.2001	0.1390	0.1390	0.0600	0.0486	0.0346
21-02-08 (C1F2)	0.0077	0.3168	0.1407	0.1407	0.0413	0.0539	0.0401
22-02-08 (C1F1)	0.0019	0.2737	0.1407	0.1407	0.0601	0.1317	0.0489
25-02-08 (C1F0)	0.0038	0.2329	0.0996	0.0996	0.0797	0.0498	0.0266
28-02-08 (C1F1R)	0.0616	0.3262	0.1090	0.1090	0.0702	0.1686	0.0287
03-03-08 (C1F2R)	0.0144	0.3219	0.0705	0.0705	0.0578	0.1127	0.0163
06-03-08 (C1F0R)	0.0035	0.2721	0.0830	0.0830	0.0803	0.0193	0.0265
17-03-08 (C2F0)	0.0368	0.3428	0.1111	0.0610	0.0724	0.1813	0.0921
19-03-08 (C2F1)	0.0428	0.3799	0.0878	0.0462	0.1335	0.1616	0.0180
20-03-08 (C2F2)	0.0564	0.3611	0.0176	0.0055	0.1044	0.1421	0.0063

09-04-08 (C3F0)	0.0239	0.4210	0.0754	0.0451	0.0816	0.0138	0.0109
10-04-08 (C3F1)	0.0513	0.4127	0.0287	0.0365	0.0154	0.0164	0.0085
15-04-08 (C3F2)	0.0776	0.4233	0.0298	0.0056	0.0102	0.0038	0.0062
16-04-08 (C3F2)	0.0661	0.3907	0.0272	0.0034	0.0083	0.0234	0.0050
Media	0.0328	0.3339	0.0829	0.0704	0.0625	0.0805	0.0263

Dall'esame della tabella si può notare che mediamente le sonde presentano errori molto bassi, che a loro volta implicano una buona precisione.

La sonda Q in posizione 2, invece, ha un errore medio di circa 3.3 mm, al di sopra del limite per una buona calibrazione, che è di 2 mm. Nonostante sia stata ripetuta più volte la calibrazione di tale sonda, è stato deciso di accettarne comunque l'errore, dato che non è situata in una posizione chiave per le misure che si vogliono effettuare in questa sessione sperimentale.

6.1.2 Deviazione standard

Durante le prove definitive della sessione sperimentale è stato impostato il programma di generazione "Labview" per acquisire, per i primi 2 minuti, i livelli idrici in canale con il generatore d'onda spento. Questa acquisizione permette di registrare il sovrizzo rispetto allo "zero" della calibrazione, dovuto all'accensione della pompa di retro-pala e all'eventuale accensione della pompa di ricircolo.

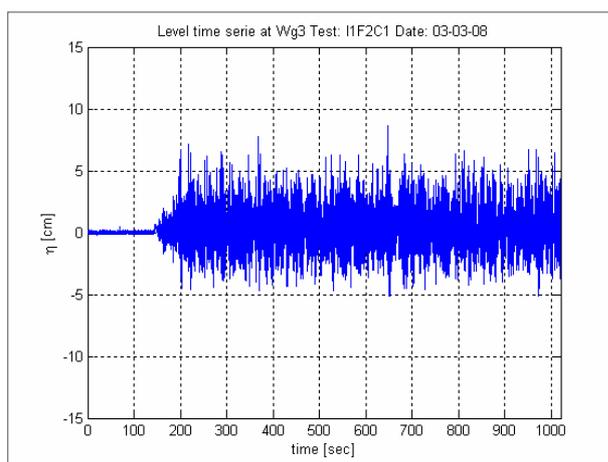


Figura 6.1 - Segnale acquisito dalla sonda in posizione 3 durante la prova "I1F2C1" del 03-03-08 con la pompa di ricircolo accesa.

In figura 6.1 è riportato il segnale registrato da una sonda resistiva durante un attacco ondoso; nella parte iniziale della curva, è possibile notare l'andamento del livello idrico

durante i primi 2 minuti, che rappresenta il livello di “zero”, da cui sono stati calcolati i successivi livelli nel corso dell’attacco ondoso.

Il segnale acquisito durante i primi 2 minuti è analizzato con il programma “Matlab”, che restituisce una stringa con i valori di “zero” rispetto al livello acquisito durante la calibrazione, e una stringa con la deviazione standard del segnale registrata durante i primi 2 minuti di acquisizione per ogni sonda.

Nelle Tabelle seguenti, sono riportate le deviazioni standard del segnale nel corso degli attacchi ondosi, per ogni sonda e per ogni configurazione studiata.

Questi dati rilevano, sia il corretto funzionamento delle sonde, che l’effettivo stato di calma nel canale, necessario per effettuare accuratamente le misure relative agli attacchi ondosi.

Tabella 6.2: Deviazioni standard per il livello F0, relative alla configurazione C1 senza ricircolo.

Deviazione standard per ogni sonda livello F0 senza ricircolo [cm]							
Codice Onda	WG1	WG2	WG3	WG4	WG5	WG6	WG7
I1F0C1	0.0288	0.0855	0.0950	0.0210	0.0264	0.0128	0.0096
I2F0C1	0.0282	0.0202	0.0927	0.0218	0.0265	0.0157	0.0165
I3F0C1	0.0337	0.0204	0.1031	0.0305	0.0339	0.0338	0.0348
I4F0C1	0.0325	0.0208	0.1025	0.0304	0.0342	0.0381	0.0372
I5F0C1	0.0403	0.0327	0.1113	0.0478	0.0512	0.0564	0.0541
I6F0C1	0.0348	0.0273	0.106	0.0334	0.0376	0.0432	0.0413
Media per ogni sonda	0.0331	0.0345	0.1018	0.0308	0.0350	0.0333	0.0323
4*Deviazione standard	0.1324	0.1380	0.4072	0.1232	0.1400	0.1332	0.1292

Tabella 6.3: Deviazioni standard per il livello F1, relative alla configurazione C1 senza ricircolo.

Deviazione standard per ogni sonda livello F1 senza ricircolo [cm]							
Codice Onda	WG1	WG2	WG3	WG4	WG5	WG6	WG7
I1F1C1	0.0354	0.0258	0.0944	0.0324	0.0368	0.0293	0.0257
I2F1C1	0.0314	0.0238	0.0966	0.0360	0.0399	0.0513	0.0460
I3F1C1	0.0412	0.0370	0.0995	0.0438	0.0472	0.0500	0.0460
I4F1C1	0.0346	0.0295	0.0968	0.0302	0.0342	0.0445	0.0402
I5F1C1	0.0321	0.0270	0.0996	0.0357	0.0394	0.0506	0.0462
I6F1C1	0.0403	0.0309	0.1056	0.0480	0.0507	0.0575	0.0505
Media per ogni sonda	0.0358	0.0290	0.0988	0.0377	0.0414	0.0472	0.0424
4*Deviazione standard	0.1432	0.1160	0.3952	0.1508	0.1656	0.1888	0.1696

Tabella 6.4: Deviazioni standard per il livello F2, relative alla configurazione C1 senza ricircolo.

Deviazione standard per ogni sonda livello F2 senza ricircolo [cm]							
Codice Onda	WG1	WG2	WG3	WG4	WG5	WG6	WG7
I1F2C1	0.0290	0.0199	0.0936	0.0254	0.0317	0.0257	0.0241
I2F2C1	0.0344	0.0251	0.0920	0.0361	0.0402	0.0469	0.0462
I3F2C1	0.0349	0.0237	0.0918	0.0346	0.0387	0.0429	0.0421
I4F2C1	0.0371	0.0355	0.0930	0.0366	0.0410	0.0506	0.0493
I5F2C1	0.0404	0.0371	0.0966	0.0428	0.0461	0.0533	0.0510
I6F2C1	0.0324	0.0240	0.0926	0.0332	0.0368	0.0430	0.0434
Media per ogni sonda	0.0347	0.0276	0.0933	0.0348	0.0391	0.0437	0.0427
4*Deviazione standard	0.1388	0.1104	0.3732	0.1392	0.1564	0.1748	0.1708

Tabella 6.5: Deviazioni standard per il livello F0, relative alla configurazione C1 con ricircolo.

Deviazione standard per ogni sonda livello F0 con ricircolo [cm]							
Codice Onda	WG1	WG2	WG3	WG4	WG5	WG6	WG7
I1F0C1R	0.0368	0.0238	0.0816	0.0277	0.0335	0.0296	0.0269
I2F0C1R	0.0389	0.0240	0.0849	0.0349	0.0398	0.0369	0.0339
I3F0C1R	0.0362	0.0244	0.0842	0.0300	0.0359	0.0301	0.0278
I4F0C1R	0.0320	0.0245	0.0823	0.0313	0.0381	0.0314	0.0294
I5F0C1R	0.0310	0.0245	0.0832	0.0307	0.0364	0.0337	0.0309
I6F0C1R	0.0309	0.0236	0.0820	0.0321	0.0376	0.0327	0.0309
Media per ogni sonda	0.0343	0.0241	0.0830	0.0311	0.0369	0.0324	0.0300
4*Deviazione standard	0.1372	0.0964	0.3320	0.1244	0.1476	0.1296	0.1200

Tabella 6.6: Deviazioni standard per il livello F1, relative alla configurazione C1 con ricircolo.

Deviazione standard per ogni sonda livello F1 con ricircolo [cm]							
Codice Onda	WG1	WG2	WG3	WG4	WG5	WG6	WG7
I1F1C1R	0.0300	0.0283	0.0887	0.0320	0.0381	0.0331	0.0281
I2F1C1R	0.0320	0.0238	0.0905	0.0343	0.0393	0.0392	0.0324
I3F1C1R	0.0421	0.0336	0.0995	0.0537	0.0570	0.0548	0.0471
I4F1C1R	0.0344	0.0294	0.0921	0.0436	0.0480	0.0511	0.0433
I5F1C1R	0.0323	0.0224	0.0874	0.0370	0.0418	0.0392	0.0320
I6F1C1R	0.0408	0.0320	0.0939	0.0510	0.0530	0.0567	0.0482
Media per ogni sonda	0.0353	0.0283	0.0920	0.0419	0.0462	0.0457	0.0385
4*Deviazione standard	0.1412	0.1132	0.3680	0.1676	0.1848	0.1828	0.1540

Tabella 6.7: Deviazioni standard per il livello F2, relative alla configurazione C1 con ricircolo.

Deviazione standard per ogni sonda livello F2 con ricircolo [cm]							
Codice Onda	WG1	WG2	WG3	WG4	WG5	WG6	WG7
I1F2C1R	0.0389	0.0338	0.0866	0.0497	0.0544	0.0426	0.0457
I2F2C1R	0.0369	0.0303	0.0876	0.0430	0.0488	0.0349	0.0362
I3F2C1R	0.0451	0.0367	0.0876	0.0410	0.0478	0.0352	0.0362
I4F2C1R	0.0352	0.0291	0.0866	0.0430	0.0487	0.0340	0.0355
I5F2C1R	0.0370	0.0293	0.0884	0.0448	0.0503	0.0412	0.0428
I6F2C1R	0.0364	0.0302	0.0869	0.0443	0.0507	0.0394	0.0401
Media per ogni sonda	0.0383	0.0316	0.0873	0.0443	0.0501	0.0379	0.0394
4*Deviazione standard	0.1532	0.1264	0.3492	0.1772	0.2004	0.1516	0.1576

Tabella 6.8: Deviazioni standard per il livello F0, relative alla configurazione C2.

Deviazione standard per ogni sonda livello F0 senza ricircolo [cm]							
Codice Onda	WG1	WG2	WG3	WG4	WG5	WG6	WG7
I1F0C2	0.0481	0.0427	0.0978	0.0658	0.0692	0.0888	0.0821
I2F0C2	0.0326	0.0264	0.0752	0.0317	0.0375	0.0578	0.0561
I3F0C2	0.0444	0.0358	0.0794	0.0422	0.0471	0.0696	0.0653
I4F0C2	0.0378	0.0321	0.0831	0.0481	0.0526	0.0725	0.0689
I5F0C2	0.0319	0.0227	0.0692	0.0304	0.0353	0.0412	0.0398
I6F0C2	0.0413	0.0353	0.0820	0.0498	0.0548	0.0868	0.0821
Media per ogni sonda	0.0394	0.0325	0.0811	0.0447	0.0494	0.0695	0.0657
4*Deviazione standard	0.1574	0.1300	0.3245	0.1787	0.1977	0.2778	0.2629

Tabella 6.9: Deviazioni standard per il livello F1, relative alla configurazione C2.

Deviazione standard per ogni sonda livello F1 senza ricircolo [cm]							
Codice Onda	WG1	WG2	WG3	WG4	WG5	WG6	WG7
I1F1C2	0.0256	0.0179	0.0641	0.0159	0.0242	0.0165	0.0200
I2F1C2	0.0303	0.0200	0.0632	0.0235	0.0297	0.0529	0.0701
I3F1C2	0.0386	0.0332	0.0717	0.0434	0.0485	0.0799	0.1059
I4F1C2	0.0446	0.0375	0.0825	0.0611	0.0643	0.0958	0.1272
I5F1C2	0.0321	0.0255	0.0661	0.0344	0.0385	0.0545	0.0741
I6F1C2	0.0383	0.0301	0.0714	0.0420	0.0470	0.0940	0.1246
Media per ogni sonda	0.0349	0.0274	0.0698	0.0367	0.0420	0.0656	0.0870
4*Deviazione standard	0.1397	0.1095	0.2793	0.1469	0.1681	0.2624	0.3479

Tabella 6.10: Deviazioni standard per il livello F2, relative alla configurazione C2.

Deviazione standard per ogni sonda livello F2 senza ricircolo [cm]							
Codice Onda	WG1	WG2	WG3	WG4	WG5	WG6	WG7
I1F2C2	0.0270	0.0175	0.0680	0.0215	0.0282	0.0260	0.0238
I2F2C2	0.0403	0.0327	0.0812	0.0489	0.0549	0.0734	0.0673
I3F2C2	0.0467	0.0416	0.0834	0.0569	0.0626	0.0937	0.0856
I4F2C2	0.0376	0.0266	0.0728	0.0462	0.0503	0.0791	0.0737
I5F2C2	0.0487	0.0421	0.0810	0.0606	0.0654	0.0922	0.0831
I6F2C2	-	-	-	-	-	-	-
Media per ogni sonda	0.0401	0.0321	0.0773	0.0468	0.0523	0.0729	0.0667
4*Deviazione standard	0.1602	0.1284	0.3091	0.1873	0.2091	0.2915	0.2668

Tabella 6.11: Deviazioni standard per il livello F0, relative alla configurazione C3.

Deviazione standard per ogni sonda livello F0 senza ricircolo [cm]							
Codice Onda	WG1	WG2	WG3	WG4	WG5	WG6	WG7
I1F0C3	0.0867	0.0871	0.1121	0.0977	0.1060	0.1877	0.1958
I2F0C3	0.0850	0.0856	0.1143	0.1024	0.1097	0.1539	0.1600
I3F0C3	0.0687	0.0671	0.0817	0.0649	0.0732	0.1569	0.1621
I4F0C3	0.0622	0.0597	0.0863	0.0696	0.0770	0.1642	0.1695
I5F0C3	0.0486	0.0440	0.0796	0.0610	0.0674	0.1028	0.1077
I6F0C3	0.0587	0.0569	0.0846	0.0649	0.0729	0.1264	0.1313
Media per ogni sonda	0.0683	0.0667	0.0931	0.0768	0.0844	0.1487	0.1544
4*Deviazione standard	0.2733	0.2669	0.3724	0.3070	0.3375	0.5946	0.6176

Tabella 6.12: Deviazioni standard per il livello F1, relative alla configurazione C3.

Deviazione standard per ogni sonda livello F1 senza ricircolo [cm]							
Codice Onda	WG1	WG2	WG3	WG4	WG5	WG6	WG7
I1F1C3	0.0494	0.0462	0.0741	0.0608	0.0651	0.1180	0.1251
I2F1C3	0.0516	0.0457	0.0653	0.0445	0.0492	0.1037	0.1100
I3F1C3	0.0630	0.0569	0.0784	0.0645	0.0707	0.1325	0.1399
I4F1C3	0.0573	0.0517	0.0715	0.0537	0.0596	0.1049	0.1100
I5F1C3	0.0592	0.0536	0.0749	0.0591	0.0637	0.1631	0.1695
I6F1C3	0.0510	0.0453	0.0693	0.0515	0.0577	0.1111	0.1161
Media per ogni sonda	0.0553	0.0499	0.0723	0.0557	0.0610	0.1222	0.1284
4*Deviazione standard	0.2210	0.1996	0.2890	0.2227	0.2440	0.4889	0.5137

Tabella 6.13: Deviazioni standard per il livello F2, relative alla configurazione C3.

Deviazione standard per ogni sonda livello F2 senza ricircolo [cm]							
Codice Onda	WG1	WG2	WG3	WG4	WG5	WG6	WG7
I1F2C3	0.0584	0.0513	0.0708	0.0606	0.0641	0.1167	0.1235
I2F2C3	0.0485	0.0451	0.0727	0.0594	0.0654	0.1019	0.1088
I3F2C3	0.0814	0.0766	0.0924	0.0841	0.0909	0.1732	0.1789
I4F2C3	0.0711	0.0666	0.0872	0.0758	0.0796	0.1596	0.1688
I5F2C3	0.0665	0.0598	0.0941	0.0854	0.0910	0.1627	0.1687
I6F2C3	0.0685	0.0635	0.0716	0.0602	0.0660	0.1538	0.1606
Media per ogni sonda	0.0657	0.0605	0.0815	0.0709	0.0762	0.1447	0.1516
4*Deviazione standard	0.2629	0.2419	0.3259	0.2837	0.3047	0.5786	0.6062

Dall'esame delle tabelle relative alle deviazioni standard per ogni livello e configurazione, si può rilevare un malfunzionamento della sonda in posizione 7, soprattutto per le configurazioni C2 e C3, quindi per ottenere misure accurate dell'altezza d'onda trasmessa e del livello idrico a tergo della scogliera, è stato scelto di utilizzare le acquisizioni della sonda in posizione 6.

6.2 Analisi preliminare della sessione sperimentale

6.2.1 Prove relative alla configurazione C1 senza ricircolo

Nei giorni 20-21-22 e 25 Febbraio sono state effettuate le prove definitive per la configurazione C1, con il sistema di ricircolo spento, rappresentante il modello dello stato attuale della sezione mediana della scogliera parallela emersa n°5.

→ *Livelli idrici in canale*

In Tabella 6.14 sono riportati i livelli idrici in canale con la pompa di retropala spenta.

Tabella 6.14: Livelli idrici impostati in canale per la configurazione C1 con sistema di ricircolo spento.

Livelli idrici in canale [cm]					
F0		F1		F2	
Profondità alla pala [cm]	Lettura al nonio della punta idrometrica [cm]	Profondità alla pala [cm]	Lettura al nonio della punta idrometrica [cm]	Profondità alla pala [cm]	Lettura al nonio della punta idrometrica [cm]
49	21.55	50	20.55	51	19.55

→ **Rilievi della quota della cresta della struttura**

All'inizio di ogni prova è stato eseguito il rilievo della quota della struttura, portando il livello dell'acqua in canale, tangente alla cresta della scogliera, ed effettuando la lettura alla punta idrometrica.

In Tabella 6.15 sono riportate le letture della quota della cresta, effettuate alla punta idrometrica, relative alla data e al livello di prova.

Gli esperimenti relativi alla configurazione C1, con sistema di ricircolo spento, sono stati eseguiti in quattro sessioni giornaliere. Ogni giorno di prova sono stati lanciati sei attacchi ondosi relativi ad un livello idrico, fatta eccezione per le prove riguardanti il livello F2, che per problemi di tempo sono state eseguite in due giorni distinti.

Tabella 6.15: Rilievi della quota della cresta della scogliera per le prove relative alla configurazione C1 con sistema di ricircolo spento.

Rilievi della quota della cresta [cm]		
DATA	LIVELLO DI PROVA	Lettura del livello della cresta della scogliera
25/02/2008	F0	15.40
22/02/2008	F1	15.38
21/02/2008	F2 (I3,I4,I5,I6)	15.40
20/02/2008	F2 (I1,I2)	15.34

→ **Parametri caratteristici registrati durante la serie di prove**

Dato che una prima analisi della sessione sperimentale, consiste nel mettere insieme tutti i dati raccolti durante le prove, in Tabella 6.16 sono riassunti i dati raccolti per ogni attacco ondoso, nella sessione sperimentale per la configurazione C1, con sistema di ricircolo spento, in particolare:

- **H_{m0i}** : altezza d'onda incidente al piede della scogliera filtrata dall'onda riflessa (misurata dalle sonde in posizione 4, 5);
- **K_r** : coefficiente di riflessione dell'onda incidente al piede della scogliera (misurata dalle sonde in posizione 4, 5);
- **T_p** : periodo di picco registrato davanti alla scogliera (media dei T_p misurati dalle sonde in posizione 3, 4, 5);
- **T_{m0-i}** : periodo medio registrato davanti alla scogliera (media dei T_m misurati dalle sonde in posizione 3, 4, 5);
- **Level WG 3-4-5**: media del livello misurato dalle sonde in posizione 3, 4, 5.

- H_{m0t} : altezza d'onda trasmessa dietro la scogliera (misurata dalla sonda in posizione 6);
- T_{pt} : periodo di picco registrato dietro la scogliera (T_p misurato dalla sonda in posizione 6);
- T_{m0-t} : periodo medio registrato dietro la scogliera (T_m misurato dalla sonda in posizione 6);
- **Level WG 6**: livello misurato dalla sonda in posizione 6;
- **Freeboard**: differenza fra la lettura, alla punta idrometrica del livello idrico tangente alla cresta della scogliera, eseguita all'inizio di ogni giorno di prove, e la lettura alla punta idrometrica fatta nei 2 minuti di acquisizione a generatore spento per ogni attacco ondososo.

Tabella 6.16: Parametri caratteristici registrati per la configurazione C1 senza ricircolo.

Codice Onda	H_{m0i} [cm]	K_r	T_p [sec]	T_{m0-i} [sec]	Level WG 3-4-5 [cm]	H_{m0t} [cm]	T_{pt} [sec]	T_{m0-t} [sec]	Level WG 6 [cm]	Freeboard [cm]
I1F0C1	6.67	0.35	1.1	1.9	-0.06	2.50	1.2	2.8	0.83	5.15
I2F0C1	7.38	0.41	1.4	2.1	-0.10	3.26	1.5	2.2	1.09	5.15
I3F0C1	7.56	0.44	1.8	2.6	-0.09	3.46	1.7	3.5	1.11	5.15
I4F0C1	8.16	0.43	1.4	2.6	0.08	3.66	1.6	3.7	1.53	5.15
I5F0C1	8.60	0.43	1.9	3.2	0.07	4.09	25.6	5.1	1.68	5.15
I6F0C1	8.85	0.46	1.8	3.3	0.25	3.97	25.6	5.2	1.80	5.15
I1F1C1	6.81	0.36	1.2	1.9	-0.04	3.2	1.2	3.0	0.94	4.30
I2F1C1	7.56	0.42	1.4	2.1	-0.11	4.06	1.5	2.3	1.27	4.13
I3F1C1	7.89	0.45	1.8	2.7	-0.11	4.23	1.7	3.7	1.35	4.13
I4F1C1	8.48	0.42	1.5	2.6	0.04	4.59	1.6	3.6	1.85	4.14
I5F1C1	8.90	0.43	1.6	3.0	-0.01	4.86	25.6	4.4	1.98	4.14
I6F1C1	9.16	0.45	1.9	3.5	0.16	5.05	25.6	4.7	2.08	4.16
I1F2C1	7.03	0.33	1.2	2.0	-0.14	3.38	1.2	2.9	1.02	3.38
I2F2C1	7.85	0.38	1.4	2.3	-0.15	4.45	1.5	2.0	1.38	3.33
I3F2C1	8.05	0.43	1.9	2.9	-0.15	4.41	1.7	3.6	1.44	3.22
I4F2C1	8.70	0.39	1.5	2.3	0.03	4.93	1.5	2.7	1.96	3.18
I5F2C1	9.36	0.41	1.8	2.8	-0.06	5.27	1.6	3.8	2.03	3.21
I6F2C1	9.38	0.42	1.8	3.4	0.06	5.39	1.6	4.8	2.10	3.24

→ **Overtopping**

L'acqua che tracima sul piano rappresentante la strada litoranea, è stata convogliata attraverso un apposito apparato in una vasca di raccolta, nella quale per mezzo di letture effettuate alla punta idrometrica, prima e dopo ogni attacco ondososo, è stato possibile stimare il volume di overtopping.

Inoltre è stato effettuato il conteggio del numero di tracimazioni, e sono state distinte in “Green Water”, quando avvolgono e oltrepassano la scogliera radente, e “White Water”, quando oltrepassano la scogliera radente manifestandosi solo come spray, generato dal frangimento dell’onda sulla scogliera stessa.

In Tabella 6.17 sono riportati: il numero di Green Water e di White Water, le letture effettuate all’inizio e alla fine di ogni prova, e i rispettivi volumi stimati attraverso la curva di calibrazione (fig. 6.2).

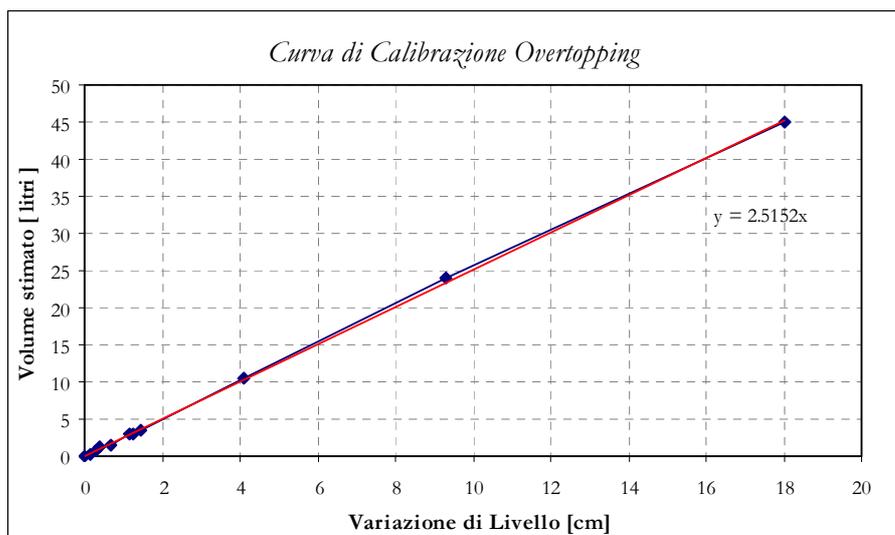


Figura 6.2 - Curva di calibrazione per la stima dei volumi di overtopping.

Tabella 6.17: Misure di overtopping, relative alla configurazione C1 senza ricircolo.

Codice Onda	N° Green Water	N° White Water	Letture iniziale [cm]	Letture finale [cm]	Δlivello [cm]	Volume di Overtopping [litri]
I1F0C1	0	0	7.15	7.15	0	0
I2F0C1	0	4	7.15	7.15	0	0
I3F0C1	0	6	7.15	7.15	0	0
I4F0C1	0	7	7.15	7.15	0	0
I5F0C1	1	24	7.15	7.82	0.67	1.61
I6F0C1	6	39	7.82	8.20	0.38	1.17
I1F1C1	0	1	6.78	6.78	0	0
I2F1C1	0	14	6.78	6.78	0	0
I3F1C1	2	19	7.01	7.01	0	0
I4F1C1	5	19	7.01	7.15	0.14	0.25
I5F1C1	23	46	7.15	8.30	1.15	2.99
I6F1C1	46	59	8.3	12.4	4.10	10.52
I1F2C1	0	0	10.13	10.13	0	0
I2F2C1	1	14	10.13	10.44	0.31	0.74
I3F2C1	20	28	6.34	7.60	1.26	3.10
I4F2C1	28	40	7.60	9.03	1.43	3.57
I5F2C1	80	48	9.03	18.32	9.29	24.06
I6F2C1	118	31	5.76	23.80	18.04	44.97

6.2.2 Prove relative alla configurazione C1 con ricircolo

Nei giorni 28 Febbraio e 03-06 Marzo sono state svolte le prove definitive per la configurazione C1 con il sistema di ricircolo acceso, rappresentante il modello della sezione mediana, della scogliera parallela emersa n°5.

Il sistema di ricircolo ha lo scopo di simulare le correnti di rip che si formano tra i varchi, con la funzione di riequilibrare il sovrizzo idrico, indotto dall'attacco ondos, nella zona protetta, che altrimenti sarebbe sovradimensionato.

→ *Livelli idrici in canale*

In Tabella 6.18 sono riportati i livelli idrici in canale con la pompa di retro pala spenta.

Tabella 6.18: Livelli idrici impostati in canale per la configurazione C1 con sistema di ricircolo acceso.

Livelli idrici in canale [cm]					
F0		F1		F2	
Profondità alla pala [cm]	Lettura al nonio della punta idrometrica [cm]	Profondità alla pala [cm]	Lettura al nonio della punta idrometrica [cm]	Profondità alla pala [cm]	Lettura al nonio della punta idrometrica [cm]
48	22.55	49	21.55	50	20.55

→ *Rilievi della quota della cresta della struttura*

Gli esperimenti relativi alla configurazione C1, con sistema di ricircolo acceso, sono stati eseguiti in tre sessioni giornaliere, all'inizio di ogni prova è stato eseguito il rilievo della quota della struttura, portando il livello dell'acqua in canale, tangente alla cresta della scogliera, ed effettuando la lettura alla punta idrometrica.

In Tabella 6.19 sono riportate le letture della quota della cresta effettuate alla punta idrometrica, relative alla data e al livello di prova.

Tabella 6.19: Rilievi della quota della cresta della scogliera per la configurazione C1 con ricircolo.

Rilievi della quota della cresta [cm]		
DATA	LIVELLO DI PROVA	Lettura del livello della cresta della scogliera
06/03/2008	F0	15.70
28/02/2008	F1	15.70
03/03/2008	F2	15.70

→ **Parametri caratteristici registrati durante la serie di prove**

In Tabella 6.20 sono riassunti i dati raccolti per ogni attacco ondoso, nella sessione sperimentale per la configurazione C1, con sistema di ricircolo acceso.

Tabella 6.20: Parametri caratteristici registrati per la configurazione C1 con ricircolo.

Codice Onda	H _{m0i} [cm]	K _r	T _p [sec]	T _{m0-li} [sec]	Level WG 3-4-5 [cm]	H _{m0t} [cm]	T _{pt} [sec]	T _{m0-1t} [sec]	Level WG 6 [cm]	Freeboard [cm]
I1F0C1R	6.68	0.32	1.2	1.9	0.20	2.61	1.2	2.3	0.70	5.01
I2F0C1R	7.34	0.41	1.5	2.0	-0.16	3.45	1.5	2	0.54	4.80
I3F0C1R	7.66	0.43	1.8	2.7	-0.05	3.55	1.8	3.3	0.66	4.80
I4F0C1R	8.18	0.42	1.4	2.6	0.04	3.69	1.6	3.4	0.95	4.80
I5F0C1R	8.53	0.43	1.9	3.1	-0.07	4.07	25.6	4.9	0.96	4.80
I6F0C1R	8.93	0.44	2.3	3.4	0.16	3.87	25.6	5.4	1.18	4.82
I1F1C1R	6.79	0.33	1.2	1.9	-0.30	3.41	1.2	2.5	0.27	3.85
I2F1C1R	7.30	0.41	1.4	2.0	-0.26	4.24	1.5	2.2	0.58	3.88
I3F1C1R	7.68	0.43	1.8	2.7	-0.26	4.39	1.8	3.5	0.60	3.88
I4F1C1R	8.38	0.41	1.5	2.5	-0.12	4.67	1.6	3.4	1.13	3.88
I5F1C1R	8.74	0.43	1.9	3.0	-0.16	5.00	25.6	4.6	1.25	3.90
I6F1C1R	9.16	0.45	1.8	3.4	-0.08	5.16	1.7	4.7	1.34	3.88
I1F2C1R	6.99	0.31	1.2	2.0	0.12	3.87	1.2	2.6	0.97	3.23
I2F2C1R	8.01	0.37	1.4	2.2	-0.11	5.12	1.5	2	1.16	3.10
I3F2C1R	8.02	0.41	1.9	2.8	-0.11	4.83	1.7	3.6	1.11	3.10
I4F2C1R	8.78	0.38	1.5	2.3	0.03	5.45	1.5	2.7	1.69	3.10
I5F2C1R	9.38	0.40	1.8	2.7	0	5.75	1.6	3.6	1.73	3.10
I6F2C1R	9.60	0.42	1.8	3.3	0.16	6.01	1.7	4.4	1.81	3.10

→ **Portate di ricircolo**

In Tabella 6.21 sono riportate le letture delle portate di ricircolo, effettuate sul display digitale del misuratore di portata magnetico, durante ciascun attacco ondoso.

Tabella 6.21: Portate di ricircolo registrate durante la serie di prove relative alla configurazione C1 con sistema di ricircolo acceso.

Codice Onda	Portata di ricircolo [l/sec]	Codice Onda	Portata di ricircolo [l/sec]	Codice Onda	Portata di ricircolo [l/sec]
I1F0C1R	1.39-1.45	I1F1C1R	1.60-1.71	I1F2C1R	1.51-1.68
I2F0C1R	1.40-1.45	I2F1C1R	1.52-1.73	I2F2C1R	1.57-1.72
I3F0C1R	1.32-1.47	I3F1C1R	1.61-1.69	I3F2C1R	1.50-1.65
I4F0C1R	1.31-1.45	I4F1C1R	1.60-1.73	I4F2C1R	1.47-1.67
I5F0C1R	1.36-1.55	I5F1C1R	1.58-1.71	I5F2C1R	1.41-1.63
I6F0C1R	1.33-1.54	I6F1C1R	1.56-1.73	I6F2C1R	1.48-1.78

→ **Overtopping**

In Tabella 6.22 sono riportati: il numero di Green Water e di White Water, le letture effettuate all'inizio e alla fine di ogni prova e i rispettivi volumi stimati attraverso la curva di calibrazione (vedi fig. 6.2).

Tabella 6.22: Misure di overtopping relative alla configurazione C1 con ricircolo.

Codice Onda	N° Green Water	N° White Water	Letture iniziale [cm]	Letture finale [cm]	Δlivello [cm]	Volume di Overtopping [litri]
I1F0C1R	0	0	6.20	6.20	0	0
I2F0C1R	0	20	6.30	6.30	0	0
I3F0C1R	0	39	6.30	6.30	0	0
I4F0C1R	0	25	6.40	6.40	0	0
I5F0C1R	0	59	6.40	6.51	0.11	0.28
I6F0C1R	6	71	6.40	6.64	0.24	0.62
I1F1C1R	0	1	6.55	6.55	0	0
I2F1C1R	0	9	6.55	6.55	0	0
I3F1C1R	0	28	6.55	6.55	0	0
I4F1C1R	0	25	6.55	6.55	0	0
I5F1C1R	7	98	6.55	7.51	0.96	2.47
I6F1C1R	16	96	7.52	9.22	1.70	4.37
I1F2C1R	0	9	6.22	6.22	0	0
I2F2C1R	1	37	6.22	6.32	0.10	0.26
I3F2C1R	15	40	6.32	7.42	1.10	2.83
I4F2C1R	18	31	7.42	8.48	1.06	2.72
I5F2C1R	69	67	8.48	14.18	5.70	14.65
I6F2C1R	101	70	8.1	22.55	14.45	37.14

6.2.3 Prove relative alla configurazione C2

Nei giorni 17-19 e 20 Marzo sono state effettuate le prove per la configurazione C2 con larghezza di berma pari a 50 cm (20 m nel prototipo) e cresta sommersa di -2.5 cm (-1 m nel prototipo), per tali prove è stato deciso di non azionare il sistema di ricircolo, dato che il sovrizzo idrico dovuto all'attacco ondoso non è risultato rilevante.

→ *Livelli idrici in canale*

In Tabella 6.23 sono riportati i livelli idrici in canale con la pompa di retropala spenta.

Tabella 6.23: Livelli idrici impostati in canale per le prove relative alla configurazione C2.

Livelli idrici in canale [cm]					
F0		F1		F2	
Profondità alla pala [cm]	Lettura al nonio della punta idrometrica [cm]	Profondità alla pala [cm]	Lettura al nonio della punta idrometrica [cm]	Profondità alla pala [cm]	Lettura al nonio della punta idrometrica [cm]
49	21.55	50	20.55	51	19.55

→ *Rilievi della quota della cresta della struttura*

Gli esperimenti relativi alla configurazione C2 sono stati eseguiti in tre sessioni giornaliere, all'inizio di ogni prova è stato eseguito il rilievo della quota della struttura, portando il livello dell'acqua in canale, tangente alla cresta della scogliera, ed effettuando la lettura alla punta idrometrica.

In Tabella 6.24 sono riportate le letture della quota della cresta effettuate alla punta idrometrica, relative alla data e al livello di prova.

Tabella 6.24: Rilievi della quota della cresta della scogliera per la configurazione C2.

Rilievi della quota della cresta [cm]		
DATA	LIVELLO DI PROVA	Lettura del livello della cresta della scogliera
17/03/2008	F0	22.80
19/03/2008	F1	22.62
20/03/2008	F2	22.70

→ **Parametri caratteristici registrati durante la serie di prove**

In Tabella 6.25 sono riassunti i dati raccolti per ogni attacco ondoso, nella sessione sperimentale per la configurazione C2.

La prova relativa all'attacco ondoso I6, per il livello idrico F2, non è stata eseguita poiché già durante l'onda I5 per il medesimo livello, è stata rilevata una cospicua tracimazione, che ha reso difficile la stima del volume di overtopping.

Tabella 6.25: Parametri caratteristici registrati durante la serie di prove relative alla configurazione C2.

Codice Onda	H_{m0i} [cm]	K_r	T_p [sec]	T_{m0-li} [sec]	Level WG 3-4-5 [cm]	H_{m0t} [cm]	T_{pt} [sec]	T_{m0-lt} [sec]	Level WG 6 [cm]	Freeboard [cm]
I1F0C2	6.41	0.17	1.2	1.7	-0.05	4.33	1.2	3.2	0.74	-2.34
I2F0C2	7.74	0.23	1.5	1.9	-0.05	5.00	1.5	2.9	0.99	-2.34
I3F0C2	7.80	0.25	1.7	2.4	-0.05	5.10	1.7	3.9	0.99	-2.34
I4F0C2	8.44	0.28	1.6	2.3	0.14	5.58	25.6	4.9	1.34	-2.34
I5F0C2	8.81	0.29	2.0	2.9	0.10	6.72	12.8	8.4	1.35	-2.34
I6F0C2	8.96	0.32	1.9	3.1	0.28	6.80	12.8	8.1	1.45	-2.34
I1F1C2	6.85	0.15	1.1	1.5	0.04	5.06	1.2	2.9	0.61	-3.07
I2F1C2	6.68	0.24	1.5	1.8	-0.05	5.75	1.5	2.9	0.75	-3.07
I3F1C2	8.18	0.27	1.7	2.3	0	5.93	25.6	4.2	0.72	-3.07
I4F1C2	9.12	0.26	1.6	2.2	0.14	6.44	12.8	4.7	1.16	-3.07
I5F1C2	9.65	0.30	2.0	2.8	0.09	7.40	12.8	7.4	1.10	-3.07
I6F1C2	9.70	0.32	1.8	3.0	0.23	7.40	12.8	7.6	1.20	-3.07
I1F2C2	7.08	0.18	1.2	1.5	0.05	5.77	1.2	2.6	0.46	-4.10
I2F2C2	8.73	0.23	1.5	1.8	-0.03	6.85	1.5	2.7	0.57	-4.10
I3F2C2	8.44	0.27	1.8	2.3	-0.11	6.62	25.6	4.3	0.48	-4.10
I4F2C2	9.55	0.29	1.4	2.1	0.11	7.14	12.8	4.3	0.95	-4.10
I5F2C2	10.02	0.29	1.9	2.8	0.02	8.11	12.8	6.9	0.87	-4.10
I6F2C2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

→ **Overtopping**

In Tabella 6.26 sono riportati: il numero di Green Water e di White Water, le letture effettuate all'inizio e alla fine di ogni prova e i rispettivi volumi stimati, attraverso la curva di calibrazione (vedi fig. 6.2).

Tabella 6.26: Misure di overtopping relative alla configurazione C2.

Codice Onda	N° Green Water	N° White Water	Lettura iniziale [cm]	Lettura finale [cm]	Δ livello [cm]	Volume di Overtopping [litri]
I1F0C2	0	6	9.12	9.12	0	0
I2F0C2	0	57	9.12	9.12	0	0
I3F0C2	7	107	7.90	8.19	0.29	0.73
I4F0C2	37	110	8.19	8.29	0.10	0.25
I5F0C2	26	124	8.29	8.82	0.53	1.33
I6F0C2	39	135	8.82	11.80	2.98	7.50
I1F1C2	0	29	9.45	9.45	0	0
I2F1C2	8	85	9.45	9.83	0.38	0.96
I3F1C2	11	141	9.83	11.41	1.58	3.97
I4F1C2	11	146	5.11	5.62	0.51	1.28
I5F1C2	43	190	5.62	10.45	4.83	12.15
I6F1C2	63	135	10.45	24.37	13.92	35.00
I1F2C2	1	47	5.83	5.83	0	0
I2F2C2	18	136	5.83	8.41	2.58	6.49
I3F2C2	32	167	8.41	13.91	5.50	13.83
I4F2C2	61	187	5.63	10.81	5.18	13.03
I5F2C2	101	198	10.81	28.80	17.99	45.25
I6F2C2	-	-	-	-	-	-

6.2.4 Prove relative alla configurazione C3

Nei giorni 9-10-15 e 16 Aprile Febbraio e 03-06 Marzo sono state svolte le prove definitive per la configurazione C3 con larghezza di berma pari a 80 cm (32 m nel prototipo) e cresta sommersa di -2.5 cm (-1 m nel prototipo), per tali prove, come per quelle della configurazione C2 è stato deciso di non azionare il sistema di ricircolo, dato che il sovrizzo idrico dovuto all'attacco ondoso non è risultato rilevante.

→ *Livelli idrici in canale*

In Tabella 6.27 sono riportati i livelli idrici in canale con la pompa di retro pala spenta.

Tabella 6.27: Livelli idrici impostati in canale per la configurazione C3.

Livelli idrici in canale [cm]					
F0		F1		F2	
Profondità alla pala [cm]	Lettura al nonio della punta idrometrica [cm]	Profondità alla pala [cm]	Lettura al nonio della punta idrometrica [cm]	Profondità alla pala [cm]	Lettura al nonio della punta idrometrica [cm]
49	21.55	50	20.55	51	19.55

→ **Rilievi della quota della cresta della struttura**

Gli esperimenti relativi alla configurazione C3 sono stati eseguiti in quattro sessioni giornaliere, all'inizio di ogni prova è stato eseguito il rilievo della quota della struttura, portando il livello dell'acqua in canale, tangente alla cresta della scogliera, ed effettuando la lettura alla punta idrometrica.

In Tabella 6.28 sono riportate le letture della quota della cresta effettuate alla punta idrometrica, relative alla data e al livello di prova.

Tabella 6.28: Rilievi della quota della cresta della scogliera per le prove relative alla configurazione C3.

Rilievi della quota della cresta [cm]		
DATA	LIVELLO DI PROVA	Letture del livello della cresta della scogliera
09/04/2008	F0	22.66
10/04/2008	F1	23.00
15/04/2008	F2 (I1,I2,I3,I4,I5)	23.10
16/04/2008	F2 (I6)	22.82

→ **Parametri caratteristici registrati durante la serie di prove**

In Tabella 6.29 sono riassunti i dati raccolti per ogni attacco ondoso, nella sessione sperimentale per la configurazione C3.

Tabella 6.29: Parametri caratteristici registrati durante la serie di prove relative alla configurazione C3.

Codice Onda	H_{m0i} [cm]	K_r	T_p [sec]	T_{m0-li} [sec]	Level WG 3-4-5 [cm]	H_{m0t} [cm]	T_{pt} [sec]	T_{m0-lt} [sec]	Level WG 6 [cm]	Freeboard [cm]
I1F0C3	6.73	0.13	1.1	1.9	-0.03	3.38	25.6	4.5	0.66	-1.88
I2F0C3	7.74	0.19	1.5	2.0	-0.10	3.76	12.8	3.9	0.81	-1.88
I3F0C3	7.3	0.20	1.7	2.5	-0.07	3.75	25.6	4.5	0.81	-1.88
I4F0C3	8.3	0.22	1.6	2.3	0.09	4.19	25.6	5.2	1.10	-1.88
I5F0C3	8.49	0.24	1.6	2.7	0.05	4.93	12.8	7.9	1.13	-1.88
I6F0C3	8.68	0.28	1.4	3.2	0.25	5.25	12.8	8.7	1.24	-1.88
I1F1C3	6.83	0.15	1.2	1.6	0.01	3.97	1.2	3.4	0.46	-3.35
I2F1C3	7.88	0.21	1.5	1.9	-0.05	4.39	1.5	3.3	0.62	-3.35
I3F1C3	7.65	0.21	1.7	2.4	-0.03	4.64	25.6	4.7	0.62	-3.35
I4F1C3	8.69	0.22	1.6	2.2	0.13	4.92	25.6	5.1	0.92	-3.35
I5F1C3	8.99	0.25	1.7	2.8	0.08	5.56	12.8	8.3	0.92	-3.35
I6F1C3	9.17	0.28	1.5	3.0	0.23	5.82	12.8	8.2	1.05	-3.35
I1F2C3	6.84	0.16	1.1	1.5	0	4.59	1.2	3.0	0.33	-4.57
I2F2C3	8.16	0.21	1.5	1.8	-0.02	5.18	1.5	3.0	0.46	-4.57
I3F2C3	7.81	0.24	1.7	2.3	-0.04	5.18	25.6	4.6	0.43	-4.57
I4F2C3	9.17	0.24	1.5	2.0	0.12	5.52	12.8	4.8	0.75	-4.57
I5F2C3	9.38	0.26	1.6	2.7	0.03	6.31	12.8	7.7	0.70	-4.57
I6F2C3	9.64	0.27	1.6	3.0	0.14	6.33	25.6	7.8	0.84	-4.24

→ **Overtopping**

In Tabella 6.30 sono riportati: il numero di Green Water e di White Water, le letture effettuate all'inizio e alla fine di ogni prova e i rispettivi volumi stimati, attraverso la curva di calibrazione (vedi fig. 6.2).

Per la prova relativa all'attacco ondoso I6, con il livello idrico F2, non è stato possibile ottenere una stima del volume di overtopping, poiché dopo 8 minuti dal lancio dell'attacco ondoso, la vasca nella quale viene convogliata l'acqua tracimata, ha raggiunto il livello di saturazione.

Tabella 6.30: Misure di overtopping relative alla configurazione C3.

Codice Onda	N° Green Water	N° White Water	Letture iniziale [cm]	Letture finale [cm]	Δlivello [cm]	Volume di Overtopping [litri]
I1F0C3	0	1	6.70	6.70	0	0
I2F0C3	0	16	6.93	6.93	0	0
I3F0C3	1	11	7.10	7.20	0.10	0.25
I4F0C3	0	38	7.20	7.30	0.10	0.25
I5F0C3	4	45	7.30	7.80	0.50	1.26
I6F0C3	18	74	7.80	9.41	1.61	4.05
I1F1C3	0	10	6.14	6.14	0	0
I2F1C3	1	17	6.30	6.44	0.14	0.35
I3F1C3	7	39	6.44	7.60	1.16	2.92
I4F1C3	7	67	7.60	8.34	0.74	1.86
I5F1C3	38	82	8.34	11.23	2.89	7.27
I6F1C3	43	103	11.23	20.61	9.38	23.59
I1F2C3	2	28	6.43	6.61	0.18	0.45
I2F2C3	14	80	6.61	8.26	1.65	4.15
I3F2C3	32	88	8.26	14.20	5.94	14.94
I4F2C3	49	96	7.10	13.13	6.03	15.17
I5F2C3	101	98	6.60	25.81	19.21	48.32
I6F2C3	(8min) 56	(8min) 44	5.14	(8min)	-	-

6.3 Analisi di II livello

L'analisi di secondo livello ha come scopo l'elaborazione e la rappresentazione in forma grafica dei dati acquisiti durante la sessione sperimentale, per la ricerca e la verifica di relazioni sperimentali riguardanti i fenomeni di frangimento, trasmissione, water set-up, e overtopping.

6.3.1 Coefficiente di frangimento

Nelle Tabelle seguenti sono riportati per ogni prova i dati acquisiti durante la sessione sperimentale per le configurazioni C1, senza e con ricircolo, C2 e C3, in particolare:

- d_1 : profondità davanti alla scogliera;
- H_{m0i} : altezza d'onda incidente al piede della scogliera filtrata dall'onda riflessa;
- T_{m0-1i} : periodo medio registrato davanti alla scogliera;
- L_i : lunghezza dell'onda incidente;
- d_2 : profondità dietro alla scogliera;
- H_{m0t} : media delle altezze d'onda trasmesse dietro la scogliera;
- T_{m0-1t} : periodo medio registrato dietro la scogliera;
- L_t : lunghezza dell'onda trasmessa;
- ζ_{m0-1} : coefficiente di frangimento davanti alla scogliera e nella zona protetta;
- H_{m0i}/d_1 : parametro per la stima del tipo di frangimento sulla scogliera parallela;
- H_{m0t}/d_2 : parametro per la stima del tipo di frangimento sulla scogliera radente.

Il valore della lunghezza d'onda, L , in prossimità della scogliera e della zona protetta, non viene restituito dal programma di analisi dati "Matlab", quindi è stato calcolato con metodi reiterativi, attraverso la relazione di dispersione (1), che è funzione di T , L e d .

$$\left(\frac{L}{T}\right)^2 = \frac{2\pi}{L} \cdot g \cdot \operatorname{tgh}\left(\frac{2\pi}{L} \cdot d\right) \quad (1)$$

Il coefficiente di frangimento, ζ , è un indice della tipologia di frangimento su una struttura, e può essere calcolato con la formula (2), la quale definisce il parametro di Iribarren, e mette in relazione tale indice con la lunghezza, l'altezza dell'onda e l'angolo α , che caratterizza l'inclinazione verso mare della struttura.

Il valore di α rimane costante nel caso della scogliera radente, nelle tre configurazioni, ed è pari a 0.5, invece varia per la scogliera parallela, assumendo i seguenti valori: per la configurazione C1 è pari a 0.5, per la configurazione C2 è 0.4 e per la C3 è 0.2.

$$\zeta_{m0-1} = \frac{tg\alpha}{\sqrt{H_i/L_i}} \quad (2)$$

A seconda dei valori che esso assume si possono verificare le seguenti modalità di frangimento (fig. 6.3):

- * se $\zeta_{m0-1} > 3.3$: *SURGING*, caratterizzato da onde, che non raggiungono il valore critico di ripidità, per cui non si rompono, inoltre la struttura che incontrano, ha l'effetto di riflettere parte della loro energia verso il mare aperto;
- * se $0.5 < \zeta_{m0-1} < 3.3$: *PLUNGING*, dove l'intero fronte d'onda diviene ripido e instabile, la cresta si ripiega su se stessa e crolla in avanti, rilasciando istantaneamente gran parte della sua energia;
- * se $\zeta_{m0-1} < 0.5$: *SPILLING*, si manifesta con la formazione di schiuma bianca sulle creste, e una volta raggiunta l'altezza critica l'onda frange gradualmente, da lì in poi la sua altezza si mantiene in rapporto costante con la profondità e l'onda perde lentamente la sua energia.

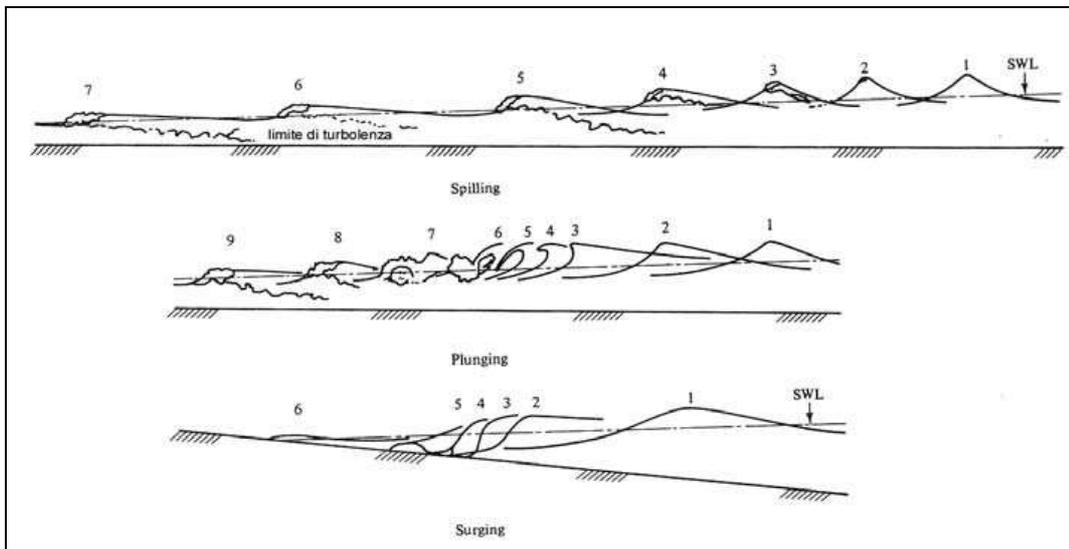


Figura 6.3 - Tipi fondamentali di frangimento: i numeri indicano le diverse fasi del processo di Breaking (Dean e Dalrymple, 1991).

CONFIGURAZIONE C1 SENZA RICIRCOLO

Tabella 6.31: Parametri delle onde incidenti e coefficienti di frangimento, relativi alla configurazione C1 con sistema di ricircolo spento.

Codice Onda	d_1 [cm]	H_{m0i} [cm]	T_{m0-li} [sec]	L_i [cm]	ζ_{m0-1}	H_{m0i}/d_1
I1F0C1	15	6.67	1.9	224	3.2	0.4
I2F0C1	15	7.38	2.1	249	3.2	0.5
I3F0C1	15	7.56	2.6	310	3.5	0.5
I4F0C1	15	8.16	2.6	310	3.4	0.5
I5F0C1	15	8.60	3.2	384	3.7	0.6
I6F0C1	15	8.85	3.3	396	3.7	0.6
I1F1C1	16	6.81	1.9	231	3.2	0.4
I2F1C1	16	7.56	2.1	256	3.2	0.5
I3F1C1	16	7.89	2.7	333	3.5	0.5
I4F1C1	16	8.48	2.6	320	3.4	0.5
I5F1C1	16	8.90	3.0	371	3.5	0.6
I6F1C1	16	9.16	3.5	434	3.8	0.6
I1F2C1	17	7.03	2.0	250	3.3	0.4
I2F2C1	17	7.85	2.3	290	3.3	0.5
I3F2C1	17	8.05	2.9	369	3.7	0.5
I4F2C1	17	8.70	2.3	290	3.2	0.5
I5F2C1	17	9.36	2.8	356	3.4	0.6
I6F2C1	17	9.38	3.4	434	3.7	0.6

Tabella 6.32: Parametri delle onde trasmesse e coefficienti di frangimento, relativi alla configurazione C1 con sistema di ricircolo spento.

Codice Onda	d_2 [cm]	H_{m0t} [cm]	T_{m0-1t} [sec]	L_t [cm]	ζ_{m0-1}	H_{m0t}/d_2
I1F0C1	8	2.50	2.8	246	5.4	0.3
I2F0C1	8	3.26	2.2	192	4.2	0.4
I3F0C1	8	3.46	3.5	308	5.2	0.4
I4F0C1	8	3.66	3.7	326	5.2	0.5
I5F0C1	8	4.09	5.1	450	5.7	0.5
I6F0C1	8	3.97	5.2	459	5.9	0.5
I1F1C1	9	3.2	3.0	280	5.1	0.4
I2F1C1	9	4.06	2.3	213	4.0	0.5
I3F1C1	9	4.23	3.7	346	4.9	0.5
I4F1C1	9	4.59	3.6	336	4.7	0.5
I5F1C1	9	4.86	4.4	412	5.0	0.5
I6F1C1	9	5.05	4.7	440	5.1	0.6
I1F2C1	10	3.38	2.9	285	5.0	0.3
I2F2C1	10	4.45	2.0	194	3.6	0.4
I3F2C1	10	4.41	3.6	354	4.9	0.4
I4F2C1	10	4.93	2.7	265	4.0	0.5
I5F2C1	10	5.27	3.8	374	4.6	0.5
I6F2C1	10	5.39	4.8	473	5.1	0.5

CONFIGURAZIONE C1 CON RICIRCOLO

Tabella 6.33: Parametri delle onde incidenti e coefficienti di frangimento, relativi alla configurazione C1 con sistema di ricircolo acceso.

Codice Onda	d_1 [cm]	H_{m0i} [cm]	T_{m0-l_i} [sec]	L_i [cm]	ζ_{m0-1}	H_{m0i}/d_1
I1F0C1R	15	6.68	1.9	224	3.2	0.4
I2F0C1R	15	7.34	2.0	236	3.1	0.5
I3F0C1R	15	7.66	2.7	323	3.5	0.5
I4F0C1R	15	8.18	2.6	310	3.4	0.5
I5F0C1R	15	8.53	3.1	372	3.6	0.6
I6F0C1R	15	8.93	3.4	408	3.7	0.6
I1F1C1R	16	6.79	1.9	231	3.2	0.4
I2F1C1R	16	7.30	2.0	243	3.2	0.5
I3F1C1R	16	7.68	2.7	333	3.6	0.5
I4F1C1R	16	8.38	2.5	307	3.3	0.5
I5F1C1R	16	8.74	3.0	371	3.6	0.5
I6F1C1R	16	9.16	3.4	421	3.7	0.6
I1F2C1R	17	6.99	2.0	250	3.3	0.4
I2F2C1R	17	8.01	2.2	277	3.2	0.5
I3F2C1R	17	8.02	2.8	356	3.6	0.5
I4F2C1R	17	8.78	2.3	290	3.1	0.5
I5F2C1R	17	9.38	2.7	343	3.3	0.6
I6F2C1R	17	9.60	3.3	421	3.6	0.6

Tabella 6.34: Parametri delle onde trasmesse e coefficienti di frangimento, relativi alla configurazione C1 con sistema di ricircolo acceso.

Codice Onda	d_2 [cm]	H_{m0t} [cm]	T_{m0-l_t} [sec]	L_t [cm]	ζ_{m0-1}	H_{m0t}/d_2
I1F0C1R	8	2.61	2.3	201	4.8	0.3
I2F0C1R	8	3.45	2.0	174	3.9	0.4
I3F0C1R	8	3.55	3.3	290	4.9	0.4
I4F0C1R	8	3.69	3.4	299	4.9	0.5
I5F0C1R	8	4.07	4.9	433	5.6	0.5
I6F0C1R	8	3.87	5.4	477	6.1	0.5
I1F1C1R	9	3.41	2.5	232	4.5	0.4
I2F1C1R	9	4.24	2.2	204	3.8	0.5
I3F1C1R	9	4.39	3.5	327	4.7	0.5
I4F1C1R	9	4.67	3.4	317	4.5	0.5
I5F1C1R	9	5.00	4.6	430	5.1	0.6
I6F1C1R	9	5.16	4.7	440	5.0	0.6
I1F2C1R	10	3.87	2.6	255	4.4	0.4
I2F2C1R	10	5.12	2.0	194	3.4	0.5
I3F2C1R	10	4.83	3.6	354	4.7	0.5
I4F2C1R	10	5.45	2.7	265	3.8	0.5
I5F2C1R	10	5.75	3.6	354	4.3	0.6
I6F2C1R	10	6.01	4.4	434	4.6	0.6

CONFIGURAZIONE C2

Tabella 6.35: Parametri delle onde incidenti e coefficienti di frangimento, relativi alla configurazione C2.

Codice Onda	d_1 [cm]	H_{m0i} [cm]	T_{m0-li} [sec]	L_i [cm]	ζ_{m0-1}	H_{m0i}/d_1
I1F0C2	15	6.41	1.7	199	2.4	0.4
I2F0C2	15	7.74	2.9	345	2.8	0.5
I3F0C2	15	7.80	2.4	286	2.6	0.5
I4F0C2	15	8.44	2.3	273	2.4	0.6
I5F0C2	15	8.81	2.9	345	2.6	0.6
I6F0C2	15	8.96	3.1	372	2.7	0.6
I1F1C2	16	6.85	1.5	179	2.2	0.4
I2F1C2	16	6.68	1.8	218	2.4	0.4
I3F1C2	16	8.18	2.3	282	2.5	0.5
I4F1C2	16	9.12	2.2	269	2.3	0.6
I5F1C2	16	9.65	2.8	346	2.5	0.6
I6F1C2	16	9.70	3.0	371	2.6	0.6
I1F2C2	17	7.08	1.5	184	2.2	0.4
I2F2C2	17	8.73	1.8	224	2.1	0.5
I3F2C2	17	8.44	2.3	290	2.5	0.5
I4F2C2	17	9.55	2.1	264	2.2	0.6
I5F2C2	17	10.02	2.8	356	2.5	0.6
I6F2C2	-	-	-	-	-	-

Tabella 6.36: Parametri delle onde trasmesse e coefficienti di frangimento, relativi alla configurazione C2.

Codice Onda	d_2 [cm]	H_{m0t} [cm]	T_{m0-lt} [sec]	L_t [cm]	ζ_{m0-1}	H_{m0t}/d_2
I1F0C2	8	4.33	3.2	282	4.4	0.5
I2F0C2	8	5.00	2.9	255	3.9	0.6
I3F0C2	8	5.10	3.9	344	4.5	0.6
I4F0C2	8	5.58	4.9	433	4.8	0.7
I5F0C2	8	6.72	8.4	743	5.7	0.8
I6F0C2	8	6.80	8.1	716	5.6	0.9
I1F1C2	9	5.06	2.9	270	4.0	0.6
I2F1C2	9	5.75	2.9	270	3.7	0.6
I3F1C2	9	5.93	4.2	393	4.4	0.7
I4F1C2	9	6.44	4.7	440	4.5	0.7
I5F1C2	9	7.40	7.4	694	5.3	0.8
I6F1C2	9	7.40	7.6	713	5.4	0.8
I1F2C2	10	5.77	2.6	255	3.6	0.6
I2F2C2	10	6.85	2.7	265	3.4	0.7
I3F2C2	10	6.62	4.3	424	4.4	0.7
I4F2C2	10	7.14	4.3	424	4.2	0.7
I5F2C2	10	8.11	6.9	682	5.0	0.8
I6F2C2	-	-	-	-	-	-

CONFIGURAZIONE C3

Tabella 6.37: Parametri delle onde incidenti e coefficienti di frangimento, relativi alla configurazione C3.

Codice Onda	d_1 [cm]	H_{m0i} [cm]	T_{m0-l_1} [sec]	L_1 [cm]	ζ_{m0-1}	H_{m0i}/d_1
I1F0C3	18	6.73	1.9	248	1.2	0.4
I2F0C3	18	7.74	2.0	257	1.2	0.4
I3F0C3	18	7.30	2.5	325	1.4	0.4
I4F0C3	18	8.30	2.3	298	1.2	0.5
I5F0C3	18	8.49	2.7	352	1.3	0.5
I6F0C3	18	8.68	3.2	420	1.4	0.5
I1F1C3	19	6.83	1.6	207	1.1	0.4
I2F1C3	19	7.88	1.9	250	1.1	0.4
I3F1C3	19	7.65	2.4	320	1.3	0.4
I4F1C3	19	8.69	2.2	292	1.2	0.5
I5F1C3	19	8.99	2.8	376	1.3	0.5
I6F1C3	19	9.17	3.0	403	1.3	0.5
I1F2C3	20	6.84	1.5	197	1.1	0.3
I2F2C3	20	8.16	1.8	241	1.1	0.4
I3F2C3	20	7.81	2.3	313	1.3	0.4
I4F2C3	20	9.17	2.0	270	1.1	0.5
I5F2C3	20	9.38	2.7	371	1.3	0.5
I6F2C3	20	9.64	3.0	413	1.3	0.5

Tabella 6.38: Parametri delle onde trasmesse e coefficienti di frangimento, relativi alla configurazione C3.

Codice Onda	d_2 [cm]	H_{m0t} [cm]	T_{m0-l_t} [sec]	L_t [cm]	ζ_{m0-1}	H_{m0t}/d_2
I1F0C3	8	3.38	4.5	397	5.9	0.4
I2F0C3	8	3.76	3.9	344	5.2	0.5
I3F0C3	8	3.75	4.5	397	5.6	0.5
I4F0C3	8	4.19	5.2	454	5.7	0.5
I5F0C3	8	4.93	7.9	699	6.5	0.6
I6F0C3	8	5.25	8.7	769	6.6	0.7
I1F1C3	9	3.97	3.4	317	4.9	0.4
I2F1C3	9	4.39	3.3	308	4.6	0.5
I3F1C3	9	4.64	4.7	440	5.3	0.5
I4F1C3	9	4.92	5.1	478	5.4	0.5
I5F1C3	9	5.56	8.3	778	6.5	0.6
I6F1C3	9	5.82	8.2	769	6.3	0.6
I1F2C3	10	4.59	3.0	294	4.4	0.5
I2F2C3	10	5.18	3.0	294	4.1	0.5
I3F2C3	10	5.18	4.6	454	5.1	0.5
I4F2C3	10	5.52	4.8	473	5.1	0.6
I5F2C3	10	6.31	7.7	761	6.0	0.6
I6F2C3	10	6.33	7.8	771	6.0	0.6

6.3.2 Coefficiente di trasmissione

La trasmissione è stata analizzata andando a confrontare le registrazioni del moto ondoso tramite sonde poste davanti e subito a tergo della scogliera.

Per l'analisi del coefficiente di trasmissione è stato scelto di rappresentare i dati acquisiti, per ogni configurazione al variare dei livelli idrici (F0, F1, F2), in modo da evidenziare i fenomeni caratterizzanti, sia la situazione attuale, che le ipotesi progettuali per la riqualificazione del tratto di costa in esame.

Nelle figure 6.4, 6.5, 6.6 e 6.7 sono rappresentate le curve che mettono in relazione l'altezza d'onda trasmessa, H_{m0t} , con l'altezza d'onda incidente, H_{m0i} , per ogni livello e per ogni configurazione studiata in canale.

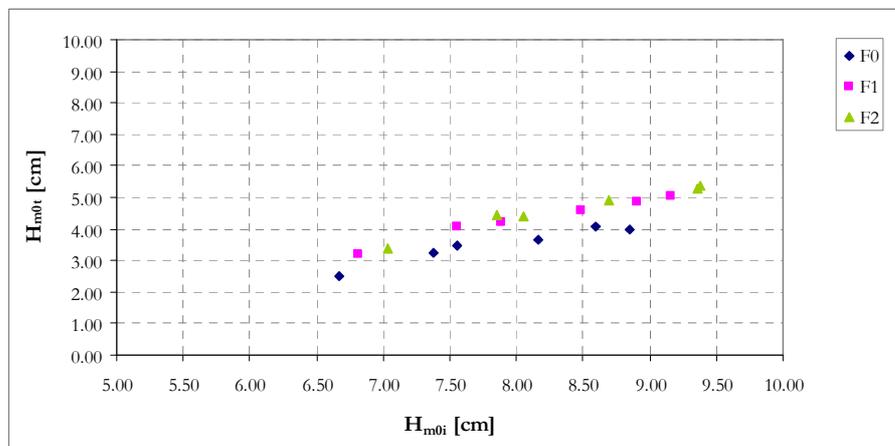


Figura 6.4 - Andamento dell'onda trasmessa in relazione all'onda incidente per la configurazione C1 senza ricircolo.

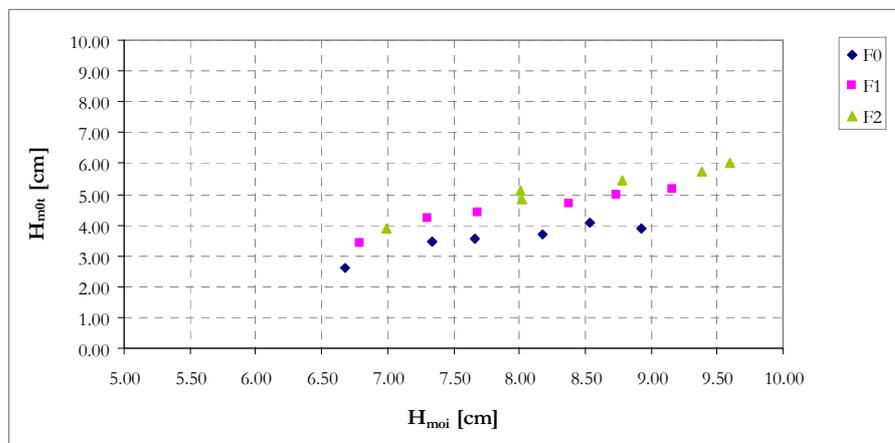


Figura 6.5 - Andamento dell'onda trasmessa in relazione all'onda incidente per la configurazione C1 con ricircolo.

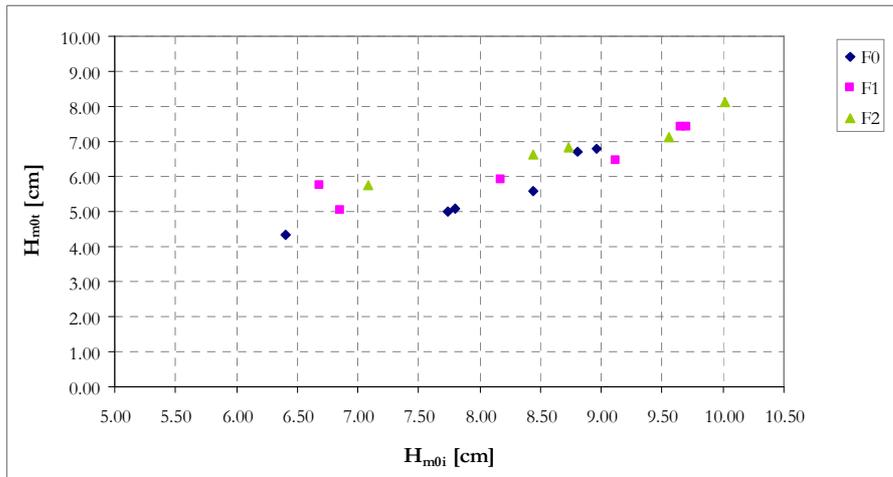


Figura 6.6 - Andamento dell'onda trasmessa in relazione all'onda incidente per la configurazione C2.

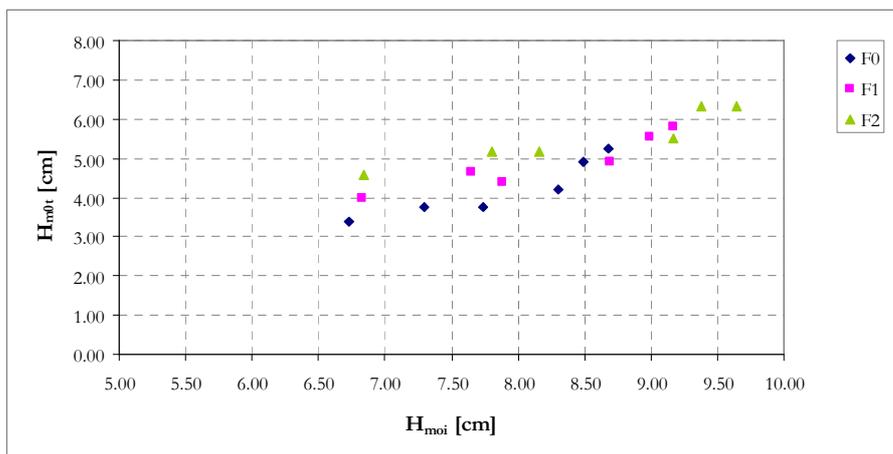


Figura 6.7 - Andamento dell'onda trasmessa in relazione all'onda incidente per la configurazione C3.

Dall'esame dei grafici delle figure 6.4 e 6.5 risulta evidente la corrispondenza dei dati, nella trasmissione dell'onda, tra le prove per la configurazione C1 senza e con ricircolo, inoltre si ha un cospicuo incremento dell'altezza d'onda trasmessa, proporzionale all'aumento del livello idrico in canale.

Per le configurazioni C2 e C3 (figure 6.6 e 6.7), è possibile notare che l'andamento dell'altezza d'onda trasmessa è sempre direttamente proporzionale all'incremento dell'altezza d'onda incidente, solo che i valori che essa assume risultano essere maggiori rispetto alla configurazione rappresentante lo stato attuale.

Nelle Tabelle 6.39, 6.40, 6.41 e 6.42 sono riportati i diversi periodi di picco corrispondenti alle tre altezze d'onda generate e le corrispondenti altezze d'onda trasmesse per i tre livelli idrici.

Tabella 6.39: Altezza d'onda trasmessa in relazione al periodo e al livello idrico per le prove relative alla configurazione C1 con sistema di ricircolo spento.

Altezza d'onda generata [cm]	T [sec]	H _{m0t} per F0 [cm]	H _{m0t} per F1 [cm]	H _{m0t} per F2 [cm]
H1: 10	1.1	2.50	3.2	3.38
	1.4	3.26	4.06	4.45
	1.7	3.46	4.23	4.41
H2: 15	1.4	3.66	4.59	4.93
	1.7	4.09	4.86	5.27
H3: 18	1.7	3.97	5.05	5.39

Tabella 6.40: Altezza d'onda trasmessa in relazione al periodo e al livello idrico per le prove relative alla configurazione C1 con sistema di ricircolo acceso.

Altezza d'onda generata [cm]	T [sec]	H _{m0t} per F0 [cm]	H _{m0t} per F1 [cm]	H _{m0t} per F2 [cm]
H1: 10	1.1	2.61	3.41	3.87
	1.4	3.45	4.24	5.12
	1.7	3.55	4.39	4.83
H2: 15	1.4	3.69	4.67	5.45
	1.7	4.07	5.00	5.75
H3: 18	1.7	3.87	5.16	6.01

Tabella 6.41: Altezza d'onda trasmessa in relazione al periodo e al livello idrico per le prove relative alla configurazione C2.

Altezza d'onda generata [cm]	T [sec]	H _{m0t} per F0 [cm]	H _{m0t} per F1 [cm]	H _{m0t} per F2 [cm]
H1: 10	1.1	4.33	5.06	5.77
	1.4	5.00	5.75	6.85
	1.7	5.10	5.93	6.62
H2: 15	1.4	5.58	6.44	7.14
	1.7	6.72	7.40	8.11
H3: 18	1.7	6.80	7.40	-

Tabella 6.42: Altezza d'onda trasmessa in relazione al periodo e al livello idrico per le prove relative alla configurazione C3.

Altezza d'onda generata [cm]	T [sec]	H_{m0t} per F0 [cm]	H_{m0t} per F1 [cm]	H_{m0t} per F2 [cm]
H1: 10	1.1	3.38	3.97	4.59
	1.4	3.76	4.39	5.18
	1.7	3.75	4.64	5.18
H2: 15	1.4	4.19	4.92	5.52
	1.7	4.93	5.56	6.31
H3: 18	1.7	5.25	5.82	6.33

Nei grafici delle figure 6.8, 6.9, 6.10 e 6.11 sono rappresentate le diverse altezze d'onda trasmesse, per ogni livello idrico, in funzione dei periodi di picco delle altezze d'onda generate; in totale per ogni configurazione studiata, sono raffigurate nove serie di punti, rappresentanti ciascuno l'altezza d'onda generata per ogni livello idrico.

Dai grafici è possibile notare che, per ogni configurazione studiata, l'incremento dell'altezza d'onda trasmessa in relazione all'altezza d'onda generata è legato all'aumento del periodo di generazione.

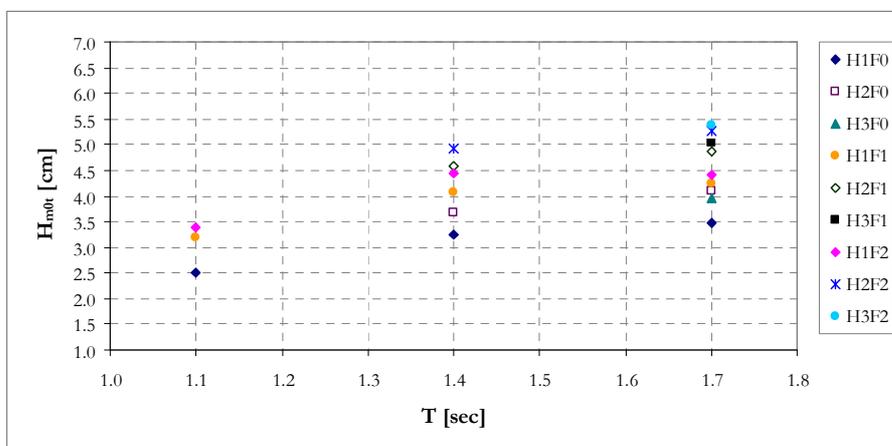


Figura 6.8 - Altezza d'onda trasmessa in funzione del periodo dell'altezza d'onda generata per le prove relative alla configurazione C1 senza ricircolo.

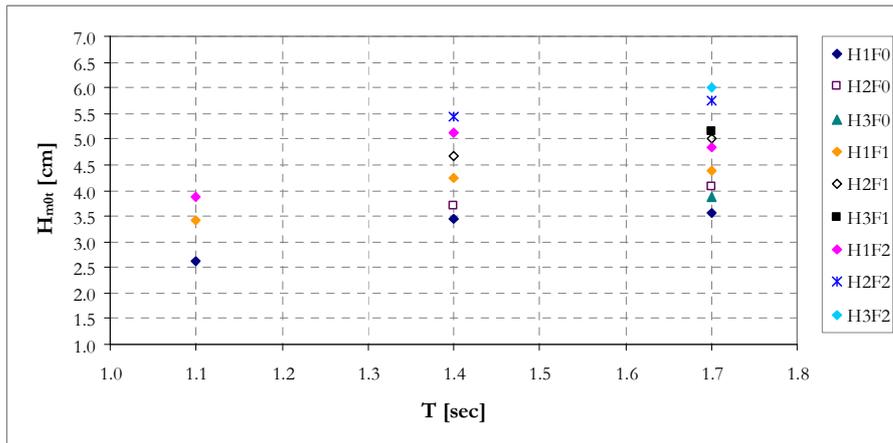


Figura 6.9 - Altezza d'onda trasmessa in funzione del periodo dell'altezza d'onda generata per le prove relative alla configurazione C1 con ricircolo.

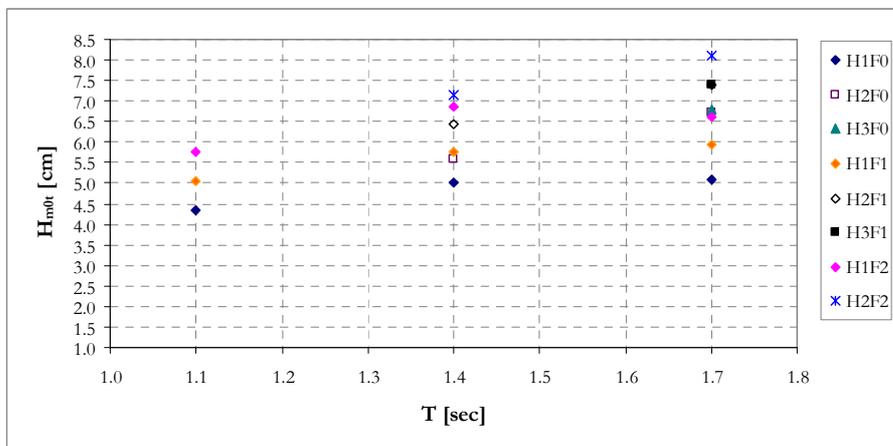


Figura 6.10 - Altezza d'onda trasmessa in funzione del periodo dell'altezza d'onda generata per le prove relative alla configurazione C2.

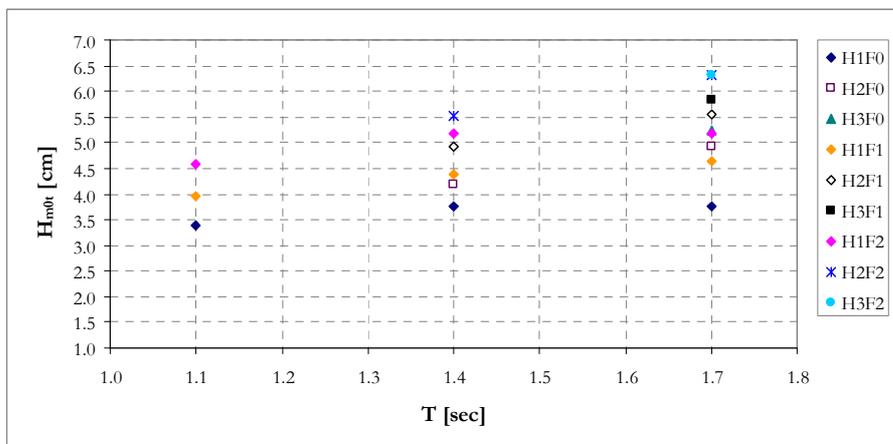


Figura 6.11 - Altezza d'onda trasmessa in funzione del periodo dell'altezza d'onda generata per le prove relative alla configurazione C3.

Nelle figure 6.12, 6.13, 6.14 e 6.15 è rappresentata la variazione del coefficiente di trasmissione K_t (dato dal rapporto H_{m0t}/H_{m0i}), in funzione del rapporto R/H_{m0i} , dove l'altezza d'onda incidente è adimensionalizzata con R , il freeboard relativo ad ogni attacco ondos.

L'adimensionalizzazione è importante, in quanto rende l'andamento misurato nel modello, immediatamente confrontabile con le misure registrate per il prototipo, o in altri laboratori dove vengono utilizzati altri fattori di scala.

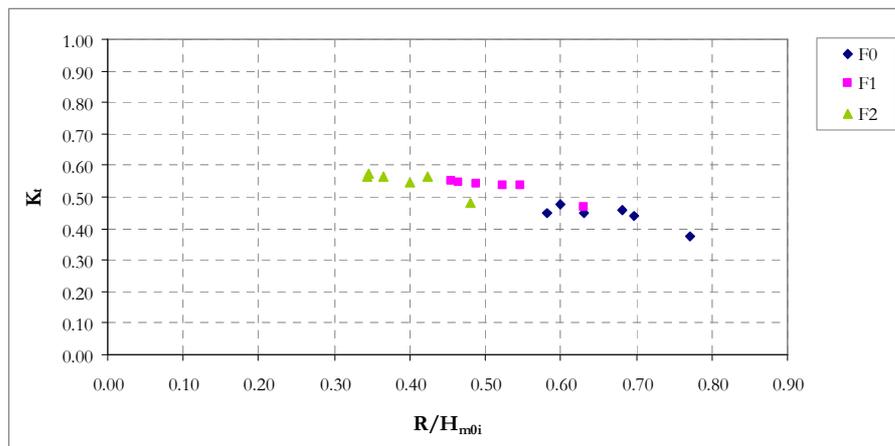


Figura 6.12 - Andamento di K_t in funzione di R/H_{m0i} per la configurazione C1 senza ricircolo.

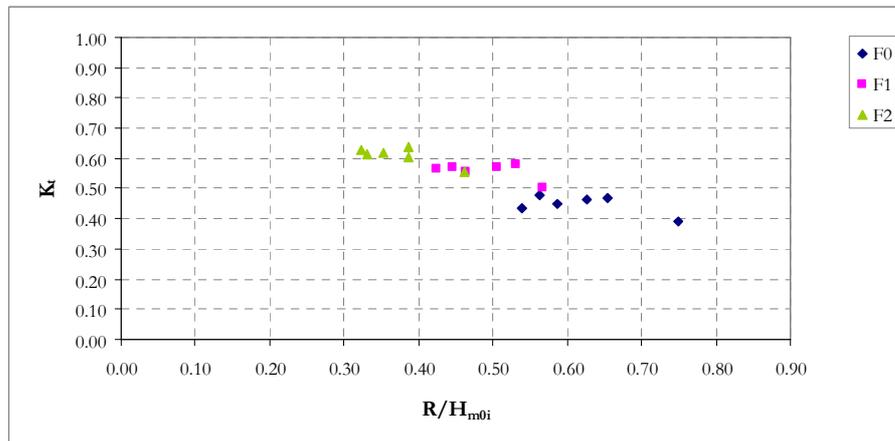


Figura 6.13 - Andamento di K_t in funzione di R/H_{m0i} per la configurazione C1 con ricircolo.

In questi primi due grafici, si rileva per la configurazione C1 senza e con sistema di ricircolo, una buona corrispondenza dei dati, in entrambi i casi infatti, il coefficiente di trasmissione cresce all'aumentare del livello idrico in canale.

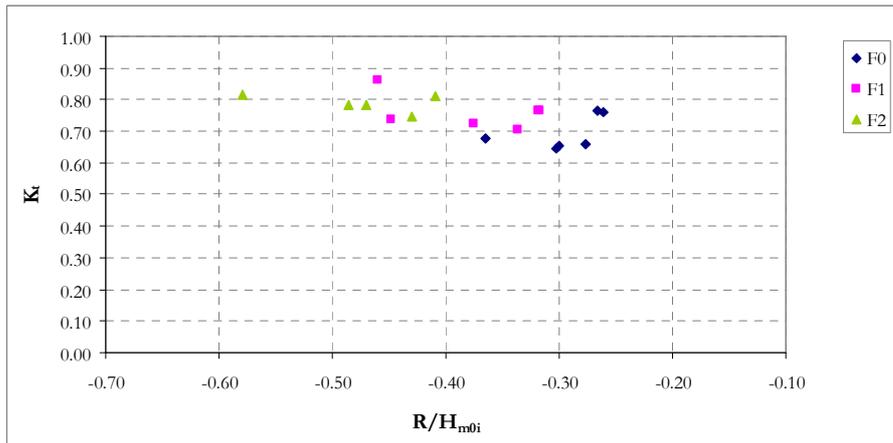


Figura 6.14 - Andamento di K_t in funzione di R/H_{m0i} per la configurazione C2.

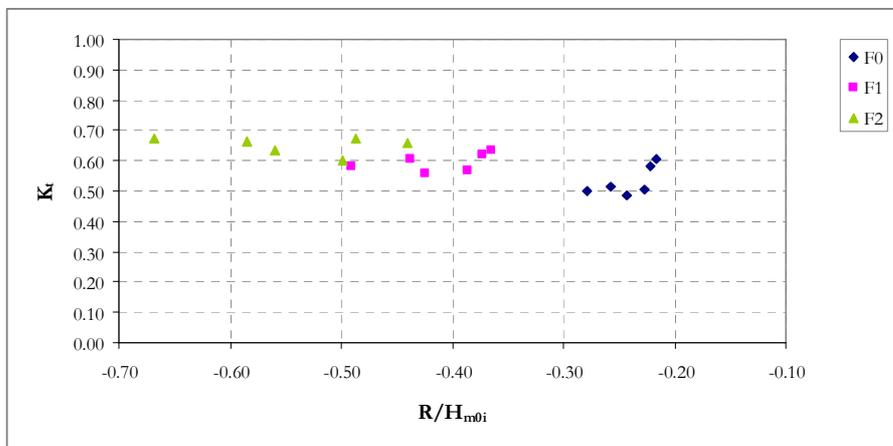


Figura 6.15 - Andamento di K_t in funzione di R/H_{m0i} per la configurazione C3.

Nei grafici delle figure 6.16, 6.17, 6.18 e 6.19, viene messo in relazione l'andamento del coefficiente di trasmissione K_t in funzione del rapporto B/H_{m0i} , dove l'altezza d'onda incidente è adimensionalizzata con B , la misura della larghezza della cresta.

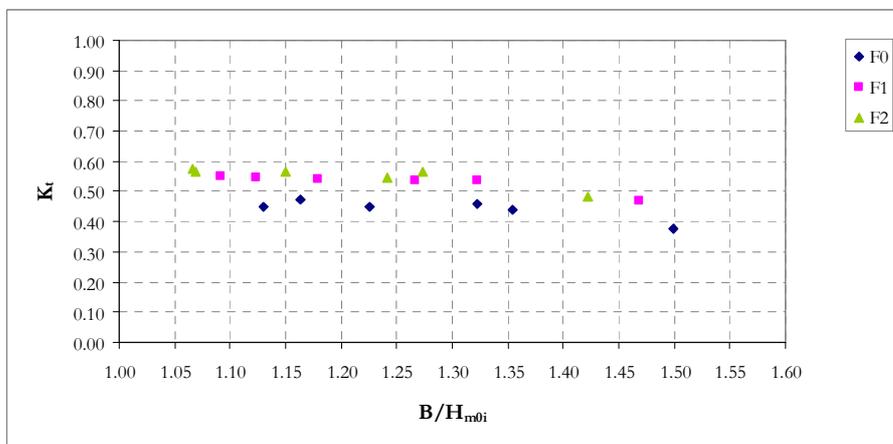


Figura 6.16 - Andamento di K_t in funzione di B/H_{m0i} per la configurazione C1 con sistema di ricircolo spento.

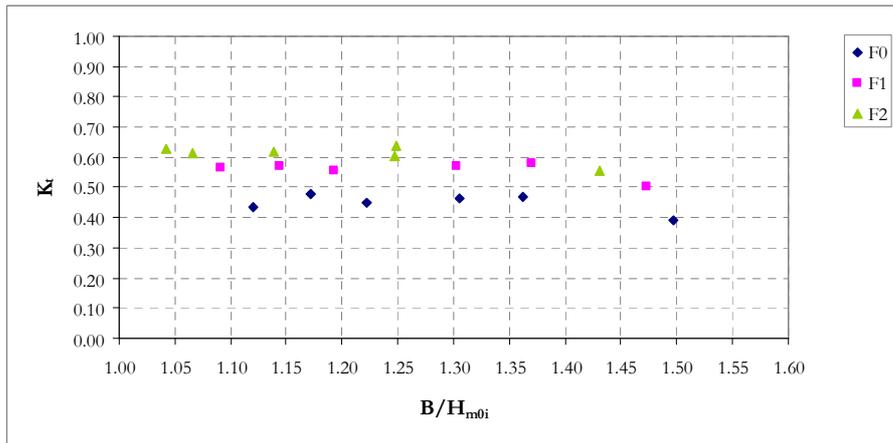


Figura 6.17 - Andamento di K_t in funzione di B/H_{m0i} per la configurazione C1 con sistema di ricircolo acceso.

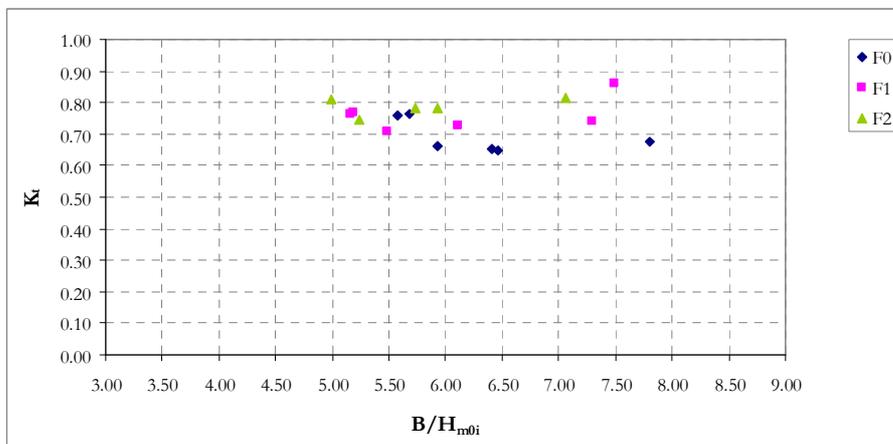


Figura 6.18 - Andamento di K_t in funzione di B/H_{m0i} per la configurazione C2.

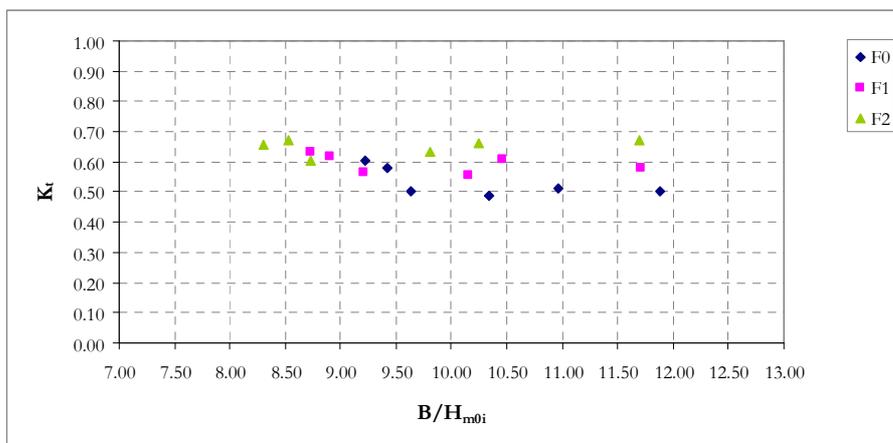


Figura 6.19 - Andamento di K_t in funzione di B/H_{m0i} per la configurazione C3.

Nei grafici delle figure 6.20, 6.21, 6.22 e 6.23 è rappresentata, con una serie di punti, la variazione del coefficiente di trasmissione K_t in funzione della ripidità dell'onda (data dal rapporto H_{m0i}/L_0), ad ogni serie corrisponde un determinato livello idrico.

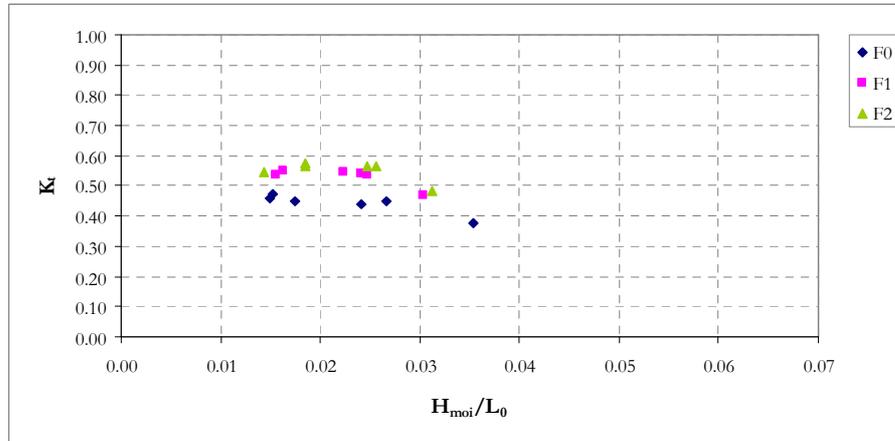


Figura 6.20 - Andamento di K_t in funzione di H_{m0i}/L_0 per la configurazione C1 senza ricircolo.

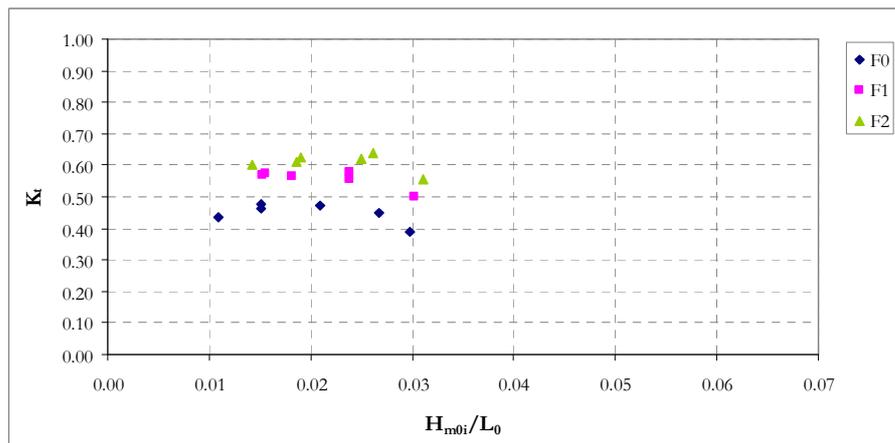


Figura 6.21 - Andamento di K_t in funzione di H_{m0i}/L_0 per la configurazione C1 con ricircolo.

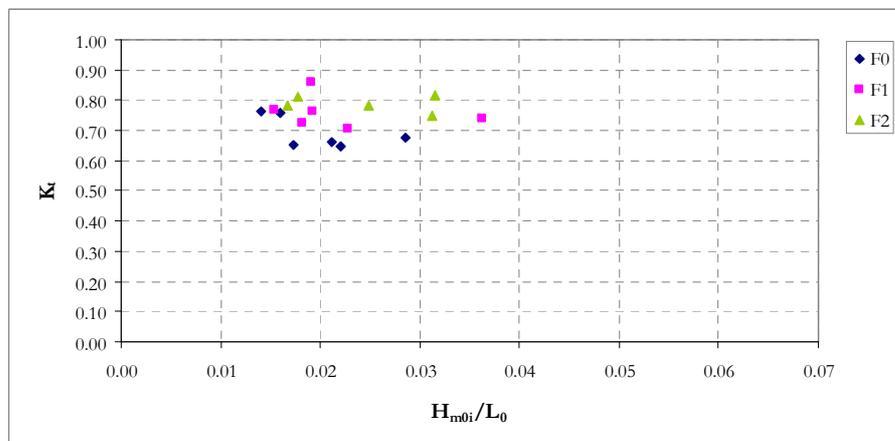


Figura 6.22 - Andamento di K_t in funzione di H_{m0i}/L_0 per la configurazione C2.

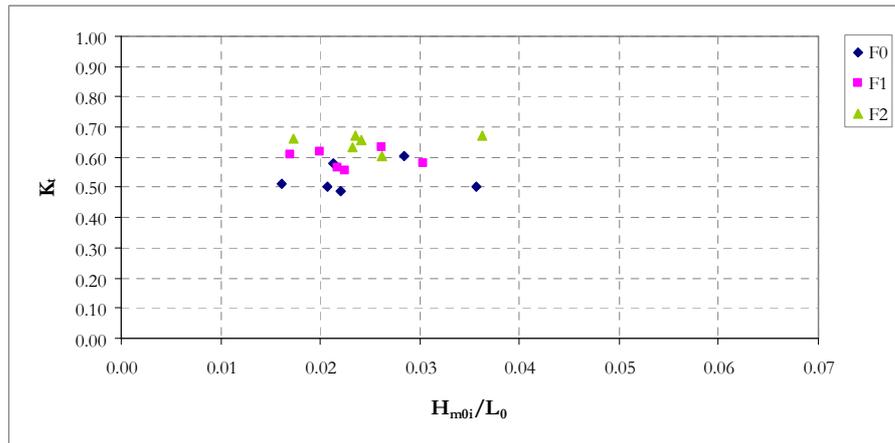


Figura 6.23 - Andamento di K_t in funzione di H_{m0i}/L_0 per la configurazione C3.

Dalla lettura dei grafici si nota una buona corrispondenza fra le prove per la configurazione C1 con ricircolo e senza ricircolo, inoltre è possibile apprezzare una relazione di inversa proporzionalità tra il coefficiente di trasmissione K_t e la ripidità dell'onda.

Nei grafici delle figure 6.24, 6.25, 6.26 e 6.27 sono riportate le misure dell'onda trasmessa in funzione dell'onda incidente in scala prototipo, in modo da permettere una valutazione del fenomeno sia basandosi sull'esperienza acquisita in laboratorio, che sull'osservazione in situ della qualità del modello.

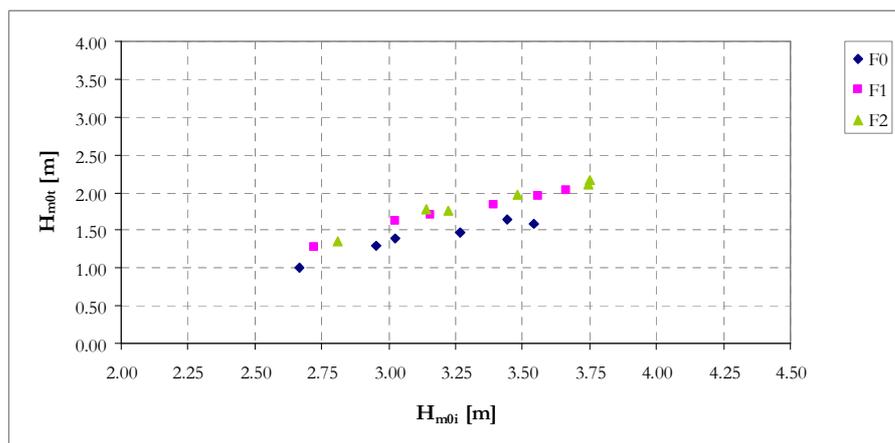


Figura 6.24 - Andamento dell'onda trasmessa in funzione dell'onda incidente per la configurazione C1 senza ricircolo, in scala prototipo.

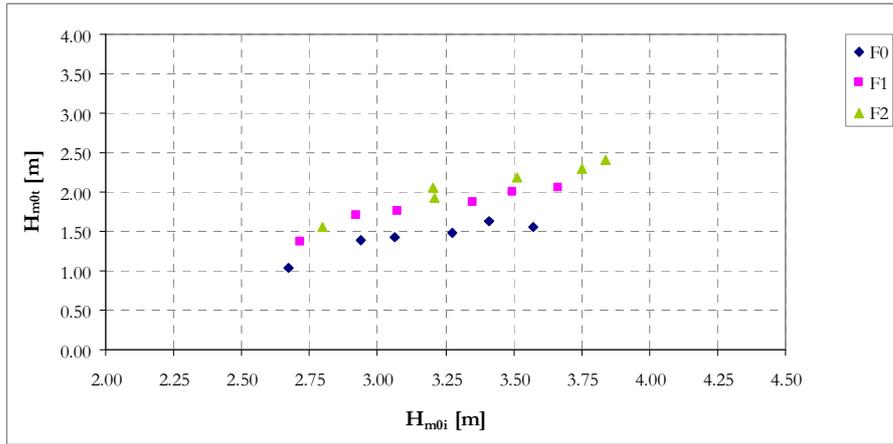


Figura 6.25 - Andamento dell'onda trasmessa in funzione dell'onda incidente per la configurazione C1 con ricircolo, in scala prototipo.

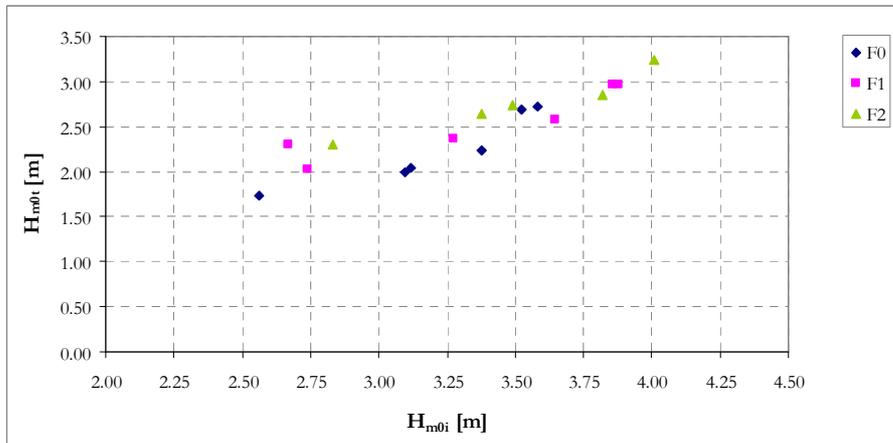


Figura 6.26 - Andamento dell'onda trasmessa in funzione dell'onda incidente per la configurazione C2, in scala prototipo.

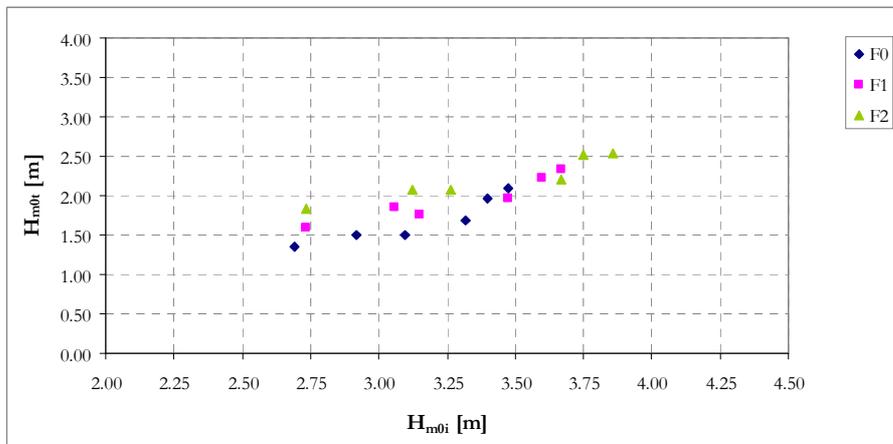


Figura 6.27 - Andamento dell'onda trasmessa in funzione dell'onda incidente per la configurazione C3, in scala prototipo.

I parametri H_{m0i} e H_{m0t} ottenuti tramite l'analisi in "Matlab" rappresentano la media spettrale di tutte le onde incidenti e trasmesse, sulla struttura quindi durante gli attacchi ondososi arrivano onde di altezza maggiore.

Le altezze d'onda massime incidenti e trasmesse possono essere stimate: con le seguenti formule:

$$H_{i\max} = 1.5 \cdot H_{m0i}$$

$$H_{t\max} = 1.5 \cdot H_{m0t}$$

Nelle figure 6.28, 6.29, 6.30 e 6.31 descrivono l'andamento dell'onda massima trasmessa in funzione dell'onda massima incidente per le tutte le configurazioni studiate in laboratorio.

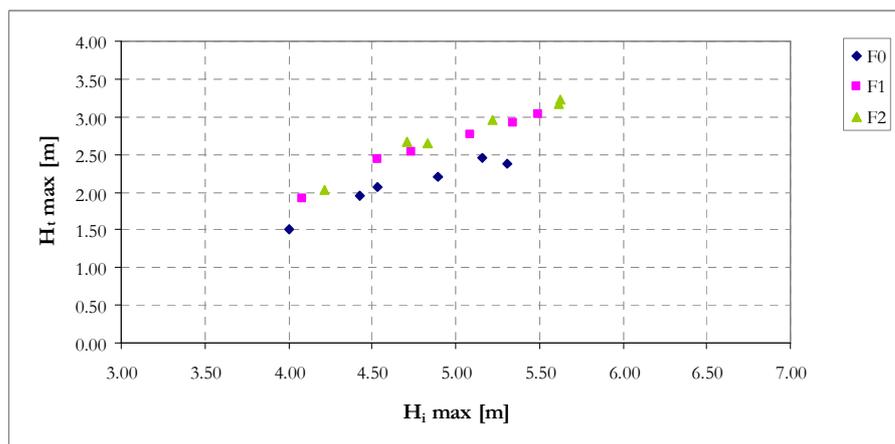


Figura 6.28 - Andamento dell'onda massima trasmessa in funzione dell'onda massima incidente per la configurazione C1 senza ricircolo.

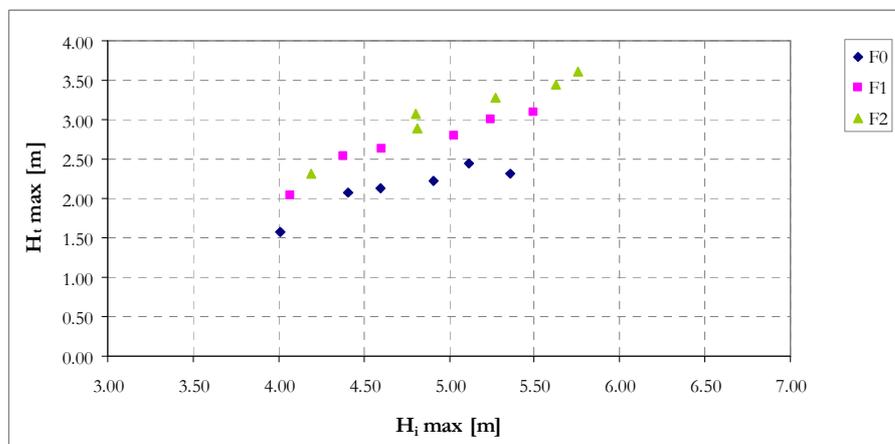


Figura 6.29 - Andamento dell'onda massima trasmessa in funzione dell'onda massima incidente per la configurazione C1 con ricircolo.

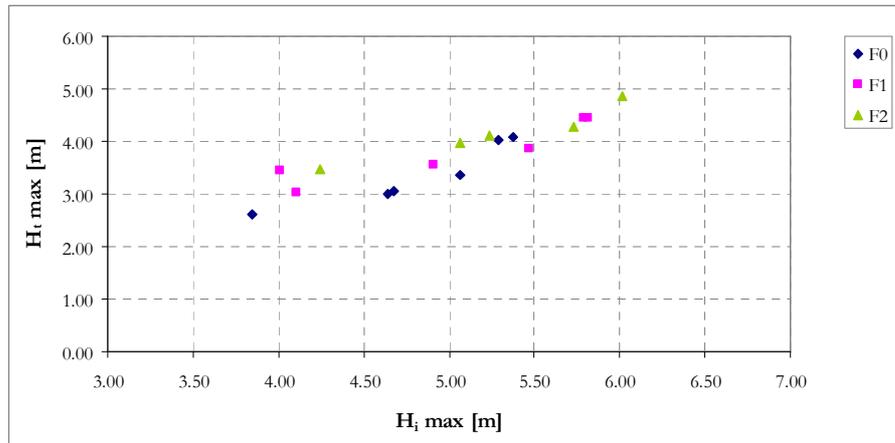


Figura 6.30 - Andamento dell'onda massima trasmessa in funzione dell'onda massima incidente per la configurazione C2.

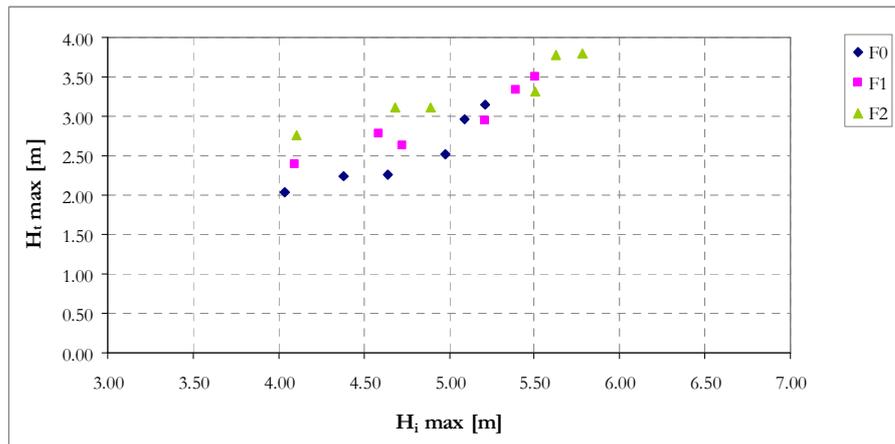


Figura 6.31 - Andamento dell'onda massima trasmessa in funzione dell'onda massima incidente per la configurazione C3.

Nelle figure seguenti i dati analizzati per la valutazione della trasmissione, sono stati rappresentati mettendo nello stesso grafico le configurazioni C1, C2 e C3, in funzione dei tre livelli idrici target, in modo da evidenziare la variabilità dovuta alla diversa geometria. La configurazione C1-R non è stata rappresentata, poiché paragonando la presente analisi con le misure sulla trasmissione, eseguite in situ dal Prof. L. Cappietti, è risultato che la configurazione più rappresentativa della situazione attuale è quella condotta in assenza di ricircolo.

Infatti la scogliera emersa n°5 presenta un solo varco in prossimità della testata Nord e un pennello emerso, che collega la linea di costa con la testata Sud, realizzando così una cella confinata con un unico e ristretto collegamento con l'esterno.

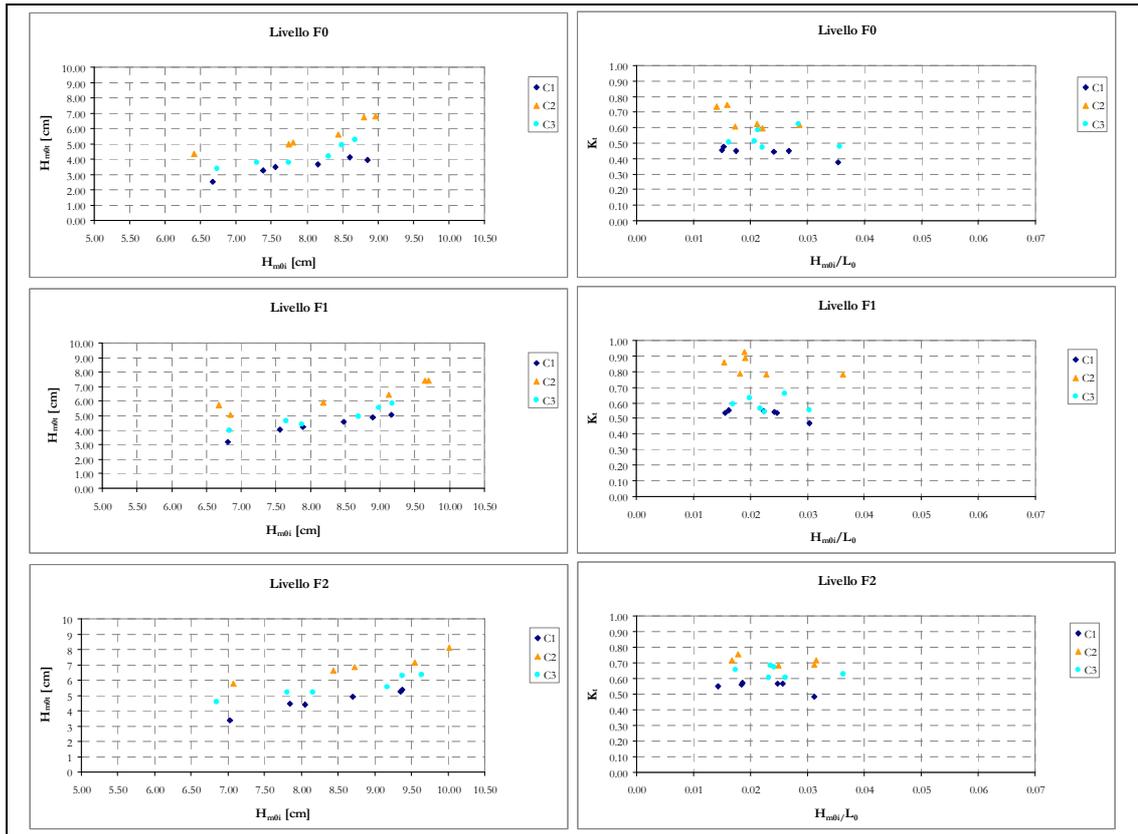


Figura 6.32 - Andamento di H_{m0t} in funzione di H_{m0i} (a sinistra) e di K_t in funzione di H_{m0i}/L_0 (a destra) relative alle configurazioni C1, C2 e C3, per ogni livello idrico target.

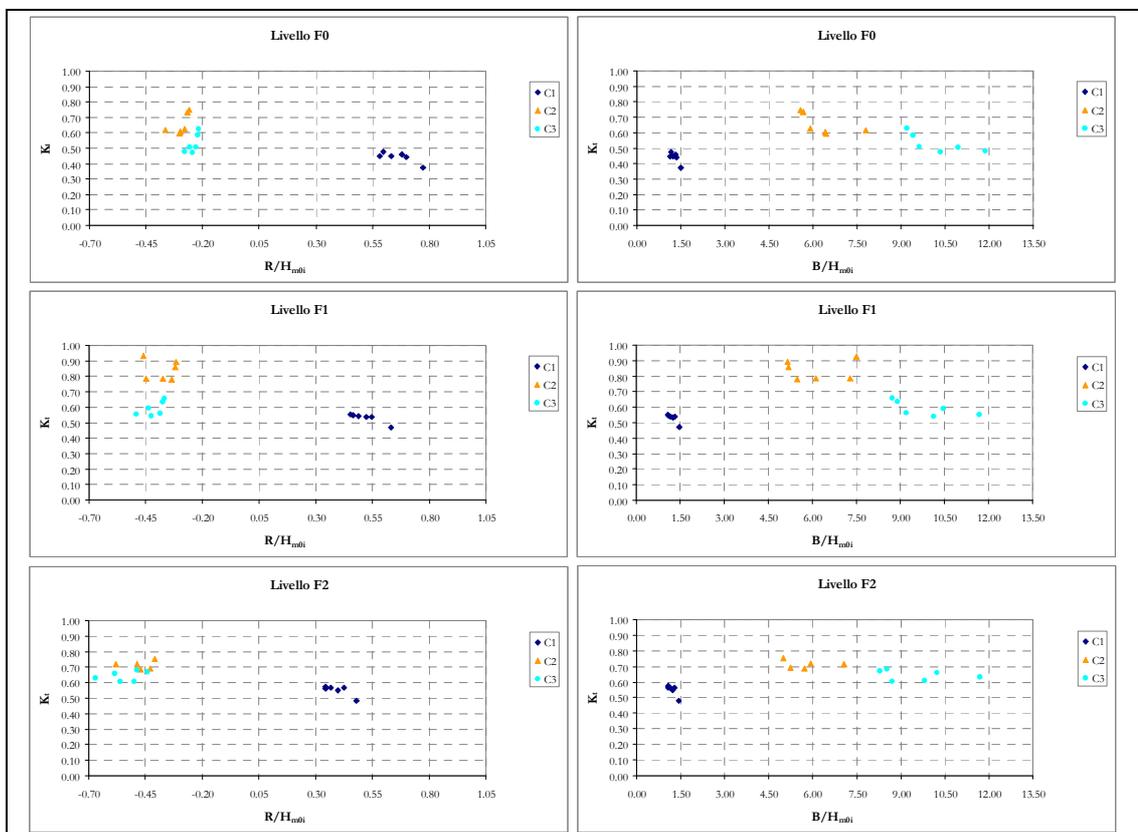


Figura 6.33 - Andamento di K_t in funzione di R/H_{m0i} (a sinistra) e di B/H_{m0i} (a destra) relative alle configurazioni C1, C2 e C3, per ogni livello idrico target.

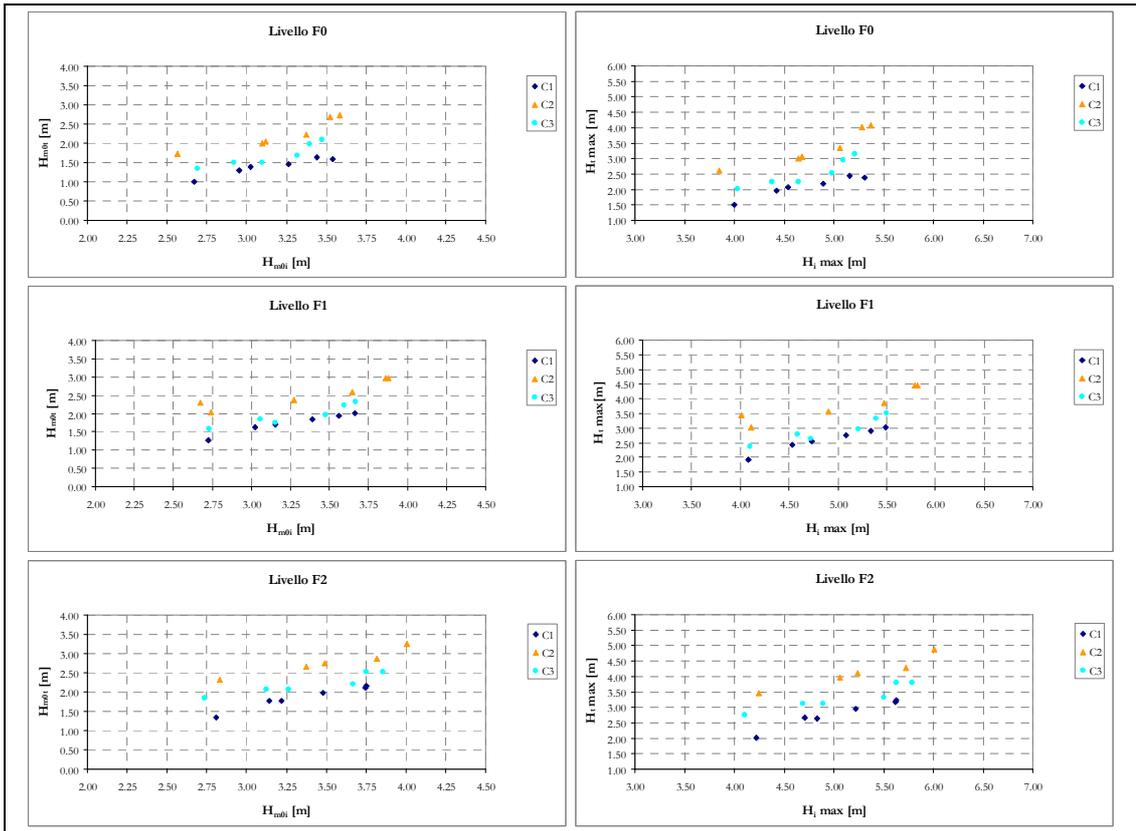


Figura 6.34 - Andamento in scala prototipo di H_{m0t} in funzione di H_{m0i} (a sinistra) e di $H_t \text{ max}$ in funzione di H_{m0i} (a destra), relativo alle configurazioni C1, C2 e C3, per ogni livello idrico target.

6.3.3 Water set-up

Insieme al coefficiente di trasmissione dell'onda per ogni prova, è stato misurato il water set-up o sovrizzo, η .

Dato che in questa sessione sperimentale i valori di η davanti alla scogliera sono prossimi allo 0, è stato preso come valore di water set-up il valore di η , misurato dalla sonda in posizione 6, nella zona protetta.

Nelle figure 6.35, 6.36, 6.37 e 6.38, viene evidenziato l'andamento del water set-up in funzione dell'onda incidente H_{m0i} , per tutte le configurazioni studiate.

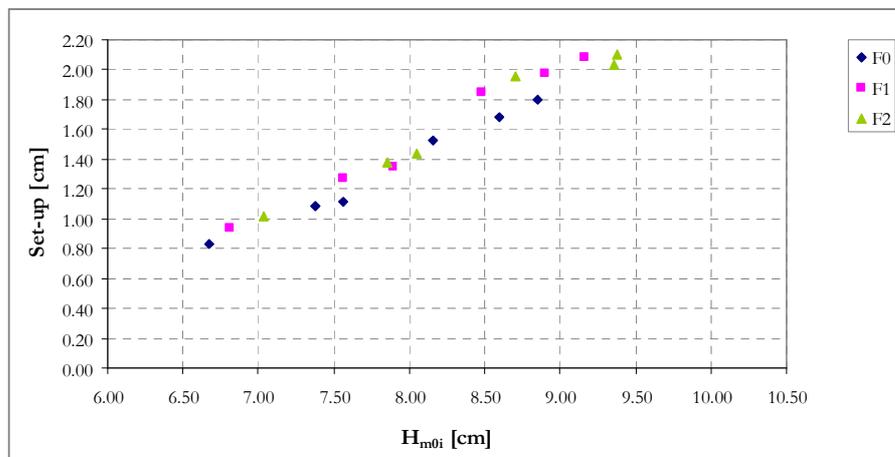


Figura 6.35 - Andamento del Set-up in funzione dell'altezza d'onda incidente per la configurazione C1 senza ricircolo.

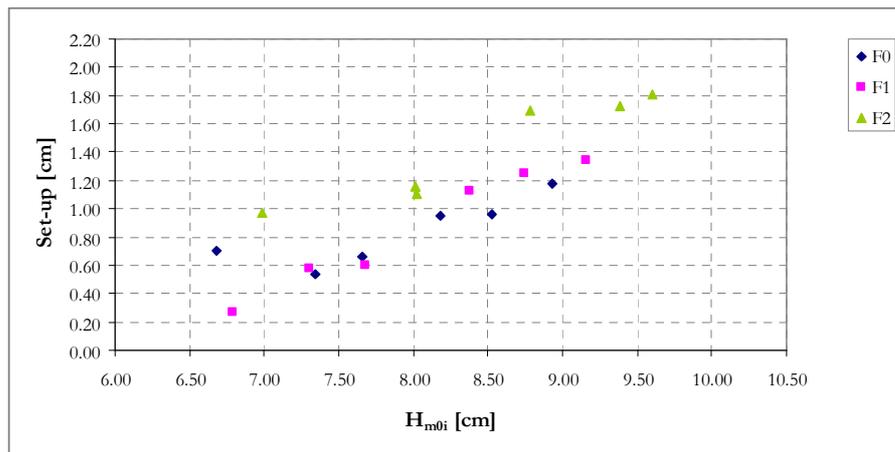


Figura 6.36 - Andamento del Set-up in funzione dell'altezza d'onda incidente per la configurazione C1 con ricircolo.

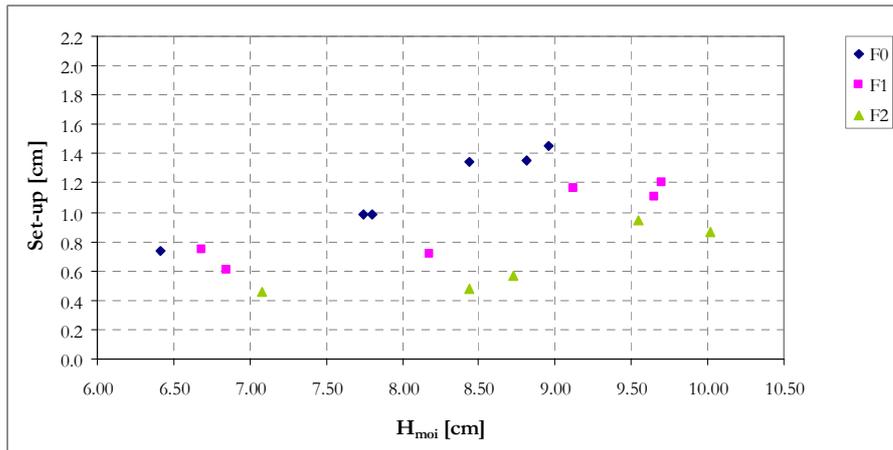


Figura 6.37 - Andamento del Set-up in funzione dell'altezza d'onda incidente per la configurazione C2.

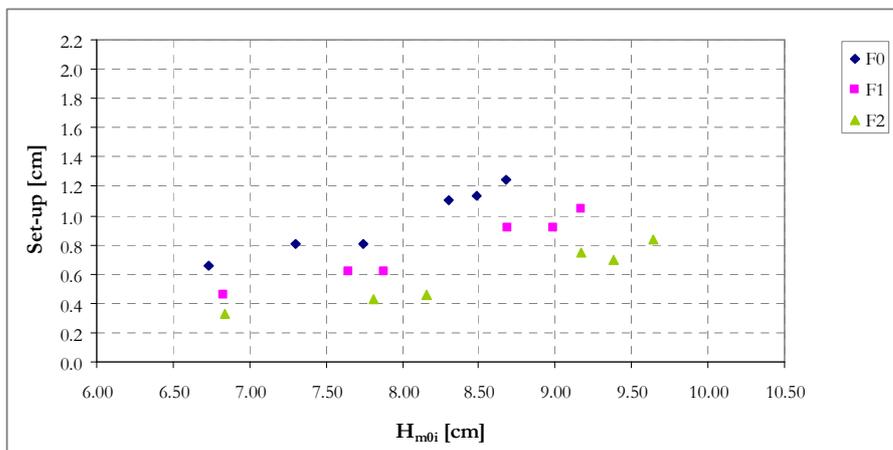


Figura 6.38 - Andamento del Set-up in funzione dell'altezza d'onda incidente per la configurazione C3.

Dai grafici è possibile notare, come ci aspettavamo, che la simulazione della corrente di rip, attraverso l'attivazione del sistema di ricircolo, implica un cospicuo abbassamento del livello di Set-up, oltre al fatto che il set up è legato all'aumento del livello idrico.

Nelle Tabelle 6.43, 6.44, 6.45 e 6.46 sono rappresentati per ogni altezza d'onda generata i diversi valori di set-up in funzione dei diversi periodi di generazione.

Tabella 6.43: Set-up in relazione al periodo e al livello idrico per le prove relative alla configurazione C1 con sistema di ricircolo spento.

Altezza d'onda generata [cm]	T [sec]	Set-up per F0 [cm]	Set-up per F1 [cm]	Set-up per F2 [cm]
H1: 10	1.1	0.83	0.94	1.02
	1.4	1.09	1.27	1.38
	1.7	1.11	1.35	1.44
H2: 15	1.4	1.53	1.85	1.96
	1.7	1.68	1.98	2.03
H3: 18	1.7	1.80	2.08	2.10

Tabella 6.44: Set-up in relazione al periodo e al livello idrico per le prove relative alla configurazione C1 con sistema di ricircolo acceso.

Altezza d'onda generata [cm]	T [sec]	Set-up per F0 [cm]	Set-up per F1 [cm]	Set-up per F2 [cm]
H1: 10	1.1	1.1	0.70	0.27
	1.4	1.4	0.54	0.58
	1.7	1.7	0.66	0.60
H2: 15	1.4	1.4	0.95	1.13
	1.7	1.7	0.96	1.25
H3: 18	1.7	1.7	1.18	1.34

Tabella 6.45: Set-up in relazione al periodo e al livello idrico per le prove relative alla configurazione C2.

Altezza d'onda generata [cm]	T [sec]	Set-up per F0 [cm]	Set-up per F1 [cm]	Set-up per F2 [cm]
H1: 10	1.1	0.74	0.61	0.46
	1.4	0.99	0.75	0.57
	1.7	0.99	0.72	0.48
H2: 15	1.4	1.34	1.16	0.95
	1.7	1.35	1.10	0.87
H3: 18	1.7	1.45	1.20	-

Tabella 6.46: Set-up in relazione al periodo e al livello idrico per le prove relative alla configurazione C3.

Altezza d'onda generata [cm]	T [sec]	Set-up per F0 [cm]	Set-up per F1 [cm]	Set-up per F2 [cm]
H1: 10	1.1	0.66	0.46	0.33
	1.4	0.81	0.62	0.46
	1.7	0.81	0.62	0.43
H2: 15	1.4	1.10	0.92	0.75
	1.7	1.13	0.92	0.70
H3: 18	1.7	1.24	1.05	0.84

Nei grafici delle Figure 6.39, 6.40, 6.41 e 6.42, è stato messo in relazione il periodo di generazione dell'onda T , con il corrispondente valore del set-up.

Analogamente a quanto visto per l'analisi dell'onda trasmessa, sono state rappresentate nove serie di punti, che rappresentano l'altezza d'onda generata in funzione del livello idrico.

Come per l'onda trasmessa da questi grafici è possibile notare l'influenza del periodo di generazione sui valori di set-up misurati, oltre all'abbassamento di set-up dovuto all'attivazione del sistema di ricircolo nella prova per la configurazione C1.

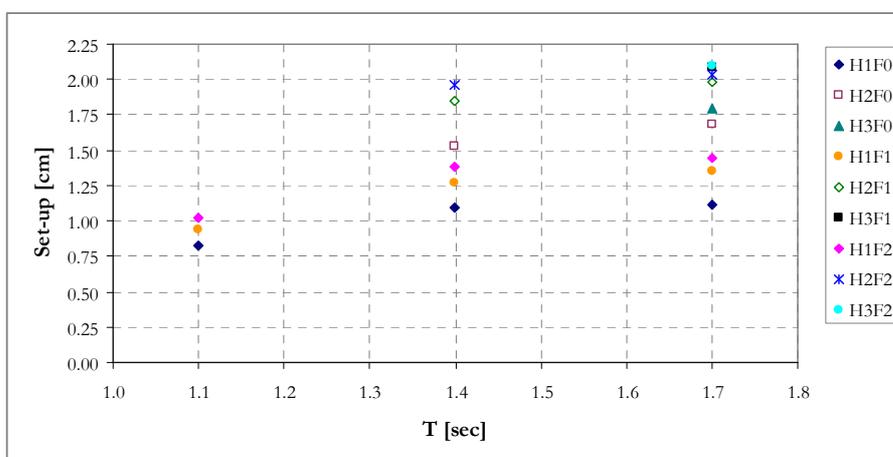


Figura 6.39 - Andamento del Set-up in funzione del periodo di generazione per la configurazione C1 senza ricircolo.

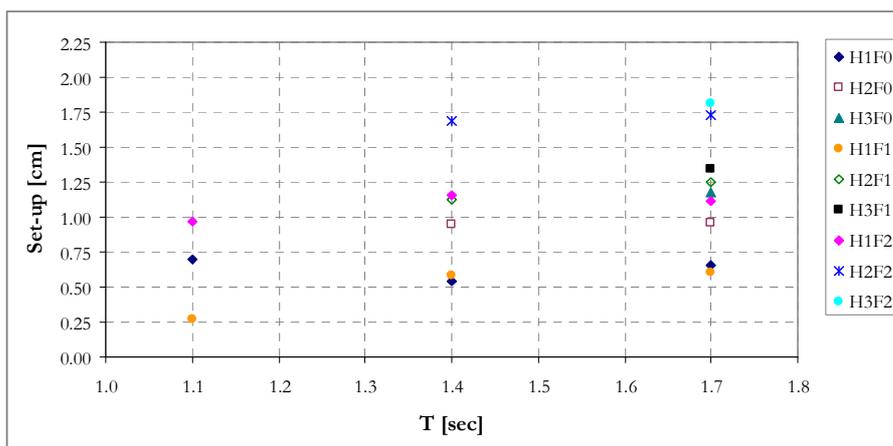


Figura 6.40 - Andamento del Set-up in funzione del periodo di generazione per la configurazione C1 con ricircolo.

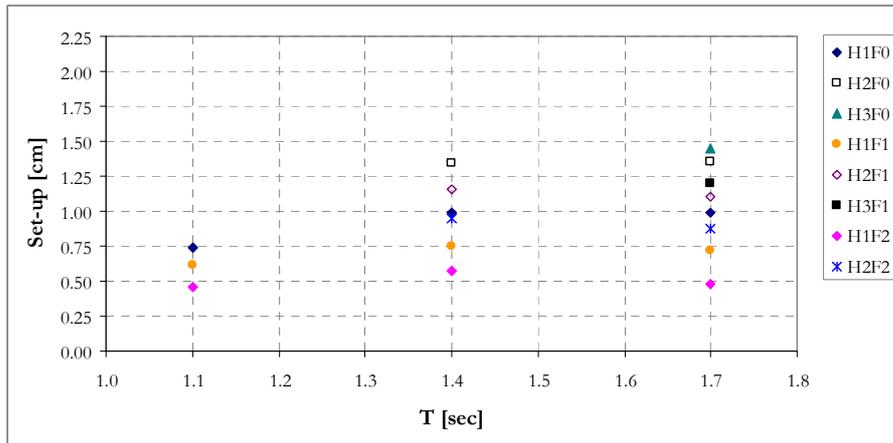


Figura 6.41 - Andamento del Set-up in funzione del periodo di generazione per la configurazione C2.

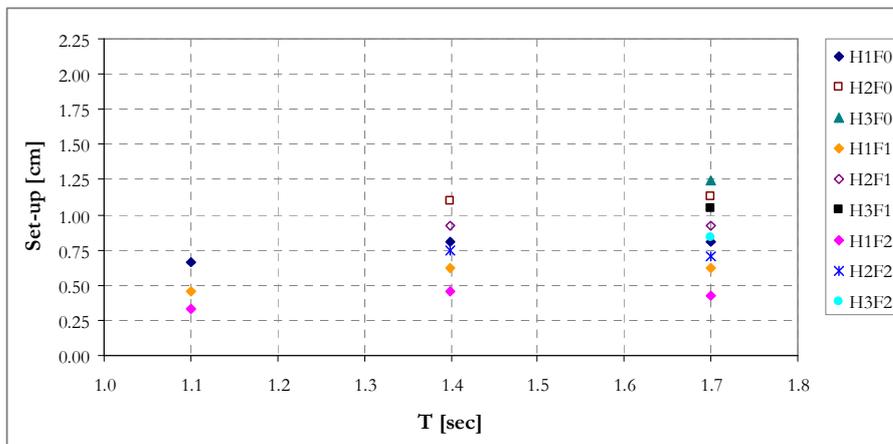


Figura 6.42 - Andamento del Set-up in funzione del periodo di generazione per la configurazione C3.

Nelle figure 6.43, 6.44, 6.45 e 6.46, è possibile visualizzare l'andamento del set-up adimensionalizzato con l'altezza d'onda incidente ($\text{Set-up}/H_{m0i}$) in funzione del rapporto R/H_{m0i} , dove l'altezza d'onda incidente è adimensionalizzata con R, il freeboard relativo ad ogni attacco ondoso.

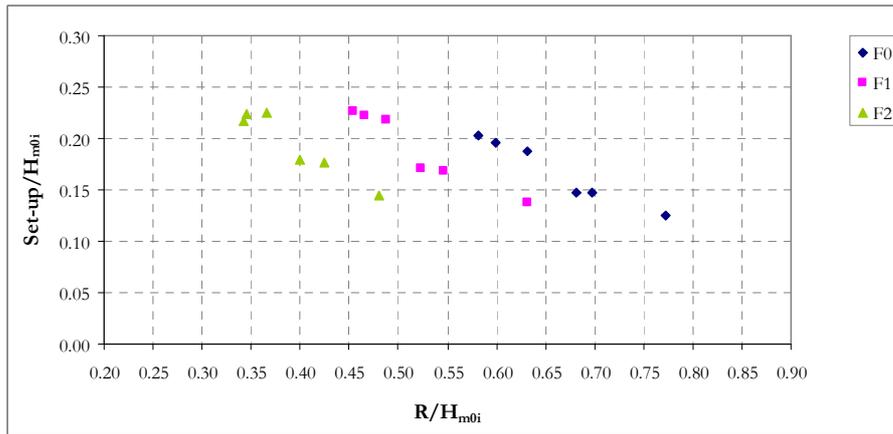


Figura 6.43 - Andamento di Set-up/H_{m0i} in funzione di R/H_{m0i} per la configurazione C1 senza ricircolo.

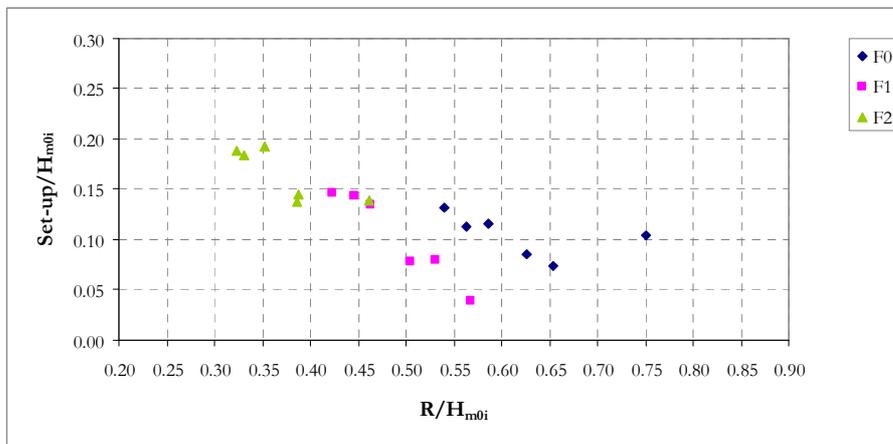


Figura 6.44 - Andamento di Set-up/H_{m0i} in funzione di R/H_{m0i} per la configurazione C1 con ricircolo.

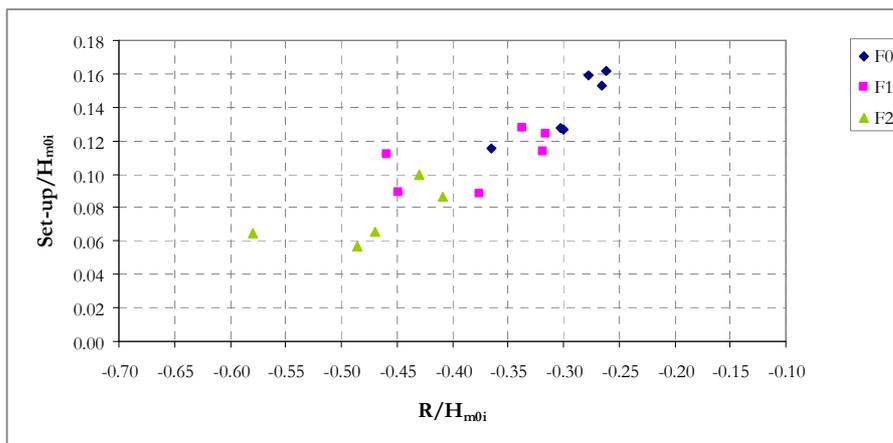


Figura 6.45 - Andamento di Set-up/H_{m0i} in funzione di R/H_{m0i} per la configurazione C2.

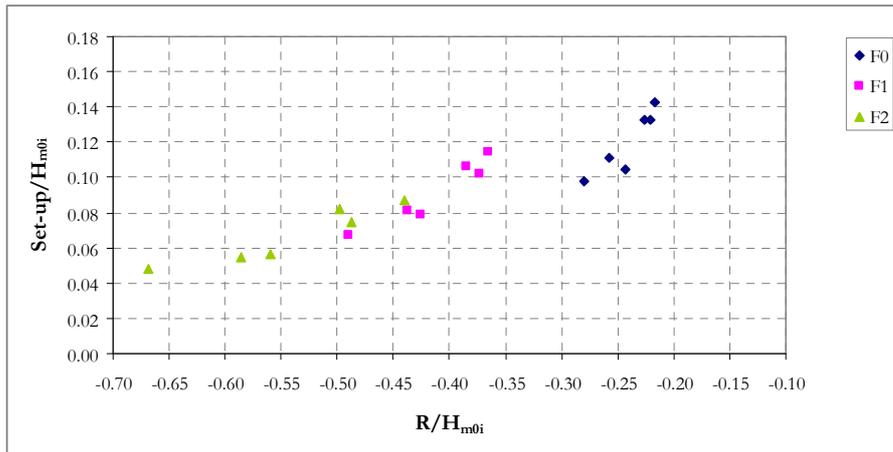


Figura 6.46 - Andamento di Set-up/H_{m0i} in funzione di R/H_{m0i} per la configurazione C3.

Nelle figure 6.47, 6.48, 6.49 e 6.50, è possibile invece visualizzare l'andamento del set-up adimensionalizzato con l'altezza d'onda incidente e con il rapporto B/L₀ ((Set-up/H_{m0i})*(B/L₀)) in funzione del rapporto R/H_{m0i}, dove l'altezza d'onda incidente è adimensionalizzata come nel caso precedente con R, il freeboard relativo ad ogni attacco ondos.

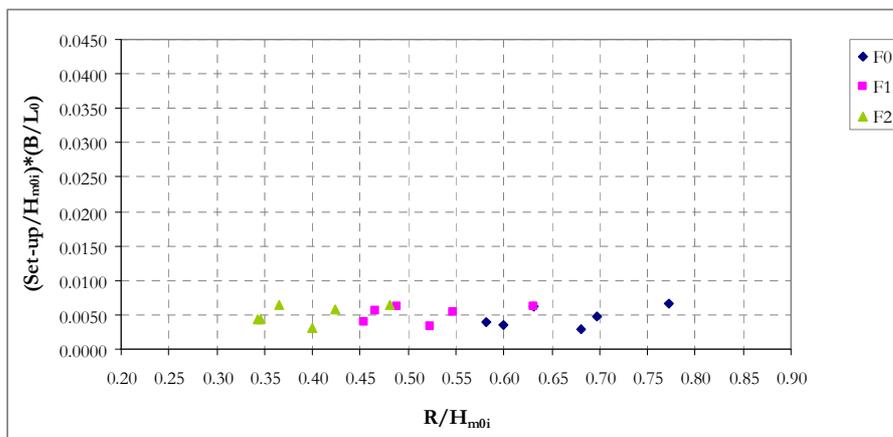


Figura 6.47 - Andamento di (Set-up/H_{m0i})*(B/L₀) in funzione di R/H_{m0i} per la configurazione C1 senza ricircolo.

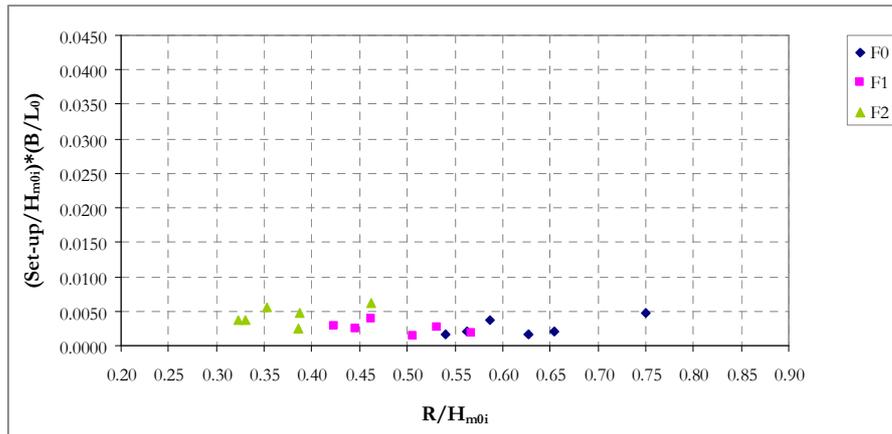


Figura 6.48 - Andamento di $(\text{Set-up}/H_{m0i}) \cdot (B/L_0)$ in funzione di R/H_{m0i} per la configurazione C1 con ricircolo.

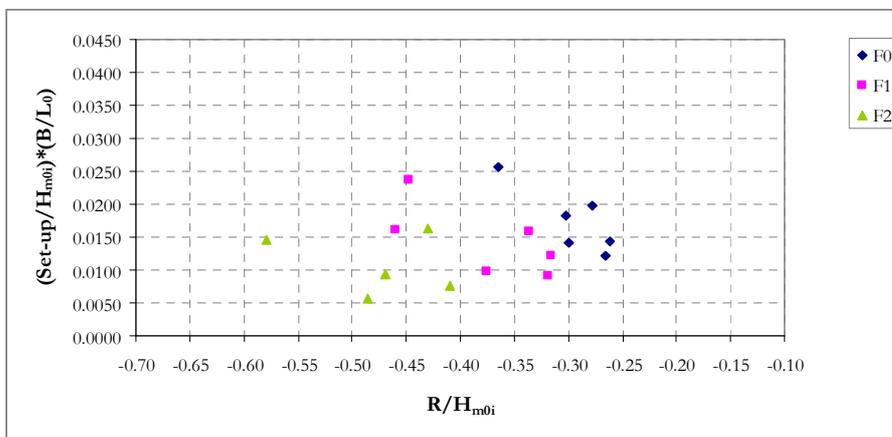


Figura 6.49 - Andamento di $(\text{Set-up}/H_{m0i}) \cdot (B/L_0)$ in funzione di R/H_{m0i} per la configurazione C2.

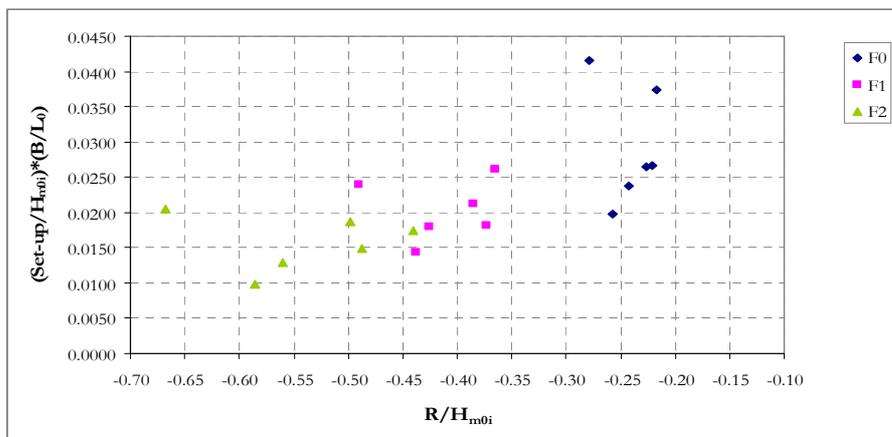


Figura 6.50 - Andamento di $(\text{Set-up}/H_{m0i}) \cdot (B/L_0)$ in funzione di R/H_{m0i} per la configurazione C3.

Nelle figure 6.51, 6.52, 6.53 e 6.54, è possibile invece visualizzare l'andamento del set-up adimensionalizzato con l'altezza d'onda incidente ($\text{Set-up}/H_{m0i}$) in funzione del rapporto B/H_{m0i} , dove l'altezza d'onda incidente è adimensionalizzata con B , la larghezza della cresta della scogliera.

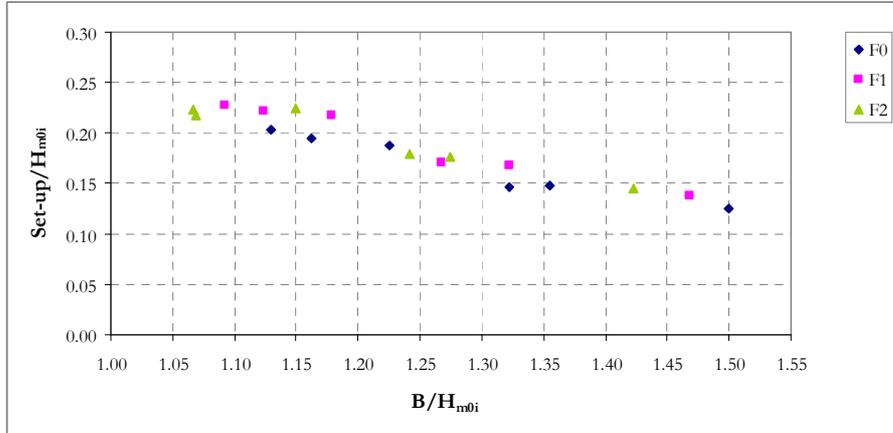


Figura 6.51 - Andamento di $\text{Set-up}/H_{m0i}$ in funzione di B/H_{m0i} per la configurazione C1 senza ricircolo.

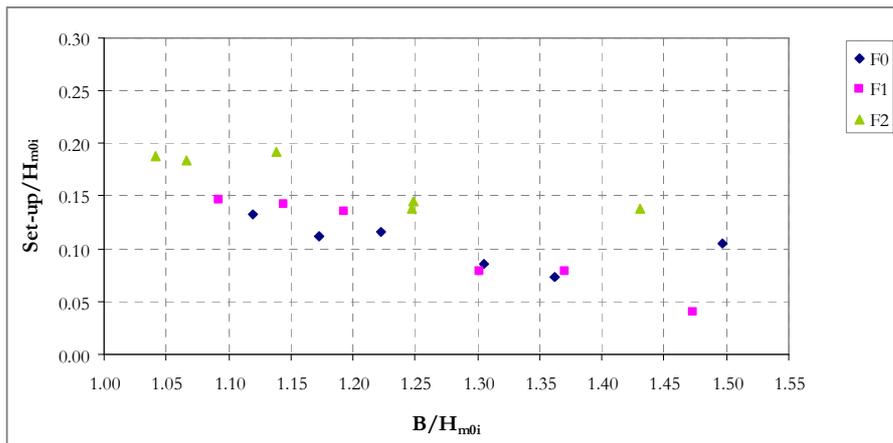


Figura 6.52 - Andamento di $\text{Set-up}/H_{m0i}$ in funzione di B/H_{m0i} per la configurazione C1 con ricircolo.

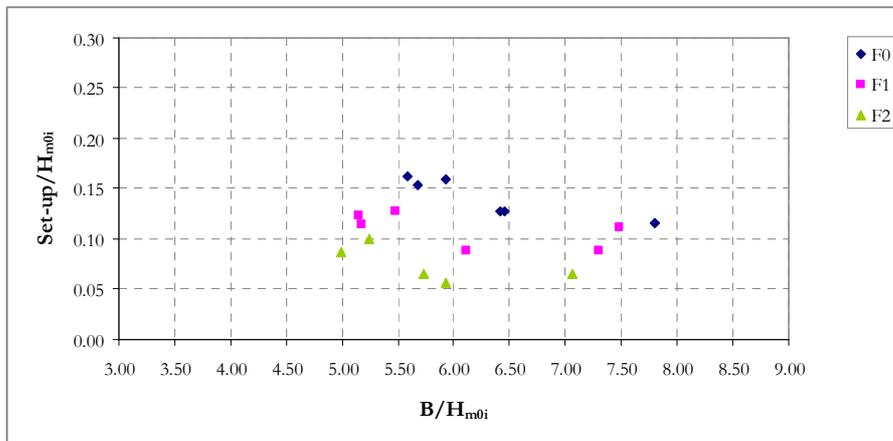


Figura 6.53 - Andamento di $\text{Set-up}/H_{m0i}$ in funzione di B/H_{m0i} per la configurazione C2.

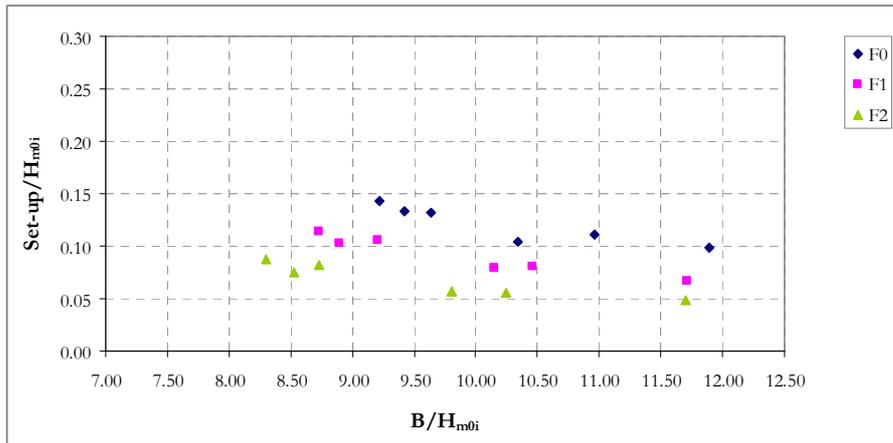


Figura 6.54 - Andamento di Set-up/ H_{m0i} in funzione di B/H_{m0i} per la configurazione C3.

Come nel caso dell'onda trasmessa, la variazione di Set-up/ H_{m0i} in funzione dell'altezza d'onda incidente adimensionalizzata con la lunghezza d'onda a largo L_0 (H_{m0i}/L_0), viene rappresentata su un grafico con una serie di punti, ogni serie di punti rappresenta un livello idrico (figure 6.55, 6.56, 6.57 e 6.58).

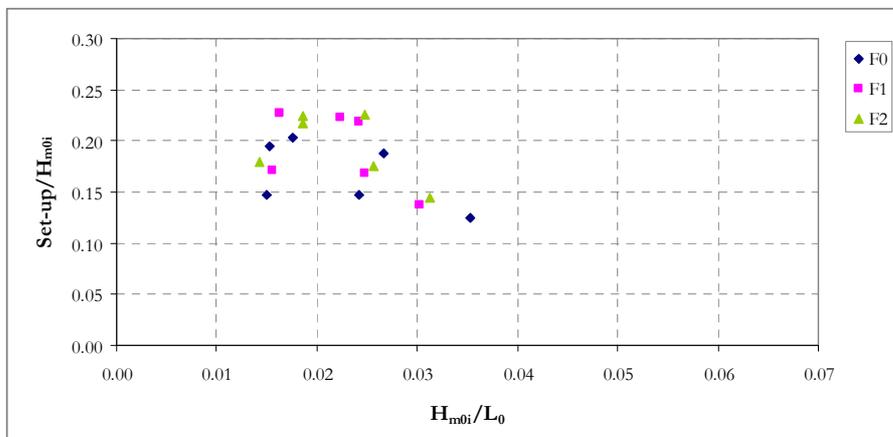


Figura 6.55 - Andamento di Set-up/ H_{m0i} in funzione di H_{m0i}/L_0 per la configurazione C1 senza ricircolo.

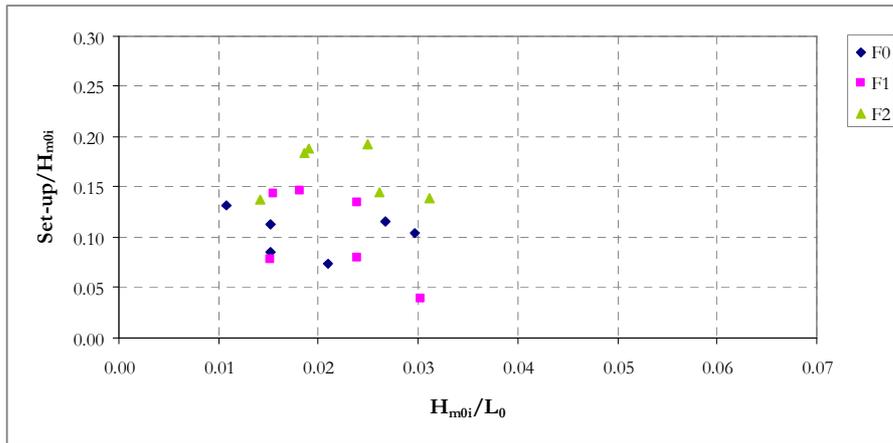


Figura 6.56 - Andamento di Set-up/ H_{m0i} in funzione di H_{m0i}/L_0 per la configurazione C1 con ricircolo.

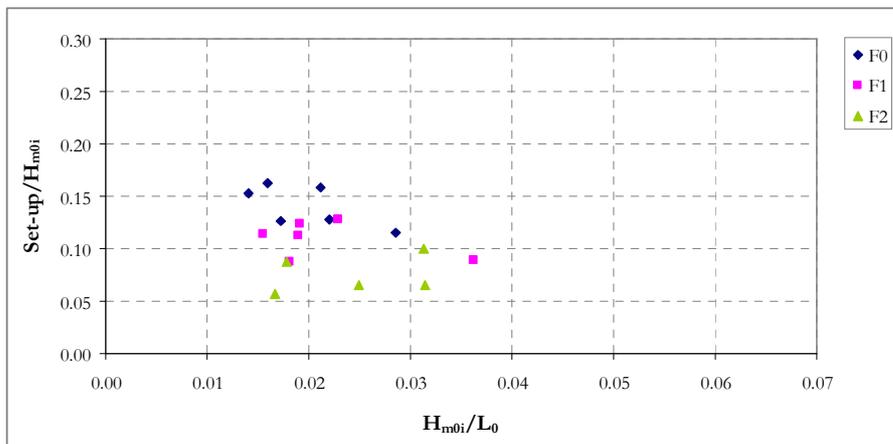


Figura 6.57 - Andamento di Set-up/ H_{m0i} in funzione di H_{m0i}/L_0 per la configurazione C2.

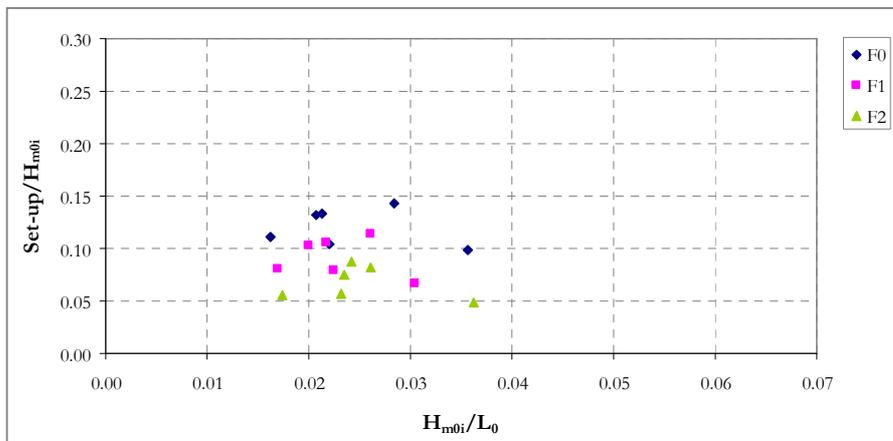


Figura 6.58 - Andamento di Set-up/ H_{m0i} in funzione di H_{m0i}/L_0 per la configurazione C3.

Anche dal confronto di questi grafici si nota un cospicuo abbassamento del set-up dovuto all'attivazione del sistema di ricircolo, fenomeno che si voleva simulare in fase di progetto, inoltre si nota l'influenza del set-up in relazione ai tre livelli idrici in canale, e all'incremento della lunghezza d'onda.

I grafici delle figure 6.59, 6.60, 6.61 e 6.62, descrivono l'andamento del set-up in funzione dell'altezza d'onda incidente in scala prototipo.

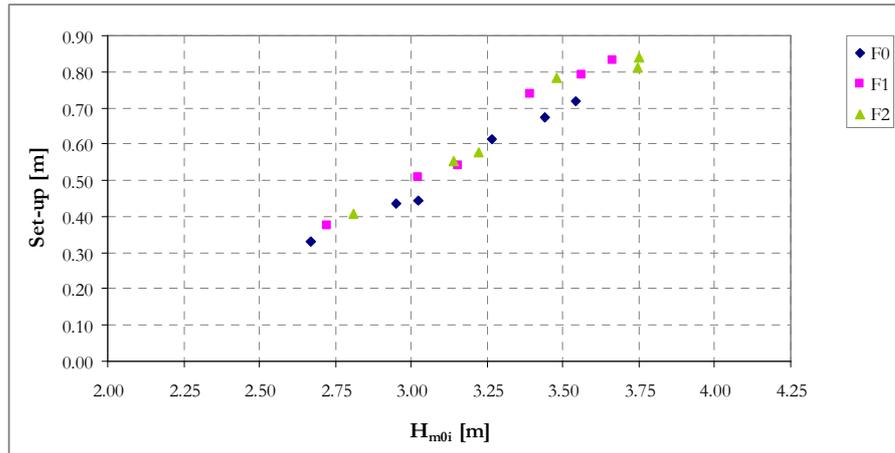


Figura 6.59 - Andamento del Set-up in funzione dell'onda incidente per la configurazione C1 senza ricircolo, in scala prototipo.

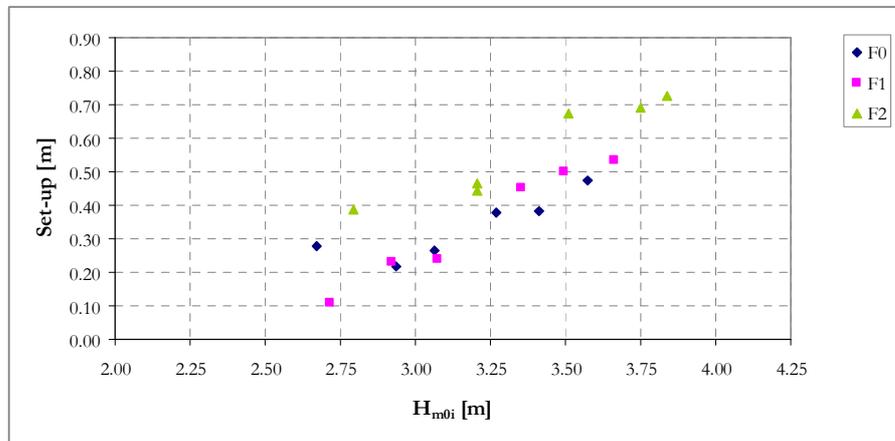


Figura 6.60 - Andamento del set-up in funzione dell'onda incidente per la configurazione C1 con ricircolo, in scala prototipo.

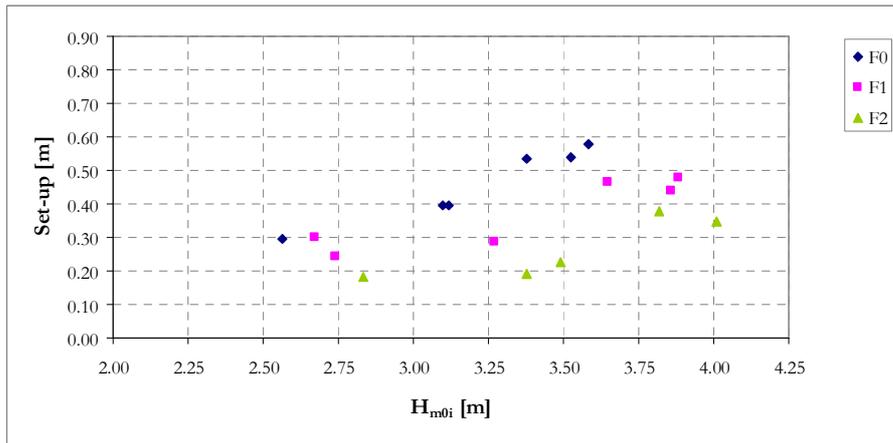


Figura 6.61 - Andamento del set-up in funzione dell'onda incidente per la configurazione C2, in scala prototipo.

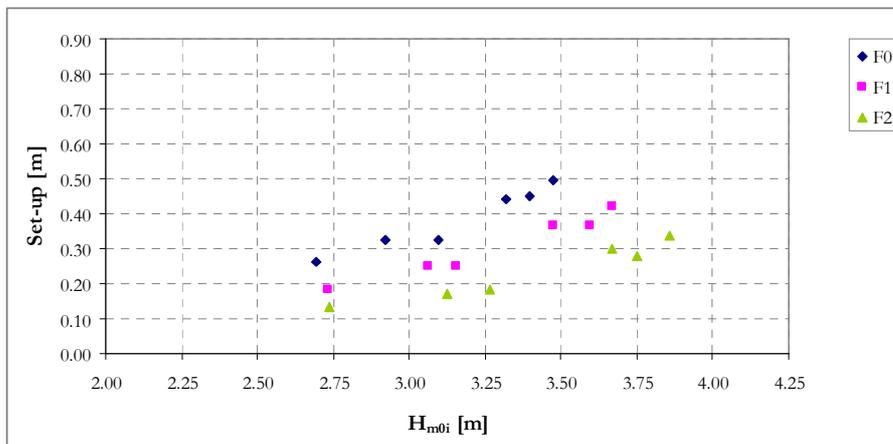


Figura 6.62 - Andamento del set-up in funzione dell'onda incidente per la configurazione C3, in scala prototipo.

Come nel caso della valutazione della trasmissione, nelle figure seguenti sono stati rappresentati i dati relativi all'analisi del Set-up, mettendo nello stesso grafico le configurazioni C1, C2 e C3, in funzione dei tre livelli idrici target, per evidenziare la variabilità dovuta alla diversa geometria.

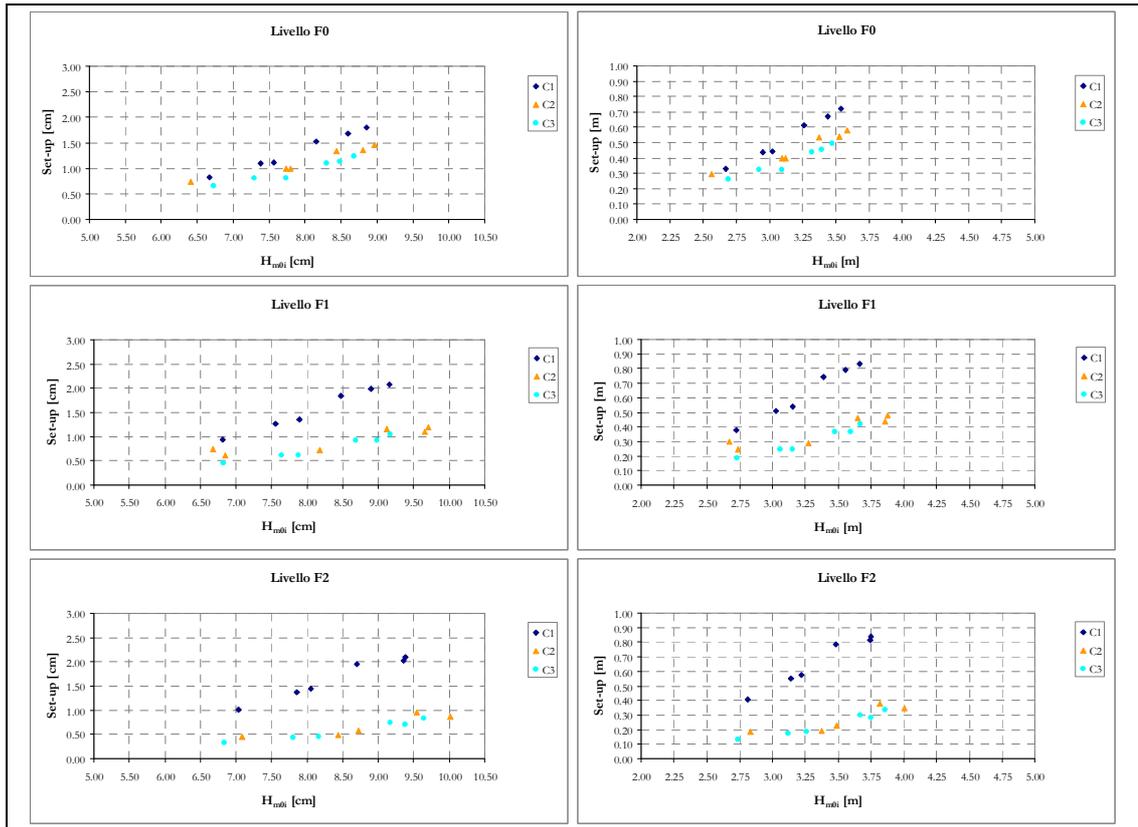


Figura 6.63 - Andamento del Set-up in funzione di H_{m0i} , in scala modello (a sinistra) e in scala prototipo (a destra) relativo alle configurazioni C1, C2 e C3, per ogni livello idrico target.

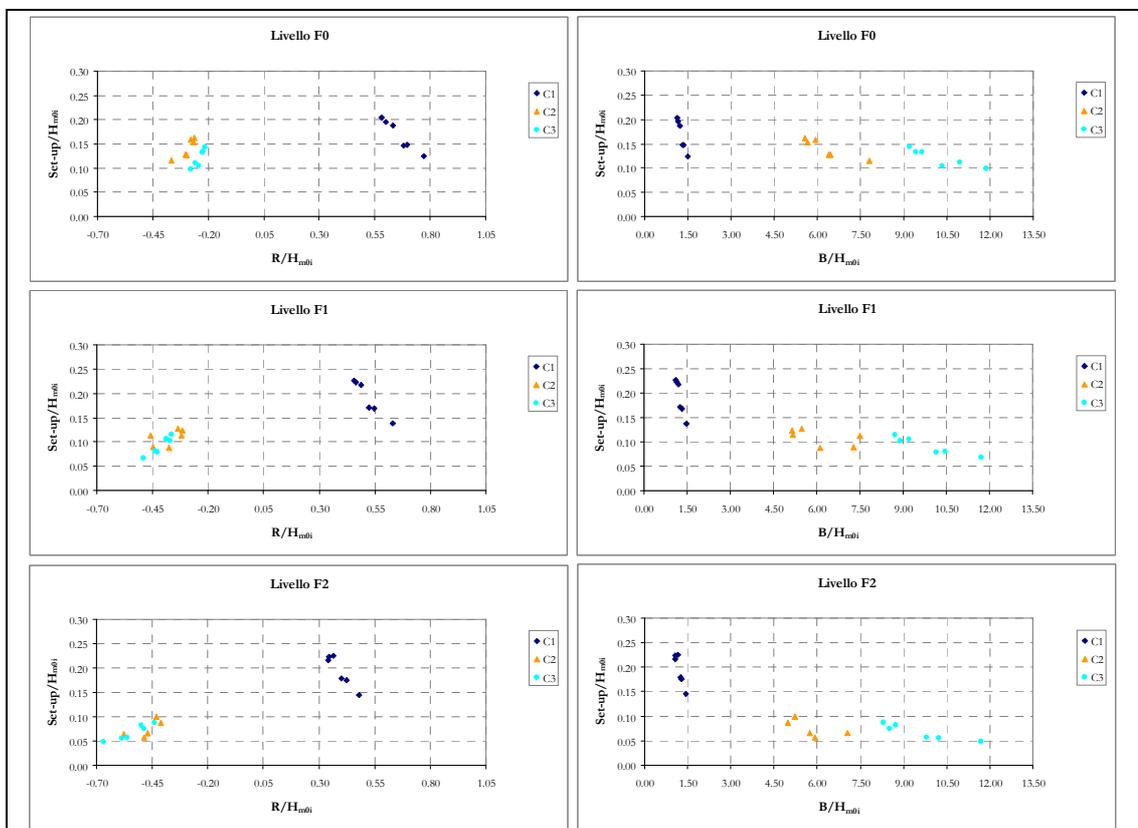


Figura 6.64 - Andamento di $\text{Set-up}/H_{m0i}$ in funzione di R/H_{m0i} (a sinistra) e di B/H_{m0i} (a destra) relativo alle configurazioni C1, C2 e C3, per ogni livello idrico target.

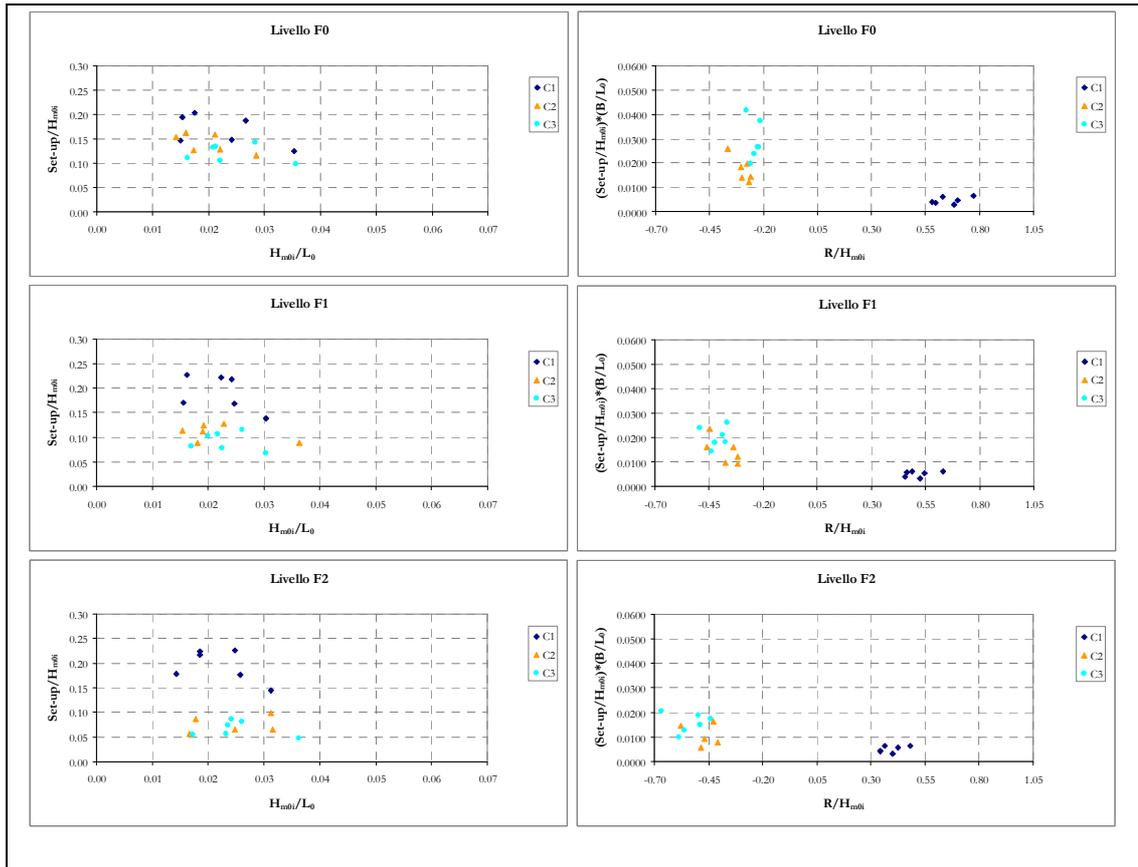


Figura 6.65 - Andamento di $Set-up/H_{m0i}$ in funzione di H_{m0i}/L_0 (a sinistra) e di $(Set-up/H_{m0i})*(B/L_0)$ (a destra), relativo alle configurazioni C1, C2 e C3, per ogni livello idrico target.

6.3.4 Overtopping

I dati relativi all'overtopping sono stati analizzati a partire dalle misure dei volumi di acqua tracimati sul pannello rappresentante la strada, durante la serie di prove e per le diverse configurazioni.

Nelle Tabelle seguenti sono riportate le portate di overtopping Q_w , relative alla configurazione C1 senza e con ricircolo, e alle configurazioni C2 e C3.

Tali portate sono state ottenute dividendo i volumi di overtopping, misurati per ogni attacco ondoso, per il tempo di durata della prova (900 sec) e per la larghezza del canale (0.80 m).

Tabella 6.47: Portate di overtopping per le prove relative alla configurazione C1 senza ricircolo.

Codice Onda	Q_w [l/sec*m]	Codice Onda	Q_w [l/sec*m]	Codice Onda	Q_w [l/sec*m]
I1F0C1	0	I1F1C1	0	I1F2C1	0
I2F0C1	0	I2F1C1	0	I2F2C1	0.0010
I3F0C1	0	I3F1C1	0	I3F2C1	0.0043
I4F0C1	0	I4F1C1	0.0003	I4F2C1	0.0050
I5F0C1	0.0022	I5F1C1	0.0042	I5F2C1	0.0334
I6F0C1	0.0016	I6F1C1	0.0146	I6F2C1	0.0625

Tabella 6.48: Portate di overtopping per le prove relative alla configurazione C1 con ricircolo.

Codice Onda	Q_w [l/sec*m]	Codice Onda	Q_w [l/sec*m]	Codice Onda	Q_w [l/sec*m]
I1F0C1R	0	I1F1C1R	0	I1F2C1R	0
I2F0C1R	0	I2F1C1R	0	I2F2C1R	0.0004
I3F0C1R	0	I3F1C1R	0	I3F2C1R	0.0039
I4F0C1R	0	I4F1C1R	0	I4F2C1R	0.0038
I5F0C1R	0.0004	I5F1C1R	0.0034	I5F2C1R	0.0203
I6F0C1R	0.0009	I6F1C1R	0.0061	I6F2C1R	0.0516

Tabella 6.49: Portate di overtopping per le prove relative alla configurazione C2.

Codice Onda	Q_w [l/sec*m]	Codice Onda	Q_w [l/sec*m]	Codice Onda	Q_w [l/sec*m]
I1F0C2	0	I1F1C2	0	I1F2C2	0
I2F0C2	0	I2F1C2	0.0013	I2F2C2	0.0090
I3F0C2	0.0010	I3F1C2	0.0055	I3F2C2	0.0192
I4F0C2	0.0003	I4F1C2	0.0018	I4F2C2	0.0181
I5F0C2	0.0018	I5F1C2	0.0169	I5F2C2	0.0628
I6F0C2	0.0104	I6F1C2	0.0486	I6F2C2	-

Tabella 6.50: Portate di overtopping per le prove relative alla configurazione C3.

Codice Onda	Q_w [l/sec*m]	Codice Onda	Q_w [l/sec*m]	Codice Onda	Q_w [l/sec*m]
I1F0C3	0	I1F1C3	0	I1F2C3	0.0006
I2F0C3	0	I2F1C3	0.0005	I2F2C3	0.0058
I3F0C3	0.0003	I3F1C3	0.0041	I3F2C3	0.0208
I4F0C3	0.0003	I4F1C3	0.0026	I4F2C3	0.0211
I5F0C3	0.0018	I5F1C3	0.0101	I5F2C3	0.0671
I6F0C3	0.0056	I6F1C3	0.0328	I6F2C3	-

Nelle figure 6.66, 6.67, 6.68 e 6.69 è rappresentato l'andamento della portata di overtopping, Q_w in relazione all'altezza d'onda incidente H_{m0i} , per tutte le configurazioni eseguite in laboratorio.

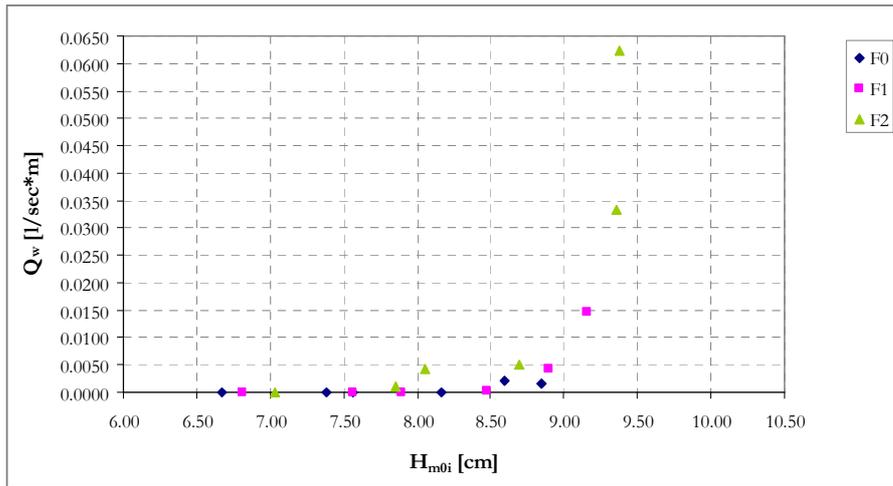


Figura 6.66 - Andamento della portata di overtopping in funzione dell'onda incidente per la configurazione C1 senza ricircolo.

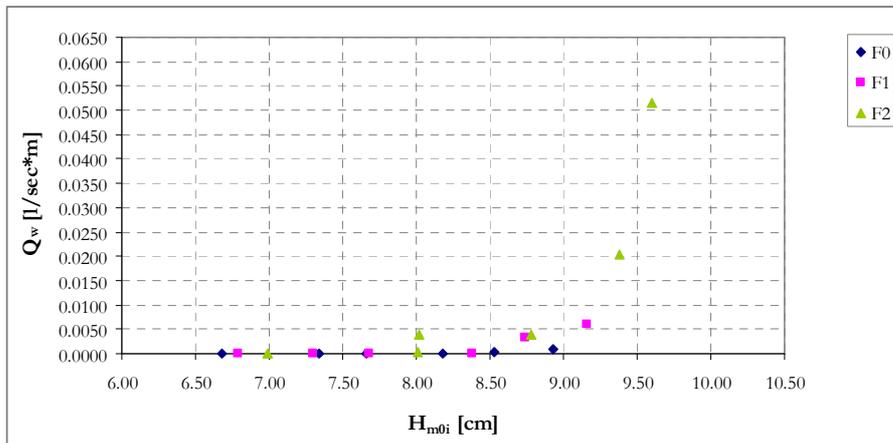


Figura 6.67 - Andamento della portata di overtopping in funzione dell'onda incidente per la configurazione C1 con ricircolo.

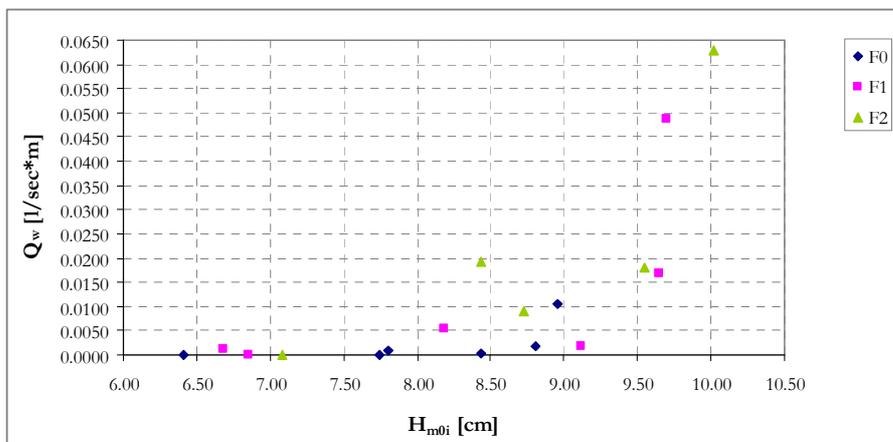


Figura 6.68 - Andamento della portata di overtopping in funzione dell'onda incidente per la configurazione C2.

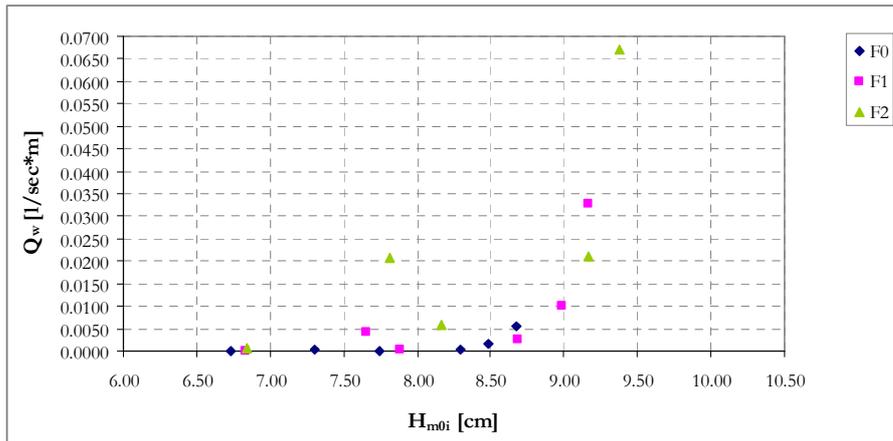


Figura 6.69 - Andamento della portata di overtopping in funzione dell'onda incidente per la configurazione C3.

Nei grafici seguenti (figure 6.70, 6.71, 6.72 e 6.73) è possibile visualizzare l'andamento dell'overtopping, adimensionalizzato con $\sqrt{H_{m0i}^3 \cdot g}$, e chiamato Q^* , in funzione del rapporto R/H_{m0i} , dove l'altezza d'onda incidente è adimensionalizzata con R , il freeboard relativo ad ogni attacco ondos.

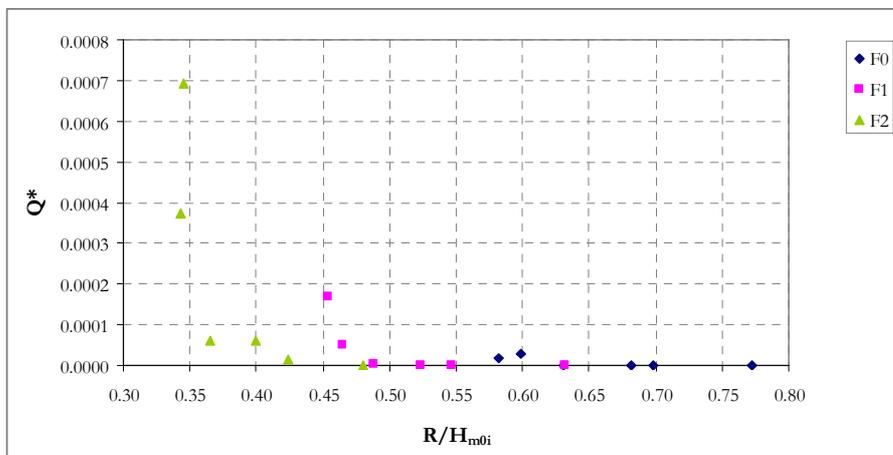


Figura 6.70 - Andamento di Q^* in funzione di R/H_{m0i} per la configurazione C1 senza ricircolo.

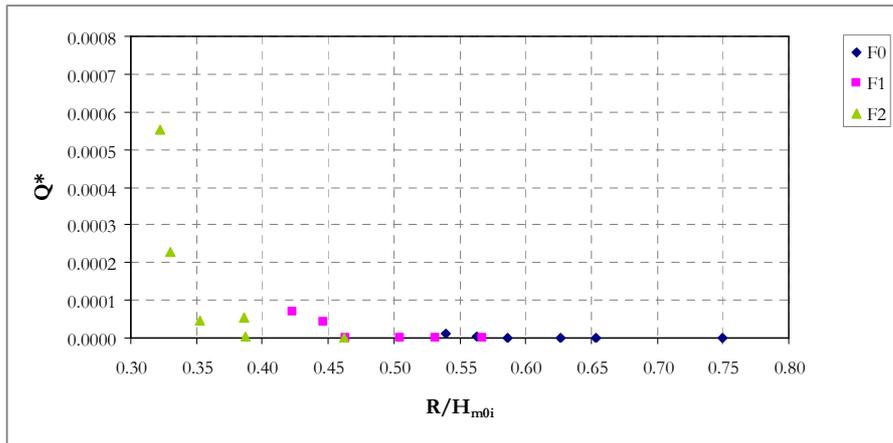


Figura 6.71- Andamento di Q^* in funzione di R/H_{m0i} per la configurazione C1 con ricircolo.

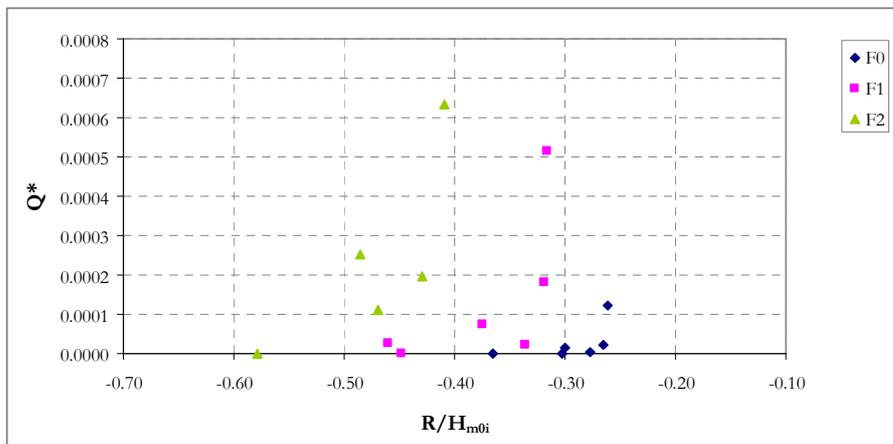


Figura 6.72 - Andamento di Q^* in funzione di R/H_{m0i} per la configurazione C2.

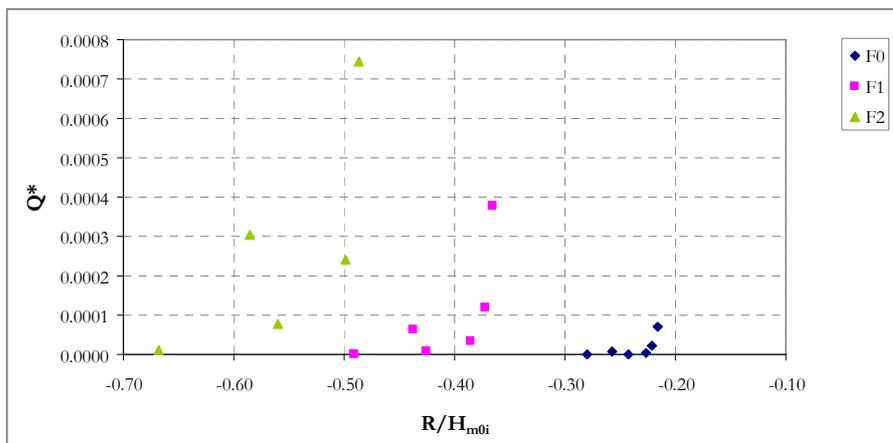


Figura 6.73 - Andamento di Q^* in funzione di R/H_{m0i} per la configurazione C3.

Nelle figure 6.74, 6.75, 6.76 e 6.77, è possibile invece visualizzare l'andamento dell'overtopping adimensionalizzato, Q^* , in funzione del rapporto B/H_{m0i} , dove l'altezza d'onda incidente è adimensionalizzata con B , la larghezza della cresta della scogliera.

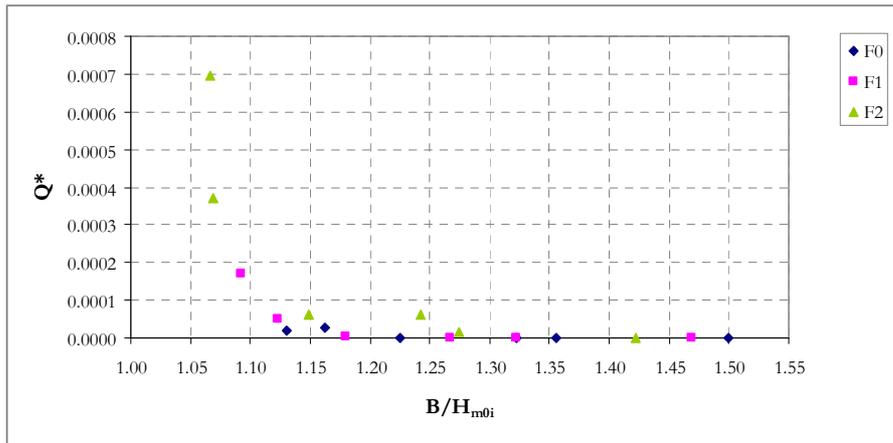


Figura 6.74 - Andamento di Q^* in funzione di B/H_{m0i} , per la configurazione C1 senza ricircolo

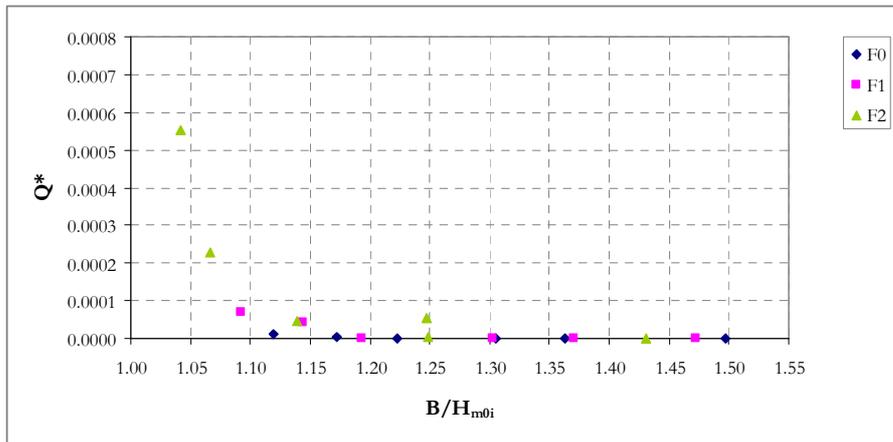


Figura 6.75 - Andamento di Q^* in funzione di B/H_{m0i} , per la configurazione C1 con ricircolo.

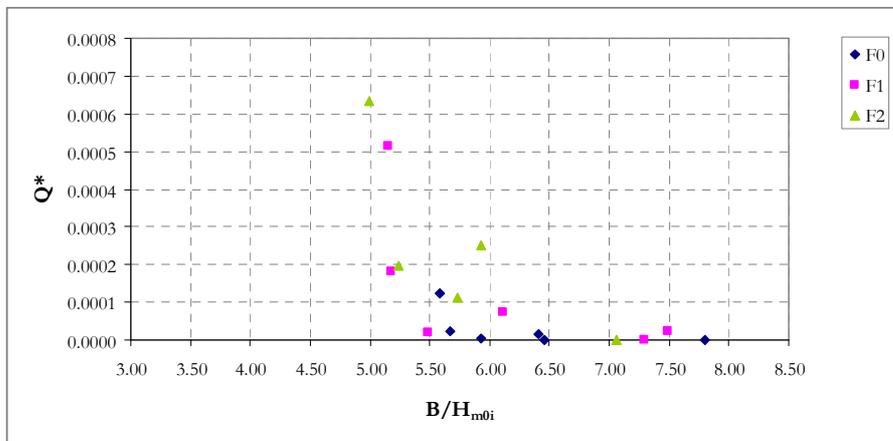


Figura 6.76 - Andamento di Q^* in funzione di B/H_{m0i} , per la configurazione C2.

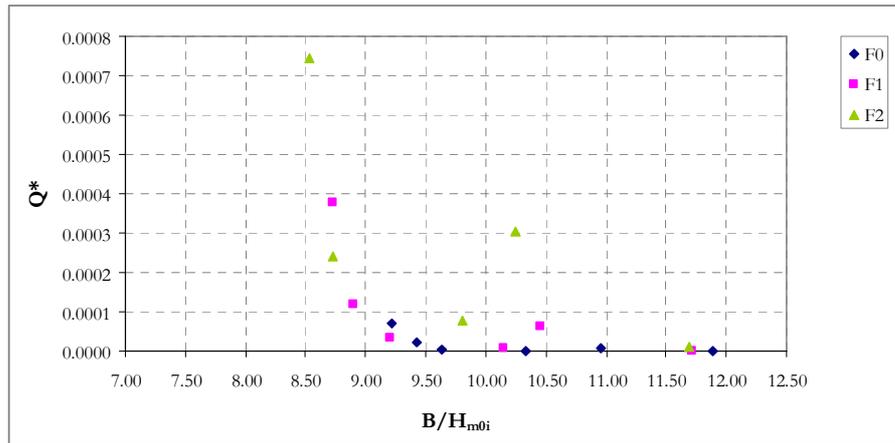


Figura 6.77 - Andamento di Q^* in funzione di B/H_{m0i} , per la configurazione C3.

Dai grafici si nota che l'andamento dell'overtopping nei livelli F0 e F1, si mantiene su valori relativamente bassi, anche per attacchi ondosi più violenti. Nel livello più alto F2, il valore dell'overtopping tende a crescere vistosamente, si nota, inoltre una cospicua diminuzione dei volumi tracimati dovuta all'attivazione dell'impianto di ricircolo.

Come nel caso dell'analisi dell'onda trasmessa e del water set-up, nelle figure 6.78, 6.79, 6.80 e 6.81 è rappresentata la variazione di Q^* rispetto alla ripidità dell'onda, espressa come H_{m0i}/L_0 .

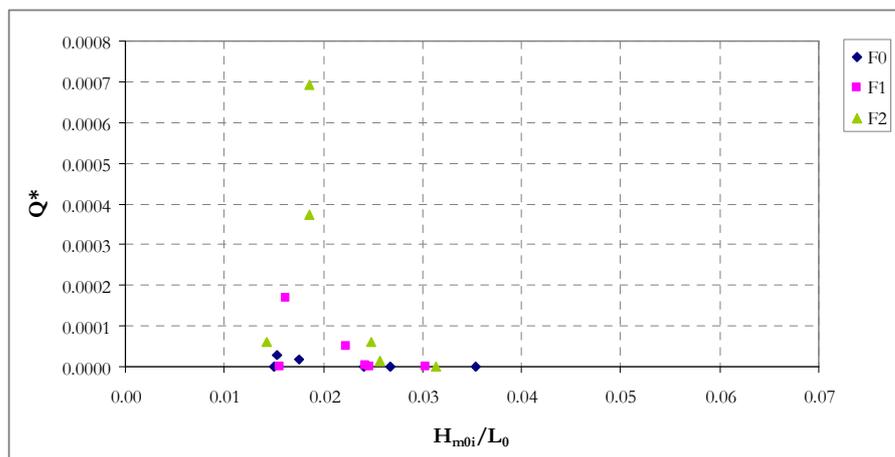


Figura 6.78 - Andamento di Q^* in funzione di H_{m0i}/L_0 per la configurazione C1 senza ricircolo.

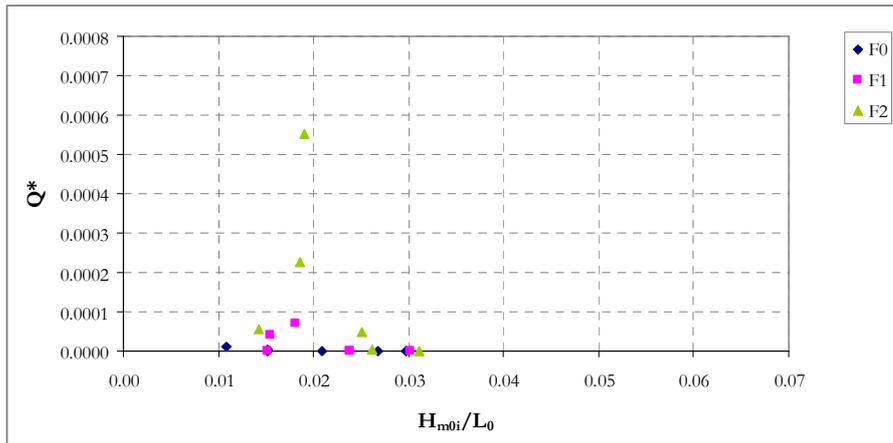


Figura 6.79 - Andamento di Q^* in funzione di H_{m0i}/L_0 per la configurazione C1 con ricircolo.

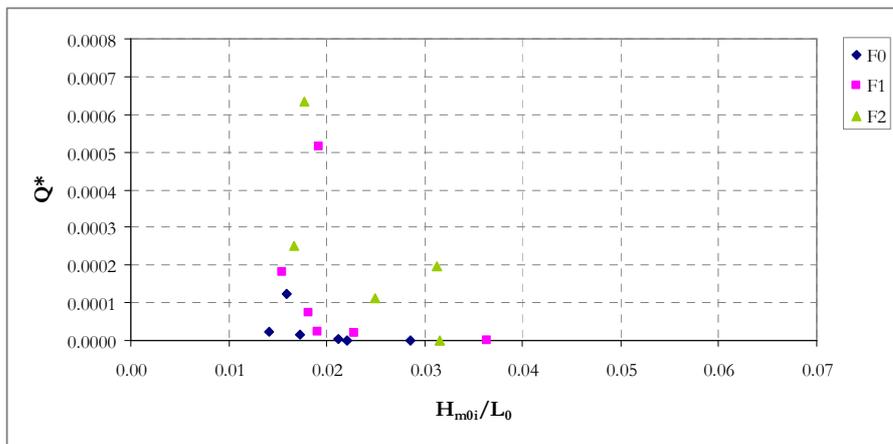


Figura 6.80 - Andamento di Q^* in funzione di H_{m0i}/L_0 per la configurazione C2.

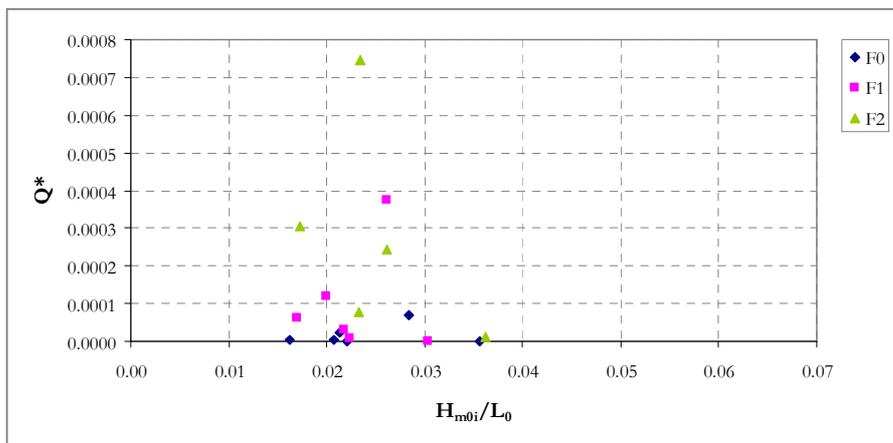


Figura 6.81 - Andamento di Q^* in funzione di H_{m0i}/L_0 per la configurazione C3.

Un parametro importante nella valutazione del fenomeno di overtopping oltre alla misura dei volumi tracimati, è la frequenza delle singole tracimazioni durante l'attacco ondosso, questo rende l'idea del disagio provocato dalla mareggiata in zone, come Marina di Pisa, che hanno la strada litoranea adiacente alla scogliera radente.

Le tracimazioni sono state divise in due classi: "Green Water", quando la tracimazione avvolge e oltrepassa la scogliera radente, e "White Water", quando la scogliera radente è oltrepassata solo dallo spray generato dal frangimento dell'onda sulla scogliera radente.

In figura 6.82, è rappresentato l'andamento del numero di "Green Water" al minuto, in relazione all'altezza d'onda incidente per le configurazioni studiate in laboratorio.

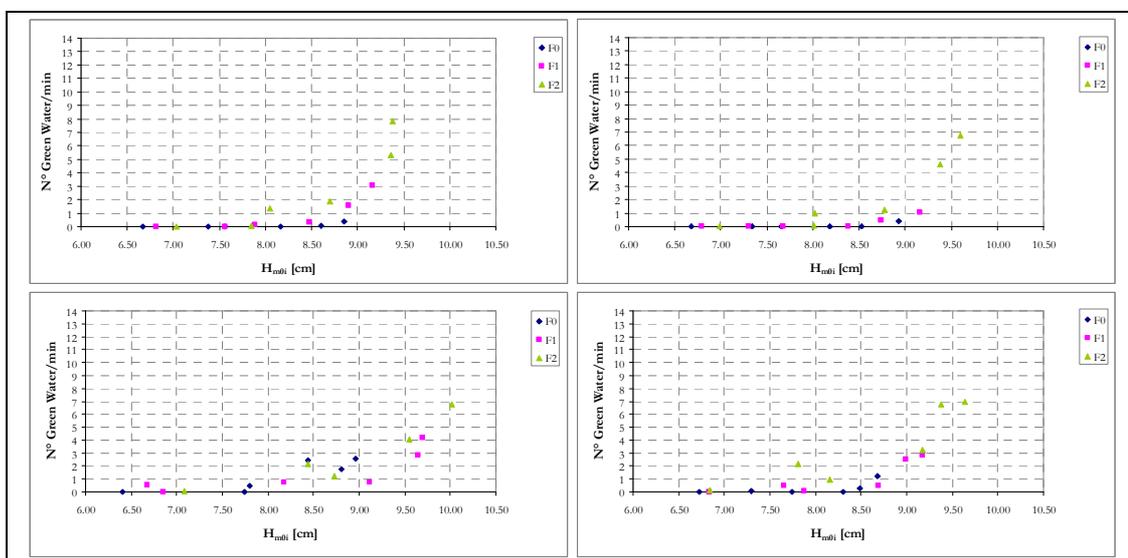


Figura 6.82 - N° di Green water/min in funzione di H_{m0i} : in alto a sinistra il grafico si riferisce alla configurazione C1 senza ricircolo, in alto a destra alla configurazione C1 con ricircolo, in basso a sinistra alla configurazione C2 e in basso a destra alla configurazione C3.

In figura 6.83 è rappresentato l'andamento del numero di "White Water" al minuto, in relazione all'altezza d'onda incidente per le configurazioni studiate in laboratorio.

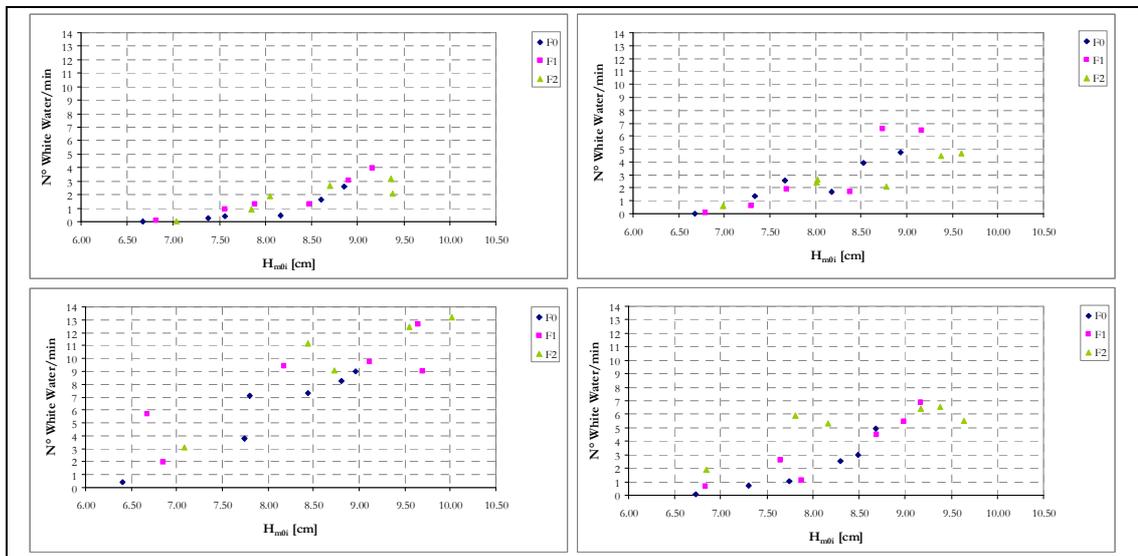


Figura 6.83 - N° di White water/min in funzione di H_{m0i} : in alto a sinistra il grafico si riferisce alla configurazione C1 senza ricircolo, in alto a destra alla configurazione C1 con ricircolo, in basso a sinistra alla configurazione C2 e in basso a destra alla configurazione C3.

Nelle figure 6.84, 6.85, 6.86 e 6.87 è possibile visualizzare la relazione tra la portata di overtopping Q_w e il Set-up/ H_{m0i} .

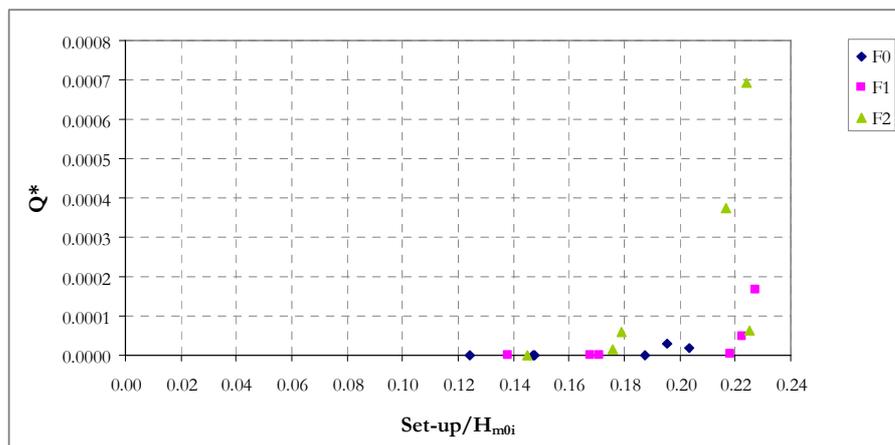


Figura 6.84 - Andamento di Q^* in funzione di Set-up/ H_{m0i} per la configurazione C1 senza ricircolo.

Nelle figure 6.88, 6.89, 6.90 e 6.91 è rappresentato l'andamento dell'overtopping in funzione dell'altezza d'onda incidente, in scala prototipo.

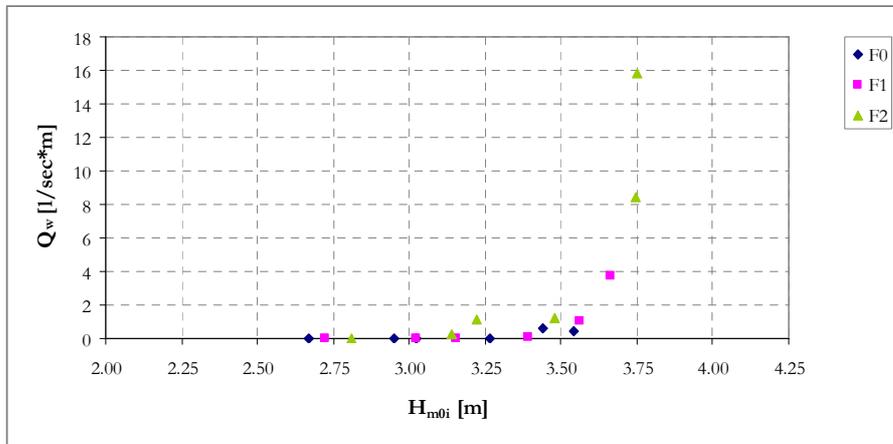


Figura 6.88 - Andamento di Q_w in funzione di H_{m0i} per la configurazione C1 senza ricircolo, in scala prototipo.

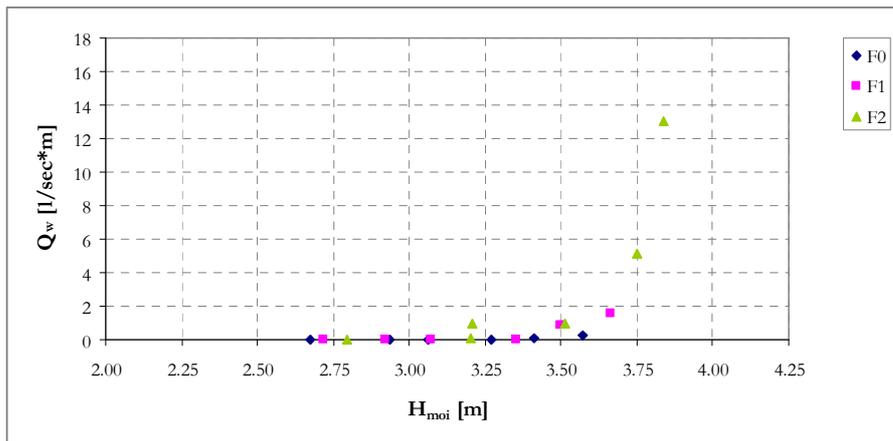


Figura 6.89 - Andamento di Q_w in funzione di H_{m0i} per la configurazione C1 con ricircolo, in scala prototipo.

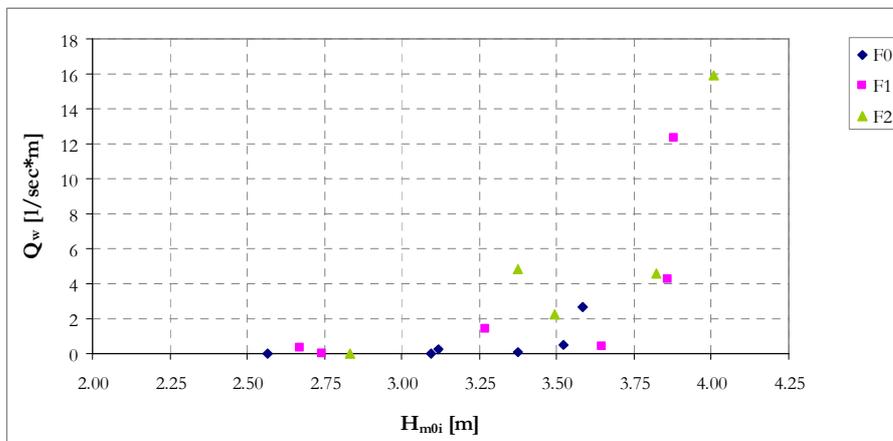


Figura 6.90 - Andamento di Q_w in funzione di H_{m0i} per la configurazione C2, in scala prototipo.

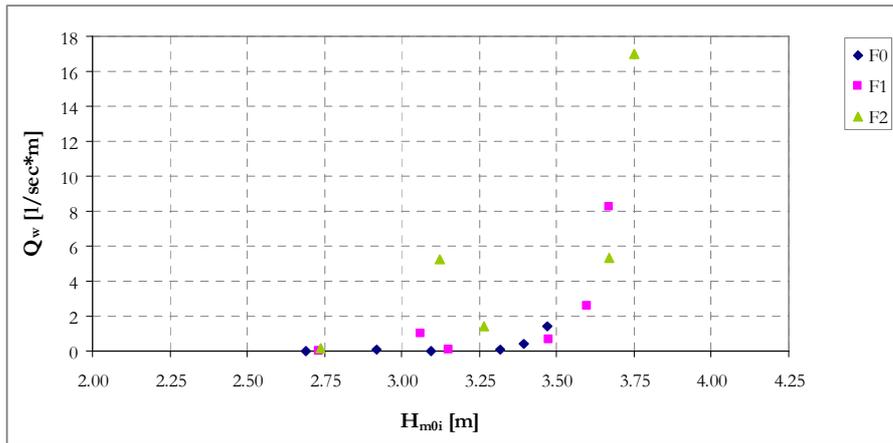


Figura 6.91 - Andamento di Q_w in funzione di H_{m0i} per la configurazione C3, in scala prototipo.

Nelle figure 6.92, 6.93, 6.94 e 6.95 è rappresentato, in scala prototipo, l'andamento della portata di overtopping associata ad ogni tracimazione ($Q_w/(N_w+N_G)$), in funzione dell'altezza d'onda incidente.

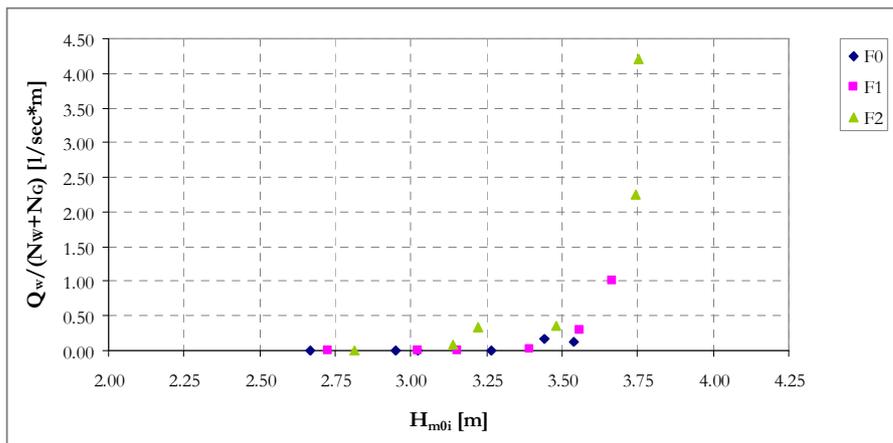


Figura 6.92 - Andamento di $Q_w/(N_w+N_G)$ in funzione di H_{m0i} per la configurazione C1 senza ricircolo, in scala prototipo.

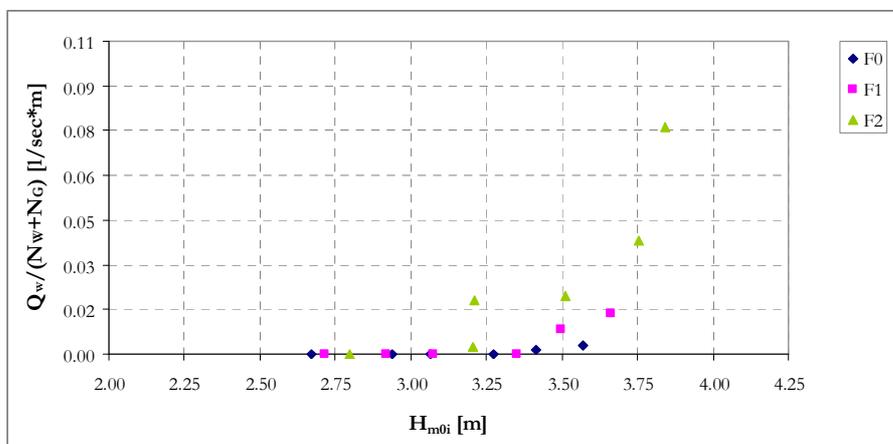


Figura 6.93 - Andamento di $Q_w/(N_w+N_G)$ in funzione di H_{m0i} per la configurazione C1 con ricircolo, in scala prototipo.

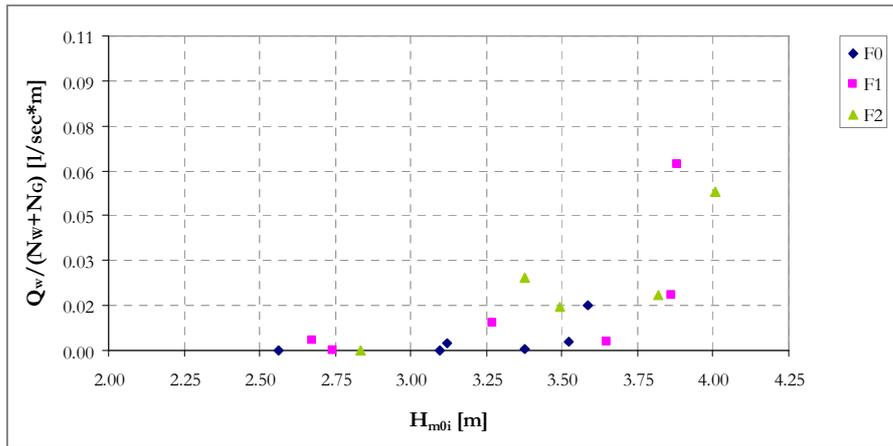


Figura 6.94 - Andamento di $Q_w/(N_w+N_G)$ in funzione di H_{m0i} per la configurazione C2, in scala prototipo.

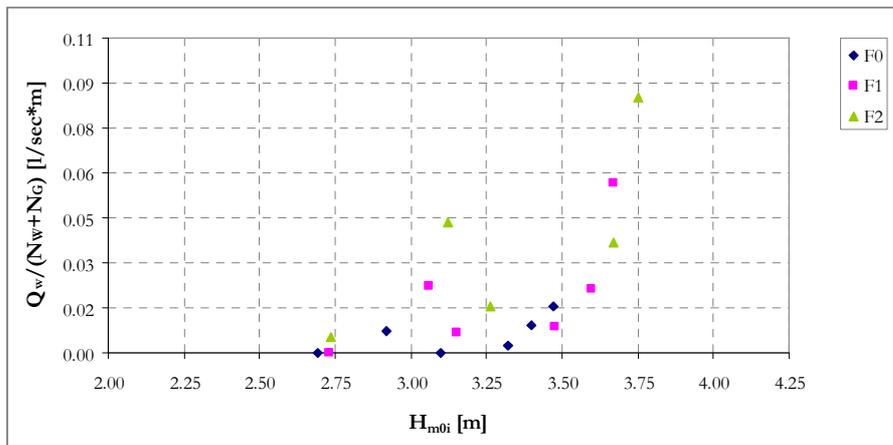


Figura 6.95 - Andamento di $Q_w/(N_w+N_G)$ in funzione di H_{m0i} per la configurazione C3, in scala prototipo.

Come nel caso della valutazione della trasmissione e del water set-up, nelle figure seguenti sono stati rappresentati i dati relativi all'analisi dell'overtopping, mettendo nello stesso grafico le configurazioni C1, C2 e C3, in funzione dei tre livelli idrici target, per evidenziare la variabilità dovuta alla diversa geometria.

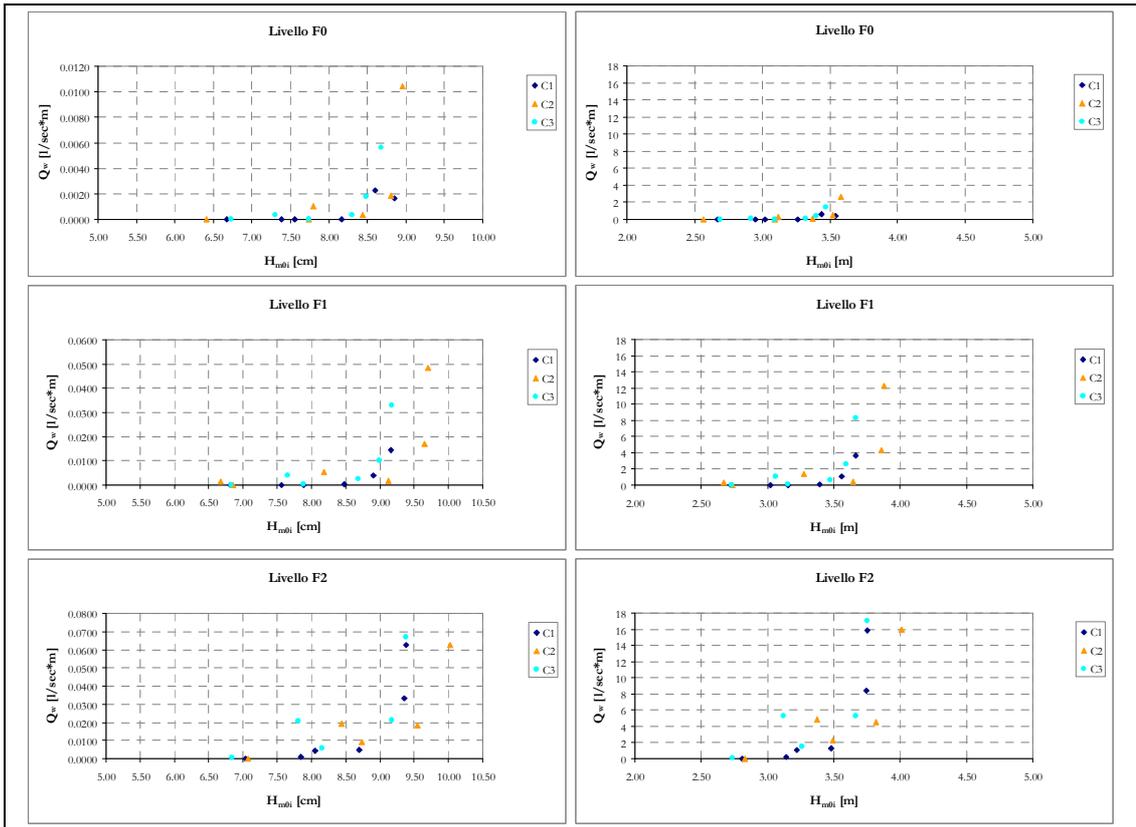


Figura 6.96 - Andamento di Q_w in funzione di H_{m0i} nel modello (a sinistra) e nel prototipo (a destra) relativo alle configurazioni C1, C2 e C3, per ogni livello idrico target.

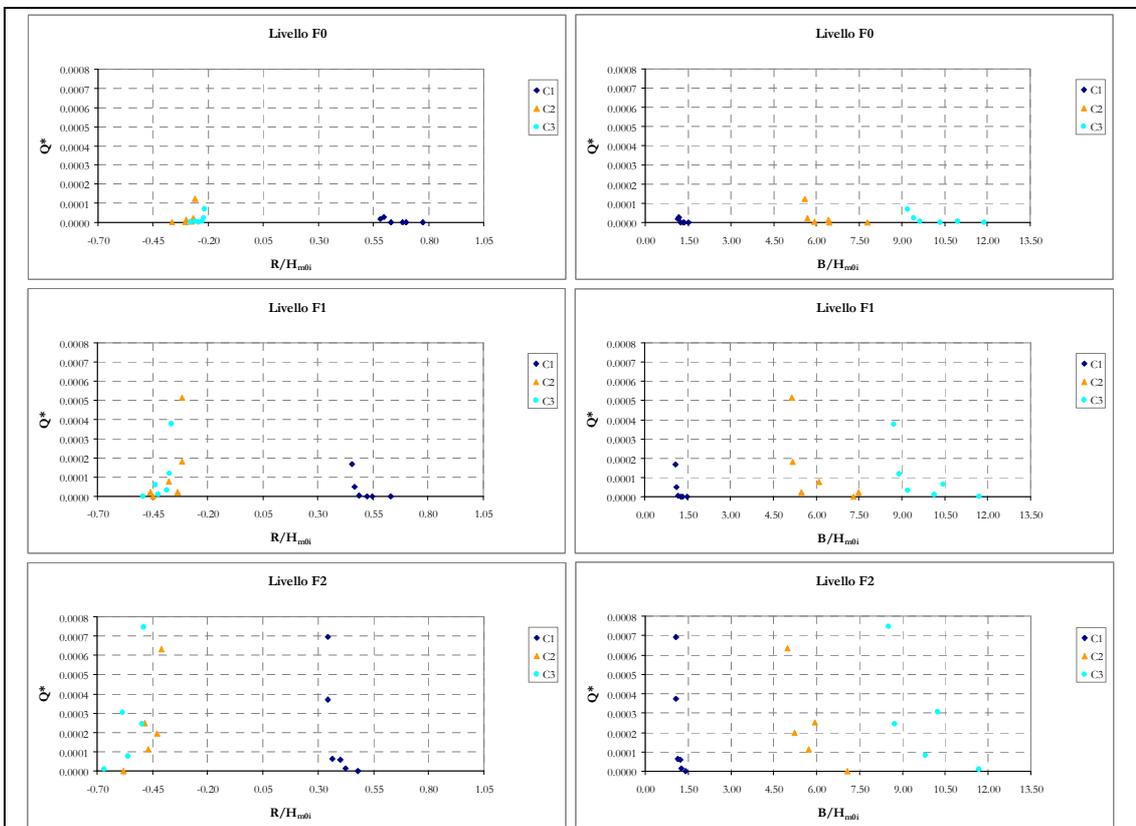


Figura 6.97 - Andamento di Q^* in funzione di R/H_{m0i} (a sinistra) e di B/H_{m0i} (a destra) relativo alle configurazioni C1, C2 e C3, per ogni livello idrico target.

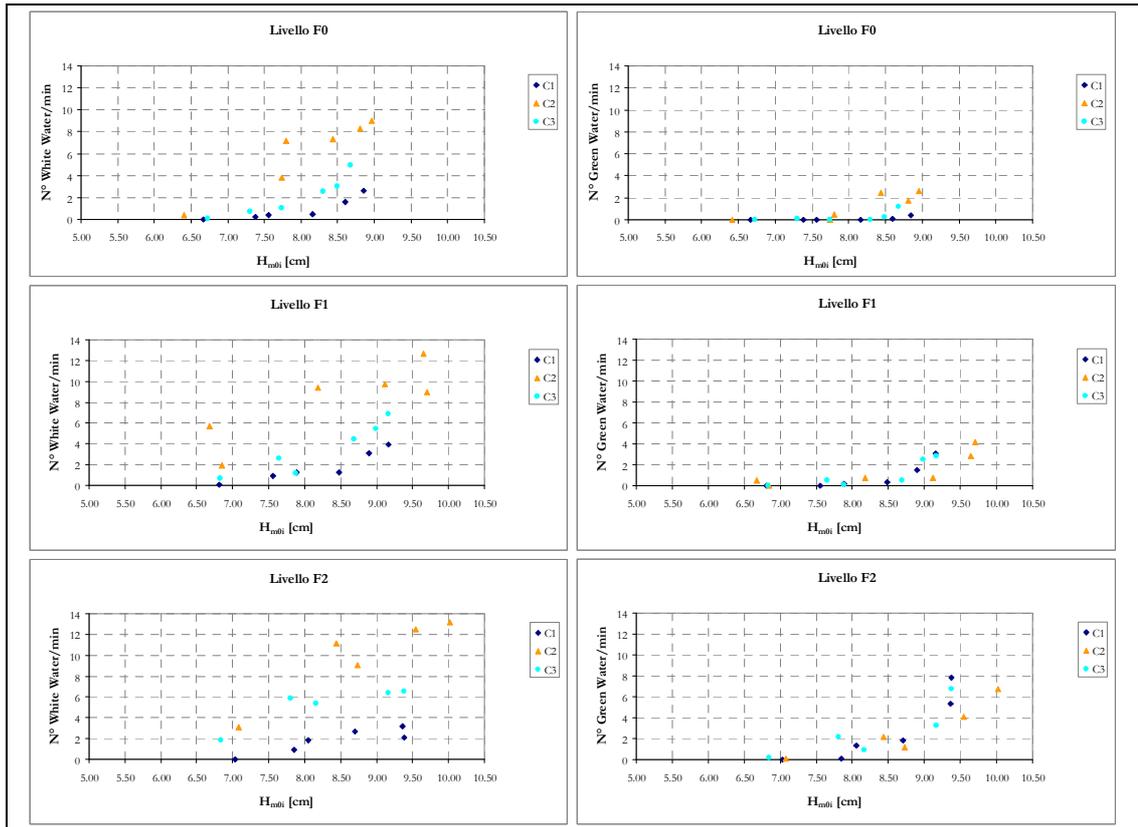


Figura 6.98 - Numero di White Water/min (a sinistra) e di Green Water/min (a destra) in funzione di H_{m0i} relativo alle configurazioni C1, C2 e C3, per ogni livello idrico target.

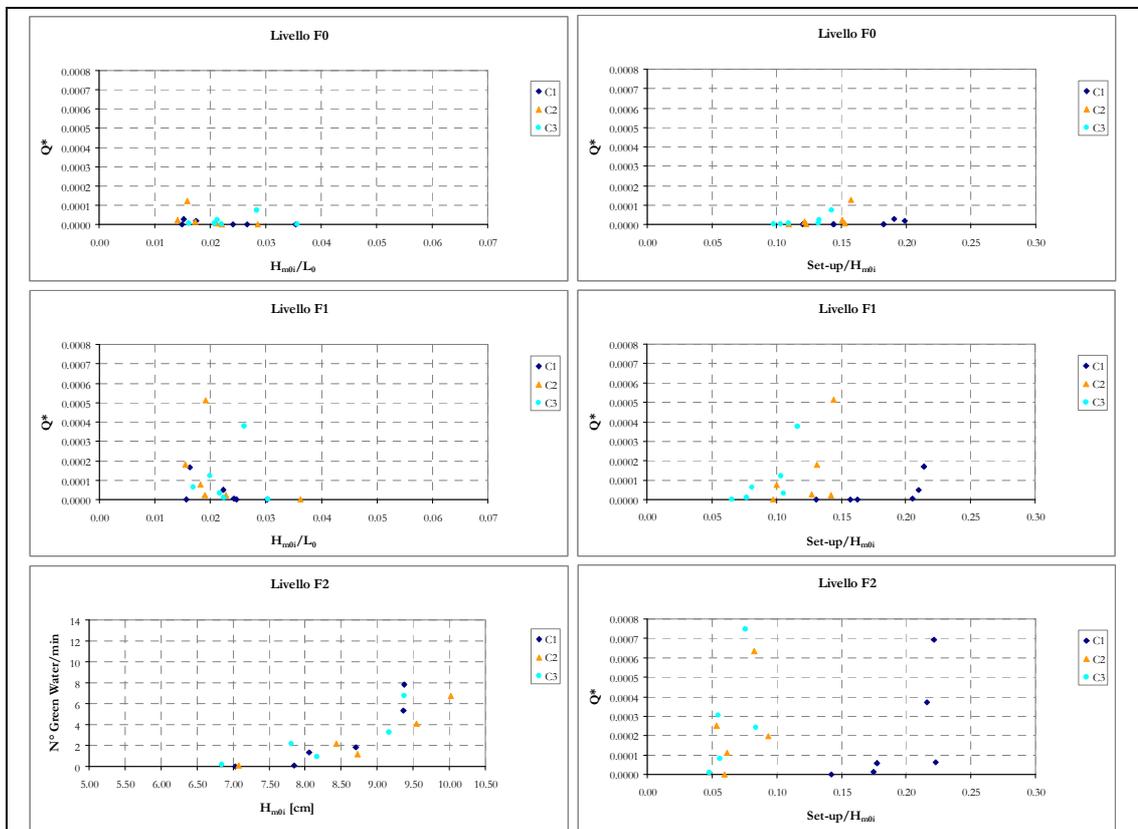


Figura 6.99 - Andamento di Q^* in funzione di H_{m0i}/L_0 (a sinistra) e di Set-up/ H_{m0i} (a destra) relativo alle configurazioni C1, C2 e C3, per ogni livello idrico target.

7. Conclusioni

In questa tesi è stata condotta un'attività sperimentale su modello fisico bidimensionale, di una sezione relativa ad un tratto di costa del litorale di Marina di Pisa.

L'obiettivo degli esperimenti è di valutare l'efficacia di un nuovo sistema di protezione, basato su opere sommerse, allo scopo di ridurre l'overtopping sulla strada litoranea e al contempo permettere una riqualificazione in termini di fruibilità del litorale attualmente degradato.

L'entità e il numero di tracimazioni sulla strada litoranea dipendono fortemente dai livelli idrici che s'istaurano tra la scogliera radente e la scogliera parallela e dalle altezze d'onda trasmesse.

La configurazione attuale delle opere di difesa di Marina di Pisa è caratterizzata da scogliere parallele lunghe circa 250 m separate da varchi di circa 10-15 m. In particolare la scogliera studiata presenta un solo varco in prossimità della testata Nord e un pennello emerso che collega la linea di costa con la testata Sud, realizzando così una cella confinata con un unico e ristretto collegamento con l'esterno.

Gli esperimenti sul modello della configurazione attuale sono stati condotti sia nell'ipotesi di struttura completamente confinata che nell'ipotesi di ricircolo volto a simulare l'effetto della corrente di ritorno verso il largo.

Le misure su modello del water set-up e del coefficiente di trasmissione in assenza e in presenza di ricircolo, sono state confrontate con le misure di campo svolte dal Prof. L. Cappietti e da questa verifica risulta che le misure più rappresentative della situazione attuale sono quelle condotte in assenza di ricircolo.

Nella condizione attuale si sono evidenziati inoltre notevoli valori del water set-up che possono raggiungere anche il valore di 80 cm e di trasmissione del moto ondoso fino al 60%.

L'ipotesi progettuale di abbassare la cresta della scogliera fino ad un metro sotto il livello del mare e di utilizzare solo il materiale risultante per allargare la scogliera, (si raggiunge una larghezza di circa 20 m) comporta forti abbattimenti del water set-up che rimane sempre inferiore a 60 cm, tuttavia si sono misurati notevoli aumenti dell'altezza d'onda trasmessa. La diminuzione del sovrizzo, infatti, non è sufficiente a compensare l'effetto dell'aumento della trasmissione nella portata e nella frequenza degli eventi di tracimazione sulla strada litoranea che risultano maggiori della condizione attuale.

La seconda ipotesi progettuale, che prevede l'aggiunta di scogli per allargare la cresta della scogliera sommersa della prima ipotesi progettuale, risulta caratterizzata da valori del water set-up sostanzialmente uguali e allo stesso tempo permette di diminuire sensibilmente la trasmissione del moto ondoso che tuttavia rimane leggermente superiore allo stato attuale.

In termini di tracimazioni sulla strada litoranea, si osservano forti riduzioni volumetriche rispetto alla prima ipotesi e tali da raggiungere valori solo leggermente maggiori dello stato attuale, tuttavia la frequenza degli eventi di tracimazione, soprattutto quelli caratterizzati da getti di spray è sensibilmente maggiore.

In conclusione il risultato principale di questo studio tende a dimostrare che la conversione delle attuali opere di difesa di Marina di Pisa, nella variante di scogliere sommerse, è un'ipotesi progettuale praticabile per la riqualificazione del litorale.

Il grado di efficienza, in termini di volumi e frequenze di tracimazione sulla strada litoranea, della seconda alternativa progettuale presentata in questo lavoro di tesi è risultato prossimo a quello dell'attuale sistema di difesa, ma solo leggermente inferiore. Attualmente sono in corso nuove prove sperimentali caratterizzate dall'aggiunta, rispetto alla seconda ipotesi progettuale testata, di una seconda scogliera sommersa antistante.

L'ipotesi di lavoro è quella di poter raggiungere un grado di sicurezza per Marina di Pisa, maggiore di quello attualmente garantito delle opere di difesa presenti, e allo stesso tempo di poter migliorare la fruibilità del litorale, e la qualità delle acque della zona protetta senza alterare il paesaggio locale.

Allegati

Allegato I: Indagine Granulometrica delle strutture in esame.

Tabella 1: Misure dei massi della scogliera emersa n°5.

Sezione (S-N)	N° massi per sezione	N° massi misurati	X[m]	Y[m]	Z[m]	Volume[m ³]	Diametro caratteristico [m]	Peso caratteristico [t]
1	7	1	1.30	1.20	1.00	1.56	1.16	4.10
		2	2.00	1.80	1.50	5.40	1.75	14.18
		3	1.70	1.00	1.20	2.04	1.27	5.36
		4	1.70	1.70	2.20	6.36	1.85	16.69
		5	0.60	0.50	0.50	0.15	0.53	0.39
2	7	6	0.90	1.20	0.90	0.97	0.99	2.55
		7	0.90	1.40	1.30	1.64	1.18	4.30
		8	1.90	0.60	1.30	1.48	1.14	3.89
		9	1.40	1.00	0.50	0.70	0.89	1.84
3	7	10	0.90	1.20	0.90	0.97	0.99	2.55
		11	0.80	0.80	0.60	0.38	0.73	1.01
		12	0.90	2.50	1.50	3.38	1.50	8.86
		13	1.50	1.10	1.10	1.82	1.22	4.76
4	6	14	0.90	2.40	1.20	2.59	1.37	6.80
		15	0.90	0.80	0.70	0.50	0.80	1.32
		16	1.00	1.30	1.90	2.47	1.35	6.48
5	6	17	1.20	0.80	0.60	0.58	0.83	1.51
		18	0.70	0.80	1.20	0.67	0.88	1.76
		19	1.00	1.00	0.70	0.70	0.89	1.84
		20	1.80	1.30	0.80	1.87	1.23	4.91
6	6	21	0.80	1.50	0.70	0.84	0.94	2.21
		22	0.90	0.80	0.90	0.65	0.87	1.70
		23	3.50	2.00	1.20	8.40	2.03	22.05
		24	1.05	1.60	0.60	1.01	1.00	2.65
7	6	25	1.20	2.00	1.20	2.88	1.42	7.56
		26	0.90	1.10	1.20	1.19	1.06	3.12
		27	1.20	1.30	0.80	1.25	1.08	3.28
		28	1.80	2.00	0.80	2.88	1.42	7.56
		29	0.80	1.20	1.50	1.44	1.13	3.78
8	5	30	1.20	1.00	1.00	1.20	1.06	3.15
		31	2.00	1.80	1.50	5.40	1.75	14.18
		32	1.50	1.80	1.30	3.51	1.52	9.21
		33	0.90	1.50	1.20	1.62	1.17	4.25
9	6	34	1.00	1.30	1.90	2.47	1.35	6.48
		35	1.30	1.30	3.00	5.07	1.72	13.31
		36	1.80	1.20	1.00	2.16	1.29	5.67
		37	2.30	0.90	1.40	2.90	1.43	7.61
10	7	38	3.40	1.80	1.20	7.34	1.94	19.28
		39	1.40	1.70	1.40	3.33	1.49	8.75
		40	1.50	1.00	1.40	2.10	1.28	5.51
		41	0.90	1.20	1.40	1.51	1.15	3.97
		42	1.90	1.40	1.70	4.52	1.65	11.87
11	6	43	2.40	1.20	0.90	2.59	1.37	6.80
		44	1.90	1.10	1.00	2.09	1.28	5.49
		45	1.20	1.60	1.20	2.30	1.32	6.05
		46	0.80	1.30	1.10	1.14	1.05	3.00
12	6	47	1.90	1.10	1.20	2.51	1.36	6.58
		48	1.70	1.80	1.30	3.98	1.58	10.44
		49	0.90	1.00	1.60	1.44	1.13	3.78
		50	1.80	2.00	0.80	2.88	1.42	7.56
13	6	51	1.30	1.50	2.30	4.49	1.65	11.77
		52	1.10	1.80	1.00	1.98	1.26	5.20

		53	0.80	1.20	1.50	1.44	1.13	3.78
		54	1.90	1.90	1.10	3.97	1.58	10.42
14	6	55	1.40	1.30	1.60	2.91	1.43	7.64
		56	0.80	1.40	2.30	2.58	1.37	6.76
		57	2.40	1.90	1.00	4.56	1.66	11.97
		58	1.10	1.40	1.10	1.69	1.19	4.45
		59	1.80	1.20	1.00	2.16	1.29	5.67
15	7	60	0.80	0.90	1.10	0.79	0.93	2.08
		61	2.30	1.30	0.70	2.09	1.28	5.49
		62	0.90	2.90	1.90	4.96	1.71	13.02
		63	1.80	1.30	1.10	2.57	1.37	6.76
16	6	64	1.50	1.00	1.40	2.10	1.28	5.51
		65	1.70	1.70	2.20	6.36	1.85	16.69
		66	2.90	1.50	1.00	4.35	1.63	11.42
		67	0.90	1.20	1.40	1.51	1.15	3.97
17	5	68	1.70	1.30	0.70	1.55	1.16	4.06
		69	1.40	1.40	2.30	4.51	1.65	11.83
		70	1.20	1.60	1.20	2.30	1.32	6.05
18	6	71	1.00	1.30	1.30	1.69	1.19	4.44
		72	1.95	1.75	1.10	3.75	1.55	9.85
		73	0.70	0.80	1.80	1.01	1.00	2.65
		74	0.90	1.00	1.60	1.44	1.13	3.78
19	6	75	1.80	1.40	1.10	2.77	1.40	7.28
		76	1.00	1.05	1.65	1.73	1.20	4.55
		77	0.80	0.90	1.00	0.72	0.90	1.89
		78	1.50	1.30	0.60	1.17	1.05	3.07
20	6	79	0.80	1.40	2.30	2.58	1.37	6.76
		80	1.90	1.10	1.05	2.19	1.30	5.76
		81	1.20	1.20	1.90	2.74	1.40	7.18
		82	0.80	0.90	1.10	0.79	0.93	2.08
21	6	83	1.60	1.90	0.90	2.74	1.40	7.18
		84	0.90	1.85	2.00	3.33	1.49	8.74
		85	1.90	1.70	0.90	2.91	1.43	7.63
		86	2.00	2.60	2.20	11.44	2.25	30.03
		87	1.20	0.50	0.90	0.54	0.81	1.42
22	7	88	1.10	1.20	1.90	2.51	1.36	6.58
		89	2.30	1.30	0.70	2.09	1.28	5.49
		90	0.90	1.10	1.50	1.49	1.14	3.90
		91	0.80	0.80	1.00	0.64	0.86	1.68
23	6	92	0.60	0.70	1.10	0.46	0.77	1.21
		93	1.90	1.40	0.80	2.13	1.29	5.59
		94	1.70	1.70	2.20	6.36	1.85	16.69
24	5	95	1.90	1.30	1.05	2.59	1.37	6.81
		96	1.80	2.10	1.70	6.43	1.86	16.87
		97	1.90	1.70	1.70	5.49	1.76	14.41
		98	1.40	0.90	1.20	1.51	1.15	3.97
		99	1.10	1.90	1.00	2.09	1.28	5.49
25	6	100	0.80	1.40	1.90	2.13	1.29	5.59
		101	1.40	2.30	2.20	7.08	1.92	18.60
		102	1.90	1.15	1.45	3.17	1.47	8.32
		103	1.10	1.00	1.50	1.65	1.18	4.33
		104	1.90	1.40	1.20	3.19	1.47	8.38
		105	0.70	1.70	1.75	2.08	1.28	5.47
26	6	106	1.90	1.80	1.60	5.47	1.76	14.36
		107	1.05	0.40	1.75	0.74	0.90	1.93
		108	1.20	1.40	0.60	1.01	1.00	2.65
		109	0.70	1.70	1.00	1.19	1.06	3.12
		110	2.00	1.40	0.70	1.96	1.25	5.15
27	7	111	0.70	0.80	1.20	0.67	0.88	1.76
		112	1.95	1.75	1.10	3.75	1.55	9.85

		113	1.30	1.20	1.20	1.87	1.23	4.91
		114	1.30	1.70	1.20	2.65	1.38	6.96
		115	1.00	0.80	1.80	1.44	1.13	3.78
		116	1.60	1.25	1.05	2.10	1.28	5.51
28	5	117	1.00	1.05	1.65	1.73	1.20	4.55
		118	1.80	0.80	1.10	1.58	1.17	4.16
		119	0.80	2.15	1.10	1.89	1.24	4.97
		120	2.30	1.45	0.60	2.00	1.26	5.25
		121	0.75	1.10	1.20	0.99	1.00	2.60
29	5	122	2.45	1.70	1.30	5.41	1.76	14.21
		123	0.75	1.50	2.80	3.15	1.47	8.27
		124	1.05	1.60	0.60	1.01	1.00	2.65
		125	1.90	1.10	1.05	2.19	1.30	5.76
30	6	126	1.95	1.40	1.10	3.00	1.44	7.88
		127	0.90	1.40	1.30	1.64	1.18	4.30
		128	2.00	2.40	1.20	5.76	1.79	15.12
		129	0.90	1.20	1.60	1.73	1.20	4.54
31	6	130	0.90	0.80	1.50	1.08	1.03	2.84
		131	0.90	2.30	1.40	2.90	1.43	7.61
		132	2.30	1.30	1.20	3.59	1.53	9.42
		133	0.90	1.85	2.00	3.33	1.49	8.74
32	5	134	1.20	1.65	1.40	2.77	1.40	7.28
		135	2.30	1.30	1.50	4.49	1.65	11.77
		136	1.90	1.70	0.90	2.91	1.43	7.63
		137	1.30	2.40	1.20	3.74	1.55	9.83
33	7	138	2.45	1.70	0.70	2.92	1.43	7.65
		139	0.75	1.10	1.55	1.28	1.09	3.36
		140	1.70	1.00	1.20	2.04	1.27	5.36
		141	1.30	1.50	2.30	4.49	1.65	11.77
34	7	142	1.50	1.00	1.40	2.10	1.28	5.51
		143	0.90	2.50	1.50	3.38	1.50	8.86
		144	1.10	2.10	1.30	3.00	1.44	7.88
		145	1.50	1.80	2.00	5.40	1.75	14.18
		146	1.80	1.30	0.80	1.87	1.23	4.91
35	5	147	0.90	1.90	2.10	3.59	1.53	9.43
		148	1.40	1.90	1.80	4.79	1.69	12.57
		149	2.50	1.90	2.10	9.98	2.15	26.18
		150	1.05	0.40	1.75	0.74	0.90	1.93
		151	1.95	1.75	1.10	3.75	1.55	9.85
		152	1.90	0.60	1.30	1.48	1.14	3.89

Tabella 2: Misure dei massi della scogliera radente.

Sezione (S-N)	N° massi per sezione	N° massi misurati	X[m]	Y[m]	Z[m]	Volume[m ³]	Diametro caratteristico [m]	Peso caratteristico [t]
1	14	1	1.60	0.90	0.50	0.72	0.90	1.89
		2	1.70	0.90	0.70	1.07	1.02	2.81
		3	0.50	0.80	0.30	0.12	0.49	0.32
		4	1.00	0.60	0.55	0.33	0.69	0.87
		5	1.50	1.40	0.70	1.47	1.14	3.86
		6	0.80	0.45	0.20	0.07	0.42	0.19
		7	1.10	0.80	0.50	0.44	0.76	1.16
		8	1.30	0.90	0.30	0.35	0.71	0.92
		9	0.60	0.40	0.50	0.12	0.49	0.32
2	11	10	1.00	1.10	0.50	0.55	0.82	1.44
		11	0.85	0.80	0.50	0.34	0.70	0.89
		12	0.70	0.50	0.40	0.14	0.52	0.37

		13	1.00	0.80	0.80	0.64	0.86	1.68
		14	0.70	0.60	0.50	0.21	0.59	0.55
		15	0.70	1.10	0.40	0.31	0.68	0.81
		16	1.10	0.70	0.40	0.31	0.68	0.81
		17	0.90	0.70	0.45	0.28	0.66	0.74
3	11	18	0.80	1.50	1.10	1.32	1.10	3.47
		19	1.50	1.30	0.80	1.56	1.16	4.10
		20	1.20	0.60	0.20	0.14	0.52	0.38
		21	1.20	0.60	0.70	0.50	0.80	1.32
		22	0.60	0.50	1.10	0.33	0.69	0.87
		23	0.90	0.50	1.10	0.50	0.79	1.30
		24	1.15	0.70	0.90	0.72	0.90	1.90
		25	1.80	1.10	1.20	2.38	1.33	6.24
4	9	26	1.20	0.80	1.10	1.06	1.02	2.77
		27	1.30	0.60	0.40	0.31	0.68	0.82
		28	0.50	1.40	1.05	0.74	0.90	1.93
		29	0.90	0.35	0.40	0.13	0.50	0.33
		30	1.50	1.00	0.80	1.20	1.06	3.15
		31	2.30	1.10	0.70	1.77	1.21	4.65
		32	0.90	0.60	0.50	0.27	0.65	0.71
		33	1.60	1.20	0.70	1.34	1.10	3.53
5	13	34	1.40	1.00	0.50	0.70	0.89	1.84
		35	0.80	0.60	0.30	0.14	0.52	0.38
		36	1.60	1.30	0.80	1.66	1.18	4.37
		37	1.10	0.70	0.40	0.31	0.68	0.81
		38	1.20	0.70	0.30	0.25	0.63	0.66
		39	1.20	0.80	0.35	0.34	0.70	0.88
		40	0.60	0.15	1.20	0.11	0.48	0.28
		41	1.05	0.80	0.50	0.42	0.75	1.10
6	13	42	1.10	1.40	0.50	0.77	0.92	2.02
		43	1.70	1.20	0.90	1.84	1.22	4.82
		44	1.30	0.70	0.60	0.55	0.82	1.43
		45	1.10	0.70	0.50	0.39	0.73	1.01
		46	1.40	0.40	0.80	0.45	0.77	1.18
		47	1.90	0.65	0.30	0.37	0.72	0.97
		48	0.40	0.60	0.40	0.10	0.46	0.25
		49	0.80	0.75	0.35	0.21	0.59	0.55
7	7	50	0.90	0.90	0.80	0.65	0.87	1.70
		51	1.00	0.70	0.25	0.18	0.56	0.46
		52	1.25	0.70	0.55	0.48	0.78	1.26
		53	1.30	0.90	0.55	0.64	0.86	1.69
		54	0.85	0.80	0.35	0.24	0.62	0.62
		55	1.10	0.74	0.45	0.37	0.72	0.96
		56	0.90	0.60	0.30	0.16	0.55	0.43
		57	1.30	0.50	1.50	0.98	0.99	2.56
8	7	58	1.50	0.30	0.61	0.27	0.65	0.72
		59	1.35	1.00	0.65	0.88	0.96	2.30
		60	1.75	0.80	0.30	0.42	0.75	1.10
		61	2.05	0.80	0.15	0.25	0.63	0.65
		62	1.05	0.45	0.30	0.14	0.52	0.37
		63	1.05	0.65	0.25	0.17	0.55	0.45
		64	0.90	2.00	0.70	1.26	1.08	3.31
		65	0.75	0.55	0.28	0.12	0.49	0.30
9	9	66	1.55	0.50	0.60	0.47	0.77	1.22
		67	1.55	0.90	0.25	0.35	0.70	0.92
		68	0.30	1.10	0.45	0.15	0.53	0.39
		69	1.30	0.60	0.40	0.31	0.68	0.82
		70	1.25	0.75	0.40	0.38	0.72	0.98
		71	0.50	1.10	0.20	0.11	0.48	0.29
		72	0.90	0.45	0.30	0.12	0.50	0.32

		73	1.25	0.95	0.15	0.18	0.56	0.47
		74	1.15	0.98	1.20	1.35	1.11	3.55
10	9	75	1.35	1.00	0.70	0.95	0.98	2.48
		76	1.10	0.40	0.25	0.11	0.48	0.29
		77	1.40	0.35	0.90	0.44	0.76	1.16
		78	0.70	0.40	0.70	0.20	0.58	0.51
		79	1.60	1.00	1.30	2.08	1.28	5.46
		80	0.60	0.30	0.80	0.14	0.52	0.38
		81	0.95	0.50	0.70	0.33	0.69	0.87
		82	1.25	0.25	0.85	0.27	0.64	0.70
		83	0.60	1.10	0.95	0.63	0.86	1.65
		84	1.45	0.90	0.75	0.98	0.99	2.57
11	8	85	0.80	0.60	0.90	0.43	0.76	1.13
		86	1.20	0.35	0.75	0.32	0.68	0.83
		87	1.30	0.35	0.50	0.23	0.61	0.60
		88	0.70	0.15	0.70	0.07	0.42	0.19
		89	1.20	0.55	0.80	0.53	0.81	1.39
		90	0.53	0.92	0.40	0.20	0.58	0.51
		91	0.60	0.30	1.35	0.24	0.62	0.64
		92	0.50	0.20	0.75	0.42	0.20	0.42
12	10	93	1.42	0.95	0.80	1.03	2.83	1.03
		94	1.30	0.50	0.30	0.58	0.51	0.58
		95	1.20	0.50	0.25	0.53	0.39	0.53
		96	0.90	0.15	0.70	0.46	0.25	0.46
		97	1.20	0.30	0.35	0.50	0.33	0.50
		98	1.60	0.40	0.85	0.82	1.43	0.82
		99	1.70	0.40	1.25	0.95	2.23	0.95
		100	1.00	1.10	0.75	0.94	2.17	0.94
		101	0.95	1.50	1.10	1.16	4.11	1.16
13	10	102	1.10	0.75	0.65	0.81	1.41	0.81
		103	0.70	0.55	0.30	0.49	0.30	0.49
		104	0.75	0.60	0.40	0.56	0.47	0.56
		105	0.70	0.45	0.30	0.46	0.25	0.46
		106	1.35	1.55	0.50	1.02	2.75	1.02
		107	1.30	0.85	0.30	0.69	0.87	0.69
		108	1.00	0.85	0.45	0.73	1.00	0.73
		109	1.70	0.80	1.45	1.25	5.18	1.25
		110	0.65	0.60	0.25	0.46	0.26	0.46
		111	1.20	0.10	0.55	0.40	0.17	0.40
14	10	112	0.46	0.74	1.40	0.78	1.25	0.78
		113	0.80	1.04	0.33	0.65	0.72	0.65
		114	0.88	1.45	0.40	0.80	1.34	0.80
		115	0.68	0.85	0.35	0.59	0.53	0.59
		116	0.50	0.60	0.38	0.48	0.30	0.48
		117	0.93	0.64	0.56	0.69	0.87	0.69
		118	0.73	1.26	0.95	0.96	2.29	0.96
		119	0.87	0.44	0.25	0.46	0.25	0.46
		120	0.92	1.00	0.51	0.78	1.23	0.78
		121	0.90	0.68	0.53	0.69	0.85	0.69
15	10	122	0.85	0.78	0.87	0.58	0.83	1.51
		123	0.52	0.69	0.43	0.15	0.54	0.40
		124	0.92	0.98	0.49	0.44	0.76	1.16
		125	1.65	0.96	0.47	0.74	0.91	1.95
		126	1.05	1.46	0.59	0.90	0.97	2.37
		127	1.20	0.99	0.53	0.63	0.86	1.65
		128	1.31	0.92	0.38	0.46	0.77	1.20
		129	0.81	0.78	0.69	0.44	0.76	1.14
		130	0.99	0.42	0.47	0.20	0.58	0.51
		131	0.67	1.04	0.82	0.57	0.83	1.50
16	8	132	1.22	0.90	0.49	0.54	0.81	1.41

		133	1.65	0.99	0.38	0.62	0.85	1.63
		134	0.89	0.78	0.56	0.39	0.73	1.02
		135	1.40	0.67	0.49	0.46	0.77	1.21
		136	0.78	1.03	0.73	0.59	0.84	1.54
		137	1.19	0.68	0.74	0.60	0.84	1.57
		138	1.15	0.85	0.67	0.65	0.87	1.72
		139	1.14	0.74	0.59	0.50	0.79	1.31
17	11	140	0.90	0.58	0.41	0.21	0.60	0.56
		141	1.35	0.97	0.76	1.00	1.00	2.61
		142	0.84	0.82	1.19	0.82	0.94	2.15
		143	1.45	0.70	0.26	0.26	0.64	0.69
		144	1.00	0.45	0.21	0.09	0.46	0.25
		145	0.40	0.56	0.39	0.09	0.44	0.23
		146	1.09	0.70	0.43	0.33	0.69	0.86
		147	0.81	0.52	0.97	0.41	0.74	1.07
		148	0.75	1.09	0.42	0.34	0.70	0.90
		149	0.71	1.06	0.36	0.27	0.65	0.71
		150	0.61	1.07	0.70	0.46	0.77	1.20
18	11	151	1.26	1.20	0.48	0.73	0.90	1.91
		152	0.80	0.51	0.58	0.24	0.62	0.62
		153	1.03	0.57	0.40	0.23	0.62	0.62
		154	0.80	0.88	0.42	0.30	0.67	0.78
		155	0.78	0.53	0.49	0.20	0.59	0.53
		156	1.51	1.09	0.65	1.07	1.02	2.81
		157	0.83	0.67	0.43	0.24	0.62	0.63
		158	0.69	0.52	0.72	0.26	0.64	0.68
		159	0.96	0.81	0.46	0.36	0.71	0.94
		160	1.45	1.32	0.63	1.21	1.06	3.17
		161	0.89	0.94	0.48	0.40	0.74	1.05
19	11	162	1.27	0.60	0.74	0.56	0.83	1.48
		163	0.84	0.48	0.39	0.16	0.54	0.41
		164	0.81	0.71	0.36	0.21	0.59	0.54
		165	0.82	0.73	0.47	0.28	0.66	0.74
		166	0.89	0.57	0.32	0.16	0.55	0.43
		167	1.70	1.16	0.75	1.48	1.14	3.88
		168	1.35	0.79	0.61	0.65	0.87	1.71
		169	1.42	0.60	0.51	0.43	0.76	1.14
		170	0.82	1.15	0.37	0.35	0.70	0.92
		171	0.94	1.40	0.47	0.62	0.85	1.62
		172	1.39	1.52	0.67	1.42	1.12	3.72
20	11	173	1.09	1.47	0.54	0.87	0.95	2.27
		174	0.90	0.99	0.25	0.22	0.61	0.58
		175	0.93	0.82	0.64	0.49	0.79	1.28
		176	1.05	0.85	0.79	0.71	0.89	1.85
		177	0.60	0.81	0.36	0.17	0.56	0.46
		178	1.25	0.87	0.93	1.01	1.00	2.65
		179	0.79	0.57	0.37	0.17	0.55	0.44
		180	0.74	0.55	0.57	0.23	0.61	0.61
		181	1.15	0.50	0.62	0.36	0.71	0.94
		182	0.74	0.48	1.19	0.42	0.75	1.11

Allegato II: Check list

Prove con sistema di ricircolo spento:

OPERAZIONI PRELIMINARI

- Accendere le sonde resistive tramite l'interruttore n°8 del quadro elettrico;
- accendere i PC "Squalo" e "Ganimede";
- controllare lo spazio disponibile sull'hard-disk di ogni macchina;
- creare la cartella del giorno su entrambi i PC;
- portare il livello dell'acqua in canale tangente al punto più alto della cresta della scogliera, ed effettuare la lettura al Nonio;
- posizionare la punta idrometrica nella posizione del livello di prova a pompa spenta ($F_0=21.55$ cm, $F_1=20.55$ cm, $F_2=19.55$ cm);
- controllare che le valvole del tubo di ricircolo siano aperte;
- innescare il sifone dell'apparato per la misura dell'overtopping e portare il livello dell'acqua nella vasca in corrispondenza del segno.

CALIBRAZIONE

- Predisporre il PC "Squalo" per la calibrazione;
- portare le 7 sonde resistive al livello massimo, attendere il che il livello d'acqua si stabilizzi, dopodichè acquisire i valori forniti dalle sonde;
- ripetere l'operazione con le sonde posizionate sul livello minimo;
- ripetere l'operazione con le sonde posizionate sullo 0;
- analizzare il file di calibrazione tramite software Matlab;
- ripetere la procedura per le sonde con errori di calibrazione maggiori di 2 mm.
- al termine della calibrazione copiare il file definitivo (in cui ogni sonda risulta affetta da errore di calibrazione minore di 2 mm) nel PC "Squalo".

INIZIO PROVA

- Chiudere le valvole del sistema di ricircolo;
- accendere il generatore, pompa retropala, seguendo le istruzioni;
- attendere 20' senza muovere l'acqua;

- annotare il livello dietro e davanti al battionde;
- preparare il foglio per la ripresa video;
- posizionare il nonio dell'apparato di misura dell'overtopping tangente alla superficie libera ed effettuare la lettura;
- generare e lanciare l'attacco ondoso dal PC "Squalo";
- avviare la ripresa video;
- contare il numero di tracimazioni e distinguerle in: Green Water e White Water;

FINE PROVA

- Annotare il livello dietro al battionde;
- terminare la ripresa video e attendere 20 minuti perché si stabilizzi l'acqua all'interno del canale;
- misurare con la punta idrometrica l'overtopping in vasca e annotare tale valore;
- convertire in formato ASCII i file di acquisizione delle sonde resistive nel PC "Ganimede";
- archiviazione moduli di configurazione, aggiornare diario della giornata;
- verifica di calibrazione wg resistivi;
- inserire nella cartella del giorno tutti i files, compresi i file di calibrazione delle sonde resistive;
- riportare nel diario della giornata eventuali problemi riscontrati e malfunzionamenti.

FINE GIORNATA

- Spegnerne generatore onde seguendo le istruzioni;
- spengere i PC, la videocamera e le sonde.

Allegato III: Listato Matlab

```
clear
close all
cd F:\MarinaDiPisa\Eserperimenti\FileMatLabPerAnalisiDati
addpath F:\MarinaDiPisa\Eserperimenti\FileMatLabPerAnalisiDati
%-----
%Acquisizione dei codici per l'identificazione univoca della prova
%-----
Data=input(['Dammi la data della prova Es. "18-05-07"=']);
CodiceOnda=input(['Dammi il codice dell"onda" prova Es. "I1"=']);
CodiceScogliera=input(['Dammi il codice della scogliere Es. "C1"=']);
CodiceLivello=input(['Dammi il codice del livello Es. "F1"=']);
NumeroCalibrazione=input(['Dammi il numero della calibrazione =']);
% Data='23-05-07';
% CodiceOnda='H060T10j05';
% CodiceScogliera='00';
% CodiceLivello='F2';
% NumeroCalibrazione='2';

%-----
%Numero sonde resistive utilizzate in canale
%-----
ns=7; %usata il 13/10 Luca

%-----
%Vettore di corrispondenza canali/posizione di acquisizione
%-----
wg=[6 2 8 5 7 15 16];
%end

%-----
%Mi sposto nella cartella del giorno
%-----
eval(['cd F:\MarinaDiPisa\Eserperimenti\' Data '\']);
%-----
%Carica i dati relativi alla prova
%-----
%dati calibrazione
FileWgCal=['c' Data([1:2 4:5 7:8]) CodiceLivello num2str(NumeroCalibrazione)];
DataWgCal=load([FileWgCal '.cal']);
%dati acquisiti
FileWg=[CodiceOnda CodiceLivello CodiceScogliera ];
DataWg=load([FileWg '.dat']);
%dati per riferimento dello zero locale, (i primi due minuti)
%FileWgZero=[CodiceOnda(1:8) '02' CodiceScogliera CodiceLivello];
```

```

DataWgZero=DataWg(1:2400,:);

%-----
%Riordina i files acquisiti in base alla posizione
%definisci la matrice con i dati per la calibrazione:
%riga i-esima -> parametri sonda in posizione i-esima
%definisci la matrice con i dati acquisiti:
%colonna i-esima -> acquisizione sonda in posizione i-esima
%-----
DataWgCal_Temp=DataWgCal*0;
DataWg_Temp=DataWg*0;
DataWgZero_Temp=DataWgZero*0;
for i=1:ns
    DataWgCal_Temp(i,:)=DataWgCal(wg(i),:);
    DataWg_Temp(:,i)=DataWg(:,wg(i));
    DataWgZero_Temp(:,i)=DataWgZero(:,wg(i));
end
DataWgCal=DataWgCal_Temp(1:ns,:);
DataWgZero=DataWgZero_Temp(:,1:ns);
DataWg=DataWg_Temp(:,1:ns);

clear DataWgCal_Temp;
clear DataWgZero_Temp;
clear DataWg_Temp;

%-----
%Genera la matrice con in coefficienti di calibrazione e salva i grafici
%-----
[a]=Calibrazione(DataWgCal, Data, CodiceLivello)
%-----
%Converto i segnali da volt a cm, li riscalo e salvo i files
%-----
[b]=ConvertiESalvaSegnali(DataWg,DataWgZero,a,FileWg,Data);

%-----
%Calcola i parametri spettrali d'onda, Hmo, Tp, Tm
%e i livelli medi sulla seconda metà della prova
%-----

inizio=size(b,1)-5*60*20;
fine=size(b,1);
[c]=AnalisiSpettrale(b(inizio:fine,:),FileWg,Data);

% %-----
% % Filtraggio del rumore e dell'onda lunga
% %-----

```

```

%% % ATTENZIONE non usare il filtro per eliminare le frequenze quando si fa analisi di piling-up.
%% % Il filtraggio delle frequenze basse ELIMINA IL TREND DEI LIVELLI ACQUISITI
%% % Il filtraggio delle frequenze alte cambia il segnale nei primi istanti di acquisizione così che
%% % non e' piu' possibile riscaldare i valori dei livelli sullo zero locale
% lowerFrequency=0.01;
% higherFrequency=2.0;
% fs=20;
% fnyq=fs/2;
% [Fb Fa]=butter(5,[lowerFrequency/fnyq higherFrequency/fnyq]);
% b_f=filter(Fb,Fa,DataWg);

%-----
%Analisi di Riflessione - Calcolo l'altezza d'onda incidente e riflessa
% sulla seconda metà della prova
%-----
if (CodiceLivello=='F0')
    h=0.175;
    h1=0.085
elseif (CodiceLivello=='F1')
    h=0.185;
    h1=0.095;
elseif (CodiceLivello=='F2')
    h=0.195;
    h1=0.105;
end

fs=20;

%analisi riflessione alle sonde in posizione 4 e 5
Delta=0.31;
DatiRiflessione=b(inizio:fine,[4 5]);
[Kr_Davanti, Hi_Davanti, Hr_Davanti]=wvref(h,Delta,DatiRiflessione,fs,FileWg, [Data ' Up-Stream!']);

%analisi riflessione alle sonde in posizione 6 e 7
Delta=0.30;
DatiRiflessione=b(inizio:fine,[6 7]);
[Kr_Dietro, Hi_Dietro, Hr_Dietro]=wvref(h1,Delta,DatiRiflessione,fs,FileWg, [Data ' Down-Stream!']);

pluto=fopen(['DatiCalibrati\' FileWg '-Riflessione.dat'],'w');
fprintf(pluto,%%Hi_Davanti[cm] Hr_Davanti[cm] kr_Davanti Hi_Dietro[cm] Hr_Dietro[cm]
kr_Dietro\r\n');
fprintf(pluto,'%4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f\r\n',[Hi_Davanti
Hr_Davanti Kr_Davanti Hi_Dietro Hr_Dietro Kr_Dietro]);
fclose(pluto)

cd ..\FileMatLabPerAnalisiDati\

```

Allegato IV: Schema del canale e della strumentazione utilizzata.

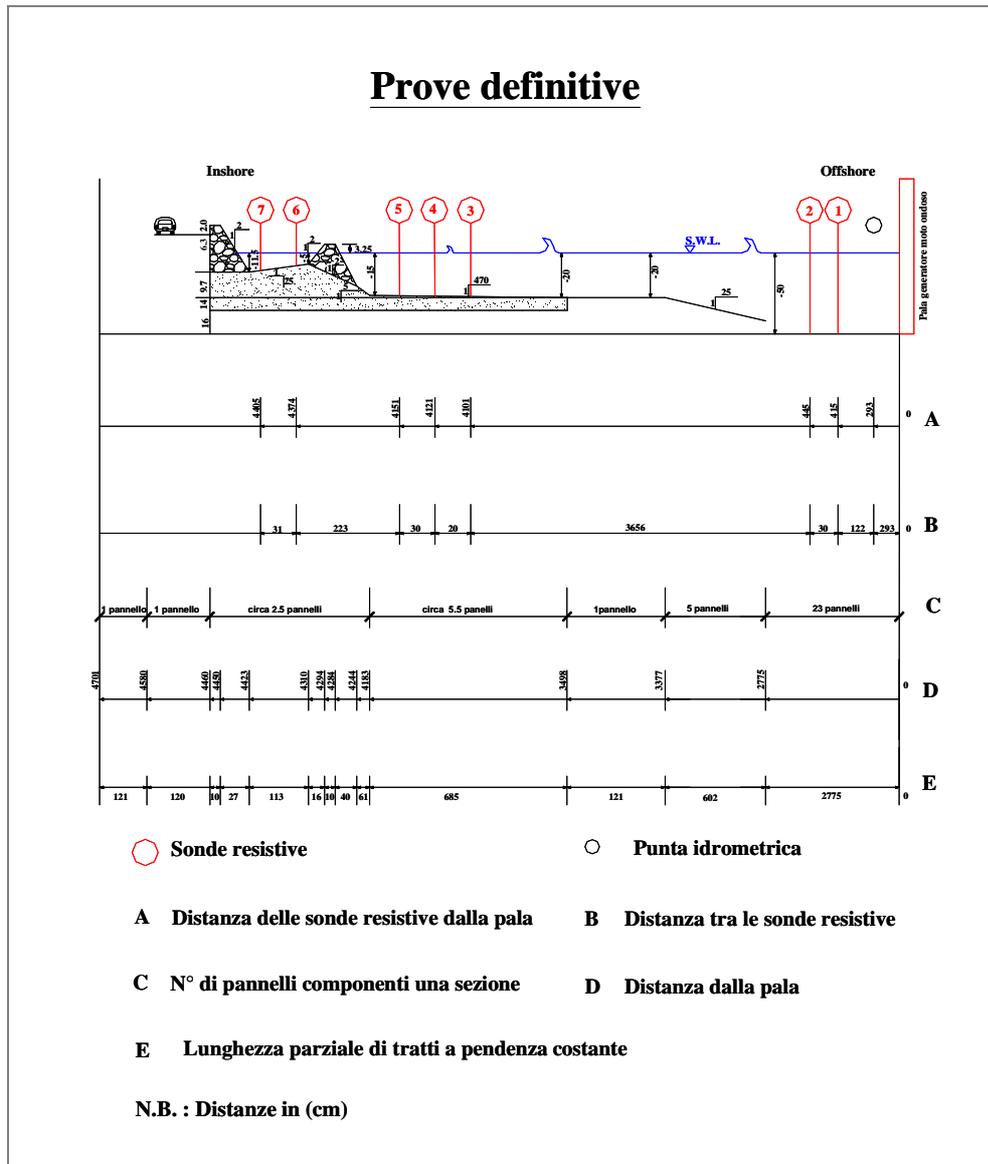


Figura 1 - Profilo non in scala del canale del Laboratorio Costiero di Firenze, rappresentante la posizione delle sonde durante le prove definitive.

Tabella 1: Parametri di generazione.

CODICE ONDA	H_{m0i} [cm]	T_p [sec]
I1	10	1.1
I2	10	1.4
I3	10	1.7
I4	15	1.4
I5	15	1.7
I6	18	1.7

Allegato V: Schema delle configurazioni studiate.

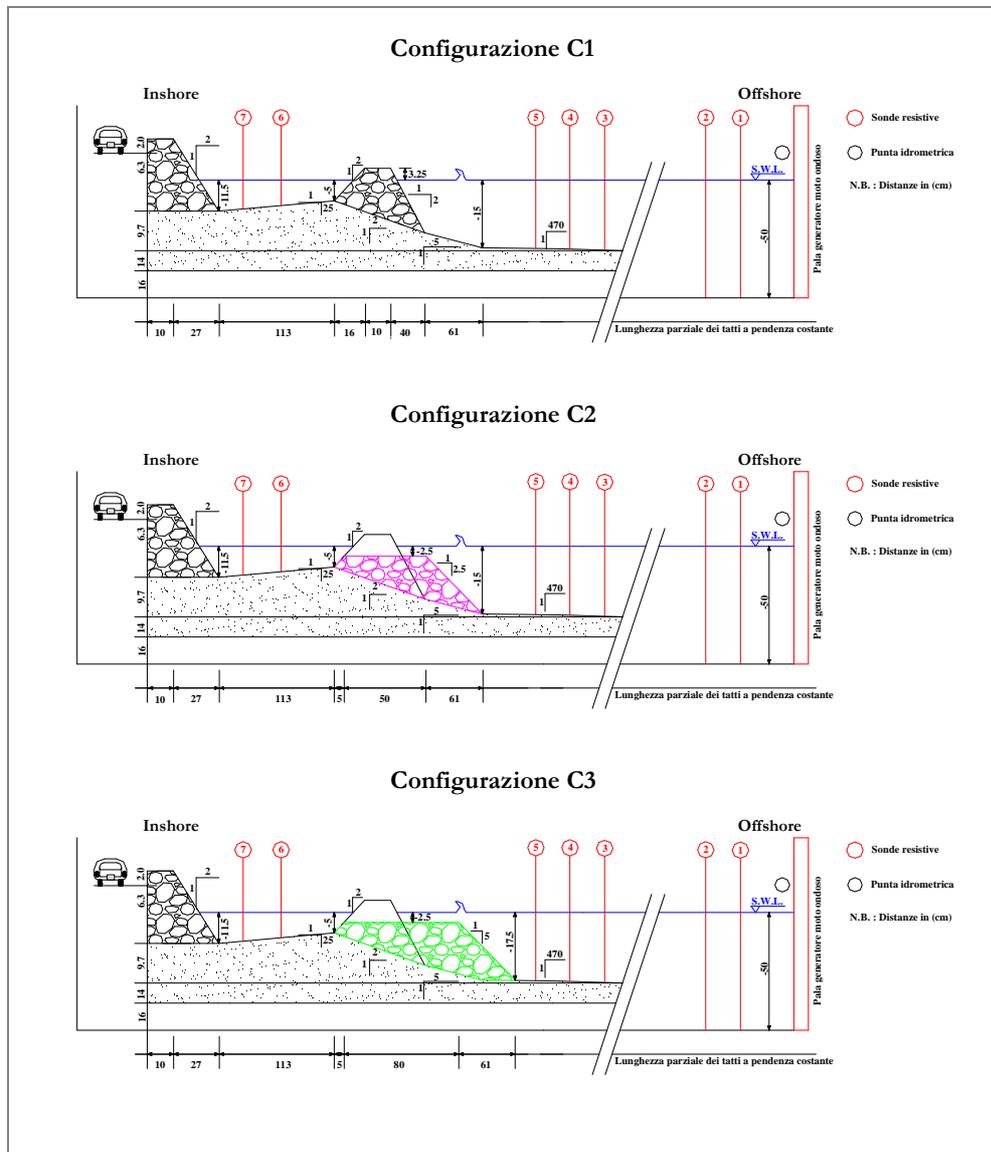


Figura 2 - Profilo non in scala rappresentante le configurazioni studiate e il posizionamento delle sonde.

Tabella 1: Granulometrie delle strutture riprodotte nel modello.

Scogliera radente				Scogliera parallela			
D_{15} [cm]	D_{85} [cm]	D_{50} [cm]	D_{85}/D_{15}	D_{15} [cm]	D_{85} [cm]	D_{50} [cm]	D_{85}/D_{15}
2.9	3.75	3.31	1.3	3.2	4.8	3.6	1.5

Indice delle figure

Figura 1.1- Rappresentazione schematica dei processi a scala piccola, larga e intermedia	7
Figura 2.1- Parametri progettuali e terminologia adottata.	20
Figura 2.2 -Schematizzazione della variazione del livello idrico nella zona compresa.....	25
Figura 2.3 - Andamento del Piling-up in funzione della	26
Figura 2.4 - Schema dell'interazione onde-struttura in corrispondenza.....	28
Figura 2.5 - Andamento del Piling-up in funzione della	31
Figura 2.6 - Evoluzione del Piling-up nel tempo (Tirindelli et al. 2001).....	33
Figura 2.7 - Sezione di una scogliera frangiflutti e flussi presenti attorno ad essa (Q_R rappresenta il flusso che viene a crearsi attraverso i varchi (Ruol 2003).	34
Figura 3.1 - Rappresentazione schematica del sistema di ricircolo.	41
Figura 3.2 - Esempio di segnale "tagliato".	44
Figura 3.3 - Grafici di calibrazione giornaliera di una giornata tipo (25-02-08).....	45
Figura 3.4 - Grafici di calibrazione giornaliera di una giornata tipo (25-02-08).....	46
Figura 3.5 - Effetti della pompa retro-pala.	48
Figura 4.1 - Rosa dei venti ottenuta dalla validazione	50
Figura 4.2 - Rosa delle onde ottenuta dalla validazione	52
Figura 4.3 - Profilo verticale di temperatura, salinità e densità dell'acqua.	55
Figura 4.4 - Inquadramento geografico del litorale di Marina di Pisa.....	56
Figura 4.5 - Foce dell'Arno, a sinistra all'altezza di S.Rossore si nota l'arretramento	58
Figura 4.6 - Carta batimetrica dell'area antistante Marina di Pisa,.....	59
Figura 4.7 - A sinistra è rappresentato il sistema di scogliere radenti e parallele che difende il litorale di Marina di Pisa, a destra foto aerea della scogliera n°5.....	61
Figura 4.8 - Ricostruzione in sezione del sistema di studio (scogliera distaccata e radente).....	62
Figura 4.9 - Principali parametri per il dimensionamento.....	63
Figura 4.10 - Frequenza relativa dei massi della scogliera emersa n°5.....	64
Figura 4.11 - Frequenza cumulata dei massi della scogliera emersa n°5.....	64
Figura 4.12 - Frequenza relativa dei massi della scogliera radente.	66
Figura 4.13 - Frequenza cumulata dei massi della scogliera radente.	66
Figura 5.1 - Particolare della scogliera emersa n°5 e relative sezioni trasversali batimetriche.....	67
Figura 5.2- Sezione batimetrica n°2.....	68
Figura 5.3 - Schematizzazione non in scala del profilo batimetrico ricostruito in canale.	70
Figura 5.4 - Frequenze relative del numero dei massi costituenti la scogliera emersa,.....	74
Figura 5.5 - Frequenza cumulata dei massi costituenti il modello della scogliera emersa,.....	74
Figura 5.6 - Frequenze relative del numero dei massi costituenti la scogliera radente,.....	77
Figura 5.7 - Frequenza cumulata dei massi costituenti il modello della scogliera radente.	77
Figura 5.8 - Grafico H-T relativo al settore 170°N-330°N fornito	79
Figura 5.9 - Profilo non in scala del canale del Laboratorio Costiero di Firenze, rappresentante la posizione delle sonde durante la prove preliminari.....	83
Figura 5.10 - Rappresentazione grafica dell'apparato per la misura.....	84
Figura 5.11- Profilo non in scala del canale del Laboratorio Costiero di Firenze, rappresentante la posizione delle sonde durante la prove definitive.	92
Figura 5.12 - Profilo non in scala rappresentante le strutture della configurazione C1 e C1-R e il posizionamento delle sonde.	94
Figura 5.13 - Profilo non in scala rappresentante le strutture della configurazione C2 e il posizionamento delle sonde.....	95
Figura 5.14 - Profilo non in scala rappresentante le strutture della configurazione C3e il posizionamento delle sonde.....	96
Figura 6.1 - Segnale acquisito dalla sonda in posizione 3	98
Figura 6.2 - Curva di calibrazione per la stima dei volumi di overtopping.....	106
Figura 6.3 - Tipi fondamentali di frangimento: i numeri indicano le diverse fasi del processo di.....	116
Figura 6.4 - Andamento dell'onda trasmessa in relazione all'onda incidente.....	121
Figura 6.5 - Andamento dell'onda trasmessa in relazione all'onda incidente.....	121
Figura 6.6 - Andamento dell'onda trasmessa in relazione all'onda incidente.....	122
Figura 6.7 - Andamento dell'onda trasmessa in relazione all'onda incidente.....	122
Figura 6.8 - Altezza d'onda trasmessa in funzione del periodo dell'altezza d'onda	124
Figura 6.9 - Altezza d'onda trasmessa in funzione del periodo dell'altezza d'onda	125
Figura 6.10 - Altezza d'onda trasmessa in funzione del periodo dell'altezza d'onda.....	125
Figura 6.11 - Altezza d'onda trasmessa in funzione del periodo dell'altezza d'onda.....	125

Figura 6.12 - Andamento di K_t in funzione di R/H_{m0i} per la configurazione C1.....	126
Figura 6.13 - Andamento di K_t in funzione di R/H_{m0i} per la configurazione C1.....	126
Figura 6.14 - Andamento di K_t in funzione di R/H_{m0i} per la configurazione C2.....	127
Figura 6.15 - Andamento di K_t in funzione di R/H_{m0i} per la configurazione C3.....	127
Figura 6.16 - Andamento di K_t in funzione di B/H_{m0i} per la configurazione C1.....	127
Figura 6.17 - Andamento di K_t in funzione di B/H_{m0i} per la configurazione C1.....	128
Figura 6.18 - Andamento di K_t in funzione di B/H_{m0i} per la configurazione C2.....	128
Figura 6.19 - Andamento di K_t in funzione di B/H_{m0i} per la configurazione C3.....	128
Figura 6.20 - Andamento di K_t in funzione di H_{m0i}/L_0 per la configurazione C1.....	129
Figura 6.21 - Andamento di K_t in funzione di H_{m0i}/L_0 per la configurazione C1.....	129
Figura 6.22 - Andamento di K_t in funzione di H_{m0i}/L_0 per la configurazione C2.....	129
Figura 6.23 - Andamento di K_t in funzione di H_{m0i}/L_0 per la configurazione C3.....	130
Figura 6.24 - Andamento dell'onda trasmessa in funzione dell'onda incidente.....	130
Figura 6.25 - Andamento dell'onda trasmessa in funzione dell'onda incidente.....	131
Figura 6.26 - Andamento dell'onda trasmessa in funzione dell'onda incidente.....	131
Figura 6.27 - Andamento dell'onda trasmessa in funzione dell'onda incidente.....	131
Figura 6.28 - Andamento dell'onda massima trasmessa in funzione.....	132
Figura 6.29 - Andamento dell'onda massima trasmessa in funzione.....	132
Figura 6.30 - Andamento dell'onda massima trasmessa in funzione.....	133
Figura 6.31 - Andamento dell'onda massima trasmessa in funzione.....	133
Figura 6.32 - Andamento di H_{m0t} in funzione di H_{m0i} (a sinistra) e di K_t in funzione di H_{m0i}/L_0 (a destra) relativo alle configurazioni C1, C2 e C3, per ogni livello idrico target.....	134
Figura 6.33 - Andamento di K_t in funzione di R/H_{m0i} (a sinistra) e di B/H_{m0i} (a destra) relativo alle configurazioni C1, C2 e C3, per ogni livello idrico target.....	134
Figura 6.34 - Andamento in scala prototipo di H_{m0t} in funzione di H_{m0i} (a sinistra) e di H_t max in funzione di H_t max (a destra), relativo alle configurazioni C1, C2 e C3, per ogni livello idrico target.....	135
Figura 6.35 - Andamento del Set-up in funzione dell'altezza d'onda incidente.....	136
Figura 6.36 - Andamento del Set-up in funzione dell'altezza d'onda incidente.....	136
Figura 6.37 - Andamento del Set-up in funzione dell'altezza d'onda incidente.....	137
Figura 6.38 - Andamento del Set-up in funzione dell'altezza d'onda incidente.....	137
Figura 6.39 - Andamento del Set-up in funzione del periodo di generazione.....	139
Figura 6.40 - Andamento del Set-up in funzione del periodo di generazione.....	139
Figura 6.41 - Andamento del Set-up in funzione del periodo di generazione.....	140
Figura 6.42 - Andamento del Set-up in funzione del periodo di generazione.....	140
Figura 6.43 - Andamento di Set-up/ H_{m0i} in funzione di R/H_{m0i}	141
Figura 6.44 - Andamento di Set-up/ H_{m0i} in funzione di R/H_{m0i}	141
Figura 6.45 - Andamento di Set-up/ H_{m0i} in funzione di R/H_{m0i}	141
Figura 6.46 - Andamento di Set-up/ H_{m0i} in funzione di R/H_{m0i}	142
Figura 6.47 - Andamento di $(\text{Set-up}/H_{m0i}) \cdot (B/L_0)$ in funzione di R/H_{m0i}	142
Figura 6.48 - Andamento di $(\text{Set-up}/H_{m0i}) \cdot (B/L_0)$ in funzione di R/H_{m0i}	143
Figura 6.49 - Andamento di $(\text{Set-up}/H_{m0i}) \cdot (B/L_0)$ in funzione di R/H_{m0i}	143
Figura 6.50 - Andamento di $(\text{Set-up}/H_{m0i}) \cdot (B/L_0)$ in funzione di R/H_{m0i}	143
Figura 6.51 - Andamento di Set-up/ H_{m0i} in funzione di B/H_{m0i}	144
Figura 6.52 - Andamento di Set-up/ H_{m0i} in funzione di B/H_{m0i}	144
Figura 6.53 - Andamento di Set-up/ H_{m0i} in funzione di B/H_{m0i}	144
Figura 6.54 - Andamento di Set-up/ H_{m0i} in funzione di B/H_{m0i}	145
Figura 6.55 - Andamento di Set-up/ H_{m0i} in funzione di H_{m0i}/L_0	145
Figura 6.56 - Andamento di Set-up/ H_{m0i} in funzione di H_{m0i}/L_0	146
Figura 6.57 - Andamento di Set-up/ H_{m0i} in funzione di H_{m0i}/L_0	146
Figura 6.58 - Andamento di Set-up/ H_{m0i} in funzione di H_{m0i}/L_0	146
Figura 6.59 - Andamento del Set-up in funzione dell'onda incidente.....	147
Figura 6.60 - Andamento del set-up in funzione dell'onda incidente.....	147
Figura 6.61 - Andamento del set-up in funzione dell'onda incidente.....	148
Figura 6.62 - Andamento del set-up in funzione dell'onda incidente.....	148
Figura 6.63 - Andamento del Set-up in funzione di H_{m0i} , in scala modello (a sinistra) e in scala prototipo (a destra) relativo alle configurazioni C1, C2 e C3, per ogni livello idrico target.....	149
Figura 6.64 - Andamento di Set-up/ H_{m0i} in funzione di R/H_{m0i} (a sinistra) e di B/H_{m0i} (a destra) relativo alle configurazioni C1, C2 e C3, per ogni livello idrico target.....	149
Figura 6.65 - Andamento di Set-up/ H_{m0i} in funzione di H_{m0i}/L_0 (a sinistra) e di $(\text{Set-up}/H_{m0i}) \cdot (B/L_0)$	150
Figura 6.66 - Andamento della portata di overtopping in funzione dell'onda incidente.....	152
Figura 6.67 - Andamento della portata di overtopping in funzione dell'onda incidente.....	152
Figura 6.68 - Andamento della portata di overtopping in funzione dell'onda incidente.....	152
Figura 6.69 - Andamento della portata di overtopping in funzione dell'onda incidente.....	153

Figura 6.70 - Andamento di Q^* in funzione di R/H_{m0i} per la configurazione C1	153
Figura 6.71- Andamento di Q^* in funzione di R/H_{m0i} per la configurazione C1	154
Figura 6.72 - Andamento di Q^* in funzione di R/H_{m0i} per la configurazione C2.	154
Figura 6.73 - Andamento di Q^* in funzione di R/H_{m0i} per la configurazione C3.	154
Figura 6.74 - Andamento di Q^* in funzione di B/H_{m0i} , per la configurazione C1	155
Figura 6.75 - Andamento di Q^* in funzione di B/H_{m0i} , per la configurazione C1	155
Figura 6.76 - Andamento di Q^* in funzione di B/H_{m0i} , per la configurazione C2.....	155
Figura 6.77 - Andamento di Q^* in funzione di B/H_{m0i} , per la configurazione C3.....	156
Figura 6.78 - Andamento di Q^* in funzione di H_{m0i}/L_0 per la configurazione C1.....	156
Figura 6.79 - Andamento di Q^* in funzione di H_{m0i}/L_0 per la configurazione C1.....	157
Figura 6.80 - Andamento di Q^* in funzione di H_{m0i}/L_0 per la configurazione C2.....	157
Figura 6.81 - Andamento di Q^* in funzione di H_{m0i}/L_0 per la configurazione C3.....	157
Figura 6.82 - N° di Green water/min in funzione di H_{m0i} : in alto a sinistra il grafico si riferisce alla configurazione C1 senza ricircolo, in alto a destra alla configurazione C1 con ricircolo,.....	158
Figura 6.83 - N° di White water/min in funzione di H_{m0i} : in alto a sinistra il grafico si riferisce alla configurazione C1 senza ricircolo, in alto a destra alla configurazione C1 con ricircolo,.....	159
Figura 6.84 - Andamento di Q^* in funzione di Set-up/ H_{m0i} per la configurazione C1.....	159
Figura 6.85 - Andamento di Q^* in funzione di Set-up/ H_{m0i} per la configurazione C1	160
Figura 6.86 - Andamento di Q^* in funzione di Set-up/ H_{m0i} per la configurazione C2.	160
Figura 6.87 - Andamento di Q^* in funzione di Set-up/ H_{m0i} per la configurazione C3.	160
Figura 6.88 - Andamento di Q_w in funzione di H_{m0i} per la configurazione C1	161
Figura 6.89 - Andamento di Q_w in funzione di H_{m0i} per la configurazione C1	161
Figura 6.90 - Andamento di Q_w in funzione di H_{m0i} per la configurazione C2,.....	161
Figura 6.91 - Andamento di Q_w in funzione di H_{m0i} per la configurazione C3,.....	162
Figura 6.92 - Andamento di $Q_w/(N_w+N_G)$ in funzione di H_{m0i}	162
Figura 6.93 - Andamento di $Q_w/(N_w+N_G)$ in funzione di H_{m0i}	162
Figura 6.94 - Andamento di $Q_w/(N_w+N_G)$ in funzione di H_{m0i}	163
Figura 6.95 - Andamento di $Q_w/(N_w+N_G)$ in funzione di H_{m0i}	163
Figura 6.96 - Andamento di Q_w in funzione di H_{m0i} nel modello (a sinistra) e nel prototipo (a destra) relativo alle configurazioni C1, C2 e C3, per ogni livello idrico target.	164
Figura 6.97 - Andamento di Q^* in funzione di R/H_{m0i} (a sinistra) e di B/H_{m0i} (a destra) relativo alle configurazioni C1, C2 e C3, per ogni livello idrico target.....	164
Figura 6.98 - Numero di White Water/min (a sinistra) e di Green Water/min (a destra) in funzione di H_{m0i} relativo alle configurazioni C1, C2 e C3, per ogni livello idrico target.....	165
Figura 6.99 - Andamento di Q^* in funzione di H_{m0i}/L_0 (a sinistra) e di Set-up/ H_{m0i} (a destra) relativo alle configurazioni C1, C2 e C3, per ogni livello idrico target.....	165

Indice delle foto

Foto 3.1 - Il canale del Laboratorio Costiero del Dipartimento di Ingegneria	38
Foto 3.2 - Prospetto frontale della parte meccanica	39
Foto 3.3 - Pompa di retropala.....	40
Foto 3.4 - Valvola a saracinesca.....	40
Foto 3.5 - Particolari del sistema di ricircolo: pompa di	41
Foto 3.6 - Sonda resistiva e schema elettrico equivalente.....	42
Foto 3.7 - Punta idrometrica.....	47
Foto 3.8 - Misuratore di portata	49
Foto 4.1 - Vista del confine Nord e Sud della scogliera n°5.	62
Foto 5.1 - Componenti dell'apparato per la misura dei volumi di overtopping.	85
Foto 5.2 - Scogliera radente ricostruita in canale, vista laterale (a sinistra) e frontale (a destra)	93
Foto 5.3 - Scogliera emersa ricostruita in canale per la configurazioni C1 e C1-R.	94
Foto 5.4 - Scogliera emersa ricostruita in canale per la configurazione C2.	95
Foto 5.5 - Scogliera emersa ricostruita in canale per la configurazione C3.	96

Indice delle tabelle

Tabella 3.1: Esempio di calibrazione giornaliera sonde mobili (25-02-08).....	44
Tabella 4.1: Altezze d'onda significative e rispettivi periodi di ritorno.	57
Tabella 4.2: Frequenze relative e cumulate ottenute dai dati rilevati in sito per la scogliera emersa n°5.	64
Tabella 4.3: Frequenze relative e cumulate ottenute dai dati rilevati in sito per la scogliera radente.	65
Tabella 5.1: Tabella riassuntiva riguardante i tratti a pendenza costante.....	71
Tabella 5.2: Frequenze relative stimate della scogliera emersa prima della modifica.....	73
Tabella 5.3: Parametri stimati per la costruzione del modello della scogliera emersa dopo la modifica.....	74
Tabella 5.4: Frequenze relative stimate per la costruzione della scogliera radente prima della modifica.....	76
Tabella 5.5: Parametri stimati per la costruzione della scogliera radente a partire dopo la modifica.....	76
Tabella 5.6: Parametri stimati per le onde incidenti e generate scelte nel Prototipo e nel Modello.....	79
Tabella 5.7: Valori dei livelli idrici in canale per le prove senza ricircolo.....	80
Tabella 5.8: Valori dei livelli idrici in canale per le prove con ricircolo.....	81
Tabella 5.9: Posizione delle sonde in canale, durante le prove preliminari.....	83
Tabella 5.10: Valori dei livelli idrici in canale per le prove preliminari.....	86
Tabella 5.11: Parametri di generazione e valori misurati durante le prove preliminari.....	86
Tabella 5.12: Parametri caratteristici registrati durante la serie di prove preliminari.....	88
Tabella 5.13: Dissipazione percentuale per i livelli F1 e F2 durante la serie di prove preliminari.....	89
Tabella 5.14: Misurazioni relative al giorno 04/02/08 per il livello idrico F1.....	89
Tabella 5.15: Misurazioni relative al giorno 04/02/08 per il livello F2.....	90
Tabella 5.16: Misurazioni relative al giorno 11/02/08 per il livello F1.....	90
Tabella 5.17: Misurazioni relative al giorno 11/02/08 per il livello F2.....	90
Tabella 6.1: Errore medio di calibrazione associato ad ogni sonda.	97
Tabella 6.2: Deviazioni standard per il livello F0, relative alla configurazione C1 senza ricircolo.....	99
Tabella 6.3: Deviazioni standard per il livello F1, relative alla configurazione C1 senza ricircolo.....	99
Tabella 6.4: Deviazioni standard per il livello F2, relative alla configurazione C1 senza ricircolo.....	100
Tabella 6.5: Deviazioni standard per il livello F0, relative alla configurazione C1 con ricircolo.....	100
Tabella 6.6: Deviazioni standard per il livello F1, relative alla configurazione C1 con ricircolo.....	100
Tabella 6.7: Deviazioni standard per il livello F2, relative alla configurazione C1 con ricircolo.....	101
Tabella 6.8: Deviazioni standard per il livello F0, relative alla configurazione C2.....	101
Tabella 6.9: Deviazioni standard per il livello F1, relative alla configurazione C2.....	101
Tabella 6.10: Deviazioni standard per il livello F2, relative alla configurazione C2.....	102
Tabella 6.11: Deviazioni standard per il livello F0, relative alla configurazione C3.....	102
Tabella 6.12: Deviazioni standard per il livello F1, relative alla configurazione C3.....	102
Tabella 6.13: Deviazioni standard per il livello F2, relative alla configurazione C3.....	103
Tabella 6.14: Livelli idrici impostati in canale per la configurazione C1 con sistema di ricircolo spento.....	103
Tabella 6.15: Rilievi della quota della cresta della scogliera per le prove relative alla configurazione C1 con sistema di ricircolo spento.....	104
Tabella 6.16: Parametri caratteristici registrati per la configurazione C1 senza ricircolo.....	105
Tabella 6.17: Misure di overtopping, relative alla configurazione C1 senza ricircolo.....	106
Tabella 6.18: Livelli idrici impostati in canale per la configurazione C1 con sistema di ricircolo acceso.....	107
Tabella 6.19: Rilievi della quota della cresta della scogliera per la configurazione C1 con ricircolo.....	107
Tabella 6.20: Parametri caratteristici registrati per la configurazione C1 con ricircolo.....	108
Tabella 6.21: Portate di ricircolo registrate durante la serie di prove relative alla configurazione C1 con sistema di ricircolo acceso.....	108
Tabella 6.22: Misure di overtopping relative alla configurazione C1 con ricircolo.....	109
Tabella 6.23: Livelli idrici impostati in canale per le prove relative alla configurazione C2.....	110
Tabella 6.24: Rilievi della quota della cresta della scogliera per la configurazione C2.....	110
Tabella 6.25: Parametri caratteristici registrati durante la serie di prove relative alla configurazione C2.....	111
Tabella 6.26: Misure di overtopping relative alla configurazione C2.....	112
Tabella 6.27: Livelli idrici impostati in canale per la configurazione C3.....	112
Tabella 6.28: Rilievi della quota della cresta della scogliera per le prove relative alla configurazione C3.....	113
Tabella 6.29: Parametri caratteristici registrati durante la serie di prove relative alla configurazione C3.....	113
Tabella 6.30: Misure di overtopping relative alla configurazione C3.....	114
Tabella 6.31: Parametri delle onde incidenti e coefficienti di frangimento, relativi alla configurazione C1 con sistema di ricircolo spento.....	117
Tabella 6.32: Parametri delle onde trasmesse e coefficienti di frangimento, relativi alla configurazione C1 con sistema di ricircolo spento.....	117

Tabella 6.33: Parametri delle onde incidenti e coefficienti di frangimento, relativi alla configurazione C1 con sistema di ricircolo acceso.....	118
Tabella 6.34: Parametri delle onde trasmesse e coefficienti di frangimento, relativi alla configurazione C1 con sistema di ricircolo acceso.....	118
Tabella 6.35: Parametri delle onde incidenti e coefficienti di frangimento, relativi alla configurazione C2.....	119
Tabella 6.36: Parametri delle onde trasmesse e coefficienti di frangimento, relativi alla configurazione C2.....	119
Tabella 6.37: Parametri delle onde incidenti e coefficienti di frangimento, relativi alla configurazione C3.....	120
Tabella 6.38: Parametri delle onde trasmesse e coefficienti di frangimento, relativi alla configurazione C3.....	120
Tabella 6.39: Altezza d'onda trasmessa in relazione al periodo e al livello idrico per le prove relative alla configurazione C1 con sistema di ricircolo spento.....	123
Tabella 6.40: Altezza d'onda trasmessa in relazione al periodo e al livello idrico per le prove relative alla configurazione C1 con sistema di ricircolo acceso.....	123
Tabella 6.41: Altezza d'onda trasmessa in relazione al periodo e al livello idrico per le prove relative alla configurazione C2.....	123
Tabella 6.42: Altezza d'onda trasmessa in relazione al periodo e al livello idrico per le prove relative alla configurazione C3.....	124
Tabella 6.43: Set-up in relazione al periodo e al livello idrico per le prove relative alla configurazione C1 con sistema di ricircolo spento.....	138
Tabella 6.44: Set-up in relazione al periodo e al livello idrico per le prove relative alla configurazione C1 con sistema di ricircolo acceso.....	138
Tabella 6.45: Set-up in relazione al periodo e al livello idrico per le prove relative alla configurazione C2.....	138
Tabella 6.46: Set-up in relazione al periodo e al livello idrico per le prove relative alla configurazione C3.....	138
Tabella 6.47: Portate di overtopping per le prove relative alla configurazione C1 senza ricircolo.....	150
Tabella 6.48: Portate di overtopping per le prove relative alla configurazione C1 con ricircolo.....	151
Tabella 6.49: Portate di overtopping per le prove relative alla configurazione C2.....	151
Tabella 6.50: Portate di overtopping per le prove relative alla configurazione C3.....	151

Bibliografia

Aminti P.L., Cipriani L.E., Pranzini E. - *Converting seawalls into gravel beaches. In Soft Shore Protection, Coastal Systems and Continental Margins - Back to the beach: Volume 7*, C. Goudas et al (eds), Kluwer Academic Publ., pp.261-274, 2003.

Aminti P.L., Pranzini E. - *Indagine sperimentale per la ristrutturazione delle difese di Marina di Pisa - Studi costieri n°3*, Dinamica e difesa dei litorali-Gestione integrata della fascia costiera., 2000.

Aminti P.L., Pranzini E. - *La difesa dei litorali in Italia* - Edizioni delle Autonomie, 1993.

Aminti P.L., Archetti R., Atzeni A., Canu V., Cappietti L., Lorenzoni C., Mancinelli A., Zanuttigh B. - *Opere di difesa realizzate con strutture sommerse ed a cresta bassa ad Alghero (SS), Perd'e Sali (CA), Marina di Massa (MS), Marina di Pisa (PI), Porto Recanati (MC), Marina di Montemarciano (AN), Lido di Dante (RA) e Pallestrina (VE)* - Studi costieri n°9, pp.7-50, 2005.

Balzano, Cappietti L., Soldini, Zanuttigh B. - *Modellazione numerica della circolazione attorno ad opere trascinabili.* - Studi Costieri 2006.

Bersanti M., Delbono I., Ferretti O., Furia S. - *Difese costiere morbide: rinascimenti artificiali, rassegna tipologica* - Elementi di gestione costiera, parte IV, 2003.

Bianco G. - *Valutazione di notevoli effetti di scala in modelli idraulici di frequente impiego* - XXII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Cosenza, 4-7 Ottobre 1990, pp. 75-90.

Braconi A. - *Misure sperimentali di piling-up in presenza di scogliere trascinabili.*- Tesi di laurea, Firenze 2005

Briganti R., Bellotti G., Franco L., De Rouck J., Geeraerts J.- *Field measurements of wave overtopping at the rubble mound breakwater of Tome-Ostia yacht harbour* - Coastal Engineering 52, 1155-1174, 2005.

Calabrese M., Vicinanza D. e Buccino M.- *Trasmissione ondosa a tergo di scogliere a cresta bassa: indagine sperimentale su modello in grande scala.* - 28° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, 2002.

Calabrese M., Vicinanza D., e Buccino M.- *Trasmissione ondosa a tergo di scogliere a cresta bassa.* 2003.

Cappietti L., Martinelli L., Zanuttigh B.- *Experimental analysis of piling-up and filtration in presence of low crested structures.*- XXIX Convegno di idraulica e Costruzioni Idrauliche, Trento 2004.

Cappietti L., Mori E., Aminti P.L.- *Studio sperimentale dell'influenza della larghezza di berma sulla trasmissione di moto ondoso sottoflutto a scogliere sommerse.* - XXX Convegno di idraulica e Costruzioni idrauliche, IDRA 2006.

Cappiotti L., Pratola L., Rinaldi A.- *Esperimenti sull'idrodinamica indotta da moto ondoso in presenza di barriere sommerse separate da un varco. Risultati preliminari.*- XXIX Convegno di idraulica e Costruzioni Idrauliche, Trento 2004.

C.E.R.C. Coastal Engineering Research Center - *Coastal and Hydraulic Laboratory*, U.S. Army Corps of Engineers. Coastal Engineering Manual, 1998.

Cipriani L.E., Regoli C. - *Il Piano Regionale di gestione integrata della costa ai fini del riassetto idrogeologico* - Regione Toscana, Direzione Generale Politiche Territoriali e Ambientali, 2004.

Cipriani L.E., Ferri S., Iannotta P., Paolieri F., Pranzini E. - *Morfologia e dinamica dei sedimenti del litorale della Toscana settentrionale* - Studi costieri, n°4, Dinamica e difesa dei litorali-Gestione integrata della fascia costiera, pp. 119-156, 2001.

Costa F.V. - *Time Scale Selection in Hydraulic Modelling* - Journal of Coastal Research 7: 29-40, 1984.

Dalrymple R.A. - *Introduction to physical models in coastal engineering* - Physical modelling in coastal engineering. Edited by Dalrymple R.A., A.A. Balkema /Rotterdam/Boston, 1985.

D'Ambrosio P.A., Damiani L., Petrillo A.F. - *Convenzione tra l'Autorità di Bacino dell'Arno ed il Politecnico di Bari* - Laboratorio di ricerca e sperimentazione per la Difesa delle Coste, 2003.

D'Angremond K., W.van der Meer J., and De Jong R.J.- *Wave transmission at low-crested structures.*- 25° International Conference on Coastal Engineering, 2:2418–2427, 1996.

DEAM srl. - *Studio Meteo-Marino: Caratteristiche di dettaglio della morfodinamica costiera mediante modello matematico* - Documento n°GD-PP-MM/1-2006 area Ligure-Tirreno, 2006.

Dean R.G. - *Physical modelling of littoral processes* - Physical modelling in coastal engineering. Edited by Dalrymple R.A., A.A. Balkema /Rotterdam/Boston, 1985.

Dean R.G. - *Defense of Shorelines by Structural Approaches* - Proceedings of the Short Course on Design and Reliability of Coastal Structures, Venice, Italy. American Society of Civil Engineers, 1992.

De Girolamo F., Franco L., Noli A. - *Fondamenti di oceanografia e idraulica marittima per ingegneri* - Settembre 2003.

Diskin, M.H. et al. - *Piling-up behind low and submerged permeable breakwaters*,1970.

EurOtop Manual - *Wave overtopping of sea defences and related structures: assessment*, August 2007.

Hallermeier R. - *Added evidence on new scale law for coastal models* - Coastal Engineering, vol. I, 1984 pp. 1227-1241.

Hughes S.A. - *Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering* - Advanced Series in Ocean Engineering. World Scientific Press, 1993.

HydralabIII - *Guidelines for physical model testing of breakwaters Rubble mound breakwaters*, August 2007

Ito M., Tsuchiya Y. - *Time scale for modelling beach change* - Coastal Engineering, ASCE, pp. 1196-1209, 1986.

Kamphuis J. W. - *On Understanding Scale Effects in Coastal Mobile Bed Models* - Physical Modelling in Coastal Engineering. Balkema/Rotterdam, 1985.

Lajos I. - *Hydraulic Models* - Research Institute for Water Resource Development. Budapest, 1975.

Lamberti A., Tomasicchio U.- *Le barriere sommerse possibile strutture a difesa della costa*. - Porti Mare Territorio, (1):29–37, Gen.-Mar. 1981.

Langhaar H.L. - *Dimensional Analysis and Theory of Models*. John Wiley & Sons, New York, 1951.

Leont'yev I.O. - *Modelling of Morphological Changes due to Coastal Structures* - Coastal Engineering 38: pp. 143-166. Elsevier, 1999.

Longuet M.S., Higgins- *On the wave-induced difference in mean sea water level between the two sides of a submerged breakwater* - Journal of Marine research, 25:148–153, 2 1967.

Loveless J.H., Debski D.- *Wave trasmission and set-up at detached breakwaters*. - Coastal Dynamics, pages 674–683, 1997.

Loveless J.H., Debski D., e MacLeod A.B. - *Sea level set-up behind detached breakwaters*. - 26° International Conference on Coastal Engineering, 2:1665–1678, 1998.

Marchi E., Rubatta A. - *Meccanica dei fluidi: principi ed applicazioni idrauliche* - UTET, Torino, 1981.

Milano V. - *L'evoluzione e le caratteristiche meteo-marine del litorale compreso tra i porti di Livorno e di Viareggio dal 1846 al 1983*- L'evoluzione e la dinamica del litorale prospiciente i bacini dell'Arno e del Serchio e i problemi di erosione della costa, Bacino dell'Arno, n°3, Dicembre 1994.

Mimura N., Otsuka Y., Watanabe A. - *Laboratory study on two dimensional beach transformation due to irregular waves* - Coastal Engineering, vol. II, pp. 1393-1405, 1986.

Mori E.- *Studio sperimentale sulla idrodinamica e morfodinamica indotta da barriere a cresta bassa. Applicazione al caso di Marina di Massa*.- Tesi di laurea, Firenze 2005.

Nardi R. - *Principali problematiche riguardanti la dinamica marinadel litorale prospiciente I bacini dell'Arno e del Serchio* - L'evoluzione e la dinamica del litorale prospiciente i bacini dell'Arno e del Serchio e i problemi di erosione della costa, Bacino dell'Arno, n°3, Dicembre 1994.

Nicholson J., Broker I., Roelvink J.A., Price D., Tanguy J.M. Moreno L. - *Intercomparison of Coastal Area Morphodynamic Models* - Coastal Engineering, pp. 97-123. Elsevier, 1997.

Pasanisi F.- *Elementi di modellistica fisica* – La Dinamica costiera: modellistica fisico-matematica, analisi del territorio, il supporto G.I.S., e la strumentazione in uso - pp. 52-79, 2001

Petrillo, A.F.- *Modello fisico di opere per la protezione del litorale di Marina di Pisa* - Convegno: La difesa e il riequilibrio del litorale pisano. Organizzato dalla Provincia di Pisa. Pisa, 12 dicembre 2003.

Pranzini E. - *L'evoluzione e la dinamica del litorale prospiciente i bacini dell'Arno e del Serchio e problemi di erosione della costa* - Quaderno n°3, Autorità di Bacino del fiume Arno, Autorità di bacino sperimentale del fiume Serchio, Dicembre, 1994.

Ruol P., Martinelli L., Zanuttigh B., Cappiotti L. , Vicinanza D., Faedo A. - *Sui fenomeni di tracimazione, filtrazione e sovrarzo per opere di difesa longitudinale a cresta bassa*- Studi costieri n°9, 2005.

Suh K., Dalrymple R.A. - *Offshore Breakwaters in Laboratory and Field* - Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering 113:105-121. American Society of Civil Engineers, 1987.

Svendsen I.A. - *Hydrodynamics of the Surf Zone* - Proceedings of the Short Course on Design and Reliability of Coastal Structures, Venice, Italy. American Society of Civil Engineers, 1992.

Thornton E., Dalrymple T., Drake T., Elgar S., Gallagher E., Guza B., Hay A., Holman R., Kaihatu J., Lippmann T. Ozkan-Haller T. - *State of Nearshore Processes Research: II*. Technical Report NPS-OC-00-001. Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2000

Van der Meer J.W., Daemen I.F.R.- *Stability and wave transmission at low-crested rubblemound structures*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, (120):1–19, 1994.

Van der Meer J.W., Regeling E., De Waal J.P.- *Wave transmission: spectral changes and its effects on run-up and overtopping*. - 27° International Conference on Coastal Engineering, pages 2156–2168, 2000.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il Prof. Ing. Lorenzo Cappietti, per essere stato una preziosa guida durante tutto il percorso, e per avermi dato l'opportunità di realizzare un lavoro così appassionante.

Ringrazio inoltre il Prof. Pier Luigi Aminti per la sua saggezza e l'Ing. Enrica Mori per la sua infinita disponibilità e per avermi svelato l'esistenza del "tasto segreto".

Un sincero grazie va anche ai tecnici del Laboratorio di Idraulica, Mauro Gioli e Muzio Mascherini, che sono stati preziosissimi nella messa a punto del canale e della strumentazione e a Guido, Matteo, Luca insostituibili compagni d'avventura, ma soprattutto ad Alice, per aver diviso con me le fatiche e lo stress, e per le risate sul treno!

Un grazie enorme va ai miei genitori e a mia sorella Giuliana, per aver permesso, con tanti sacrifici, che realizzassi tutto questo e per aver sempre creduto in me.

Inoltre volevo ringraziare di cuore il mio papà per avermi aiutato nella realizzazione grafica della tesi, ottenendo con quest'ultima fatica la sua seconda laurea honoris causa!

Grazie anche alla famiglia Baldaccini per il sostegno e per avermi coccolata come una figlia, a tutti gli amici vicini e lontani, che hanno condiviso con me i momenti belli e brutti dell'università, in particolare: le piombinesi, le "cozze", la "socia", Ella, Marzia, Lidia, Olindo, La Mary, Flory, Massy, Graziana e Silvia, impareggiabile coinquilina e amica.

Infine un grazie di cuore a Gianluca, che ha acceso una luce nel periodo più scuro della mia vita e che con il suo amore mi è sempre stato vicino ed ha saputo spronarmi nei momenti di sconforto.